

# 원전 계측제어 동계 워크숍

일시 : 2020년 2월

주최 : 한국원자력학회 원자력계측제어  
인간공학 및 자동원격 연구부회,  
조선대학교 미래원자력연구센터



-  Abundant Energy
-  Clean Environment
-  Healthy Life



한국원자력학회  
Korean Nuclear Society



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

# 목 차

1. Analysis of RPSs with Multiple Platforms from Safety and Security Point of View .....	4
[정지예(경희대)]	
2. 시선엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인 평가를 위한 조사연구 .....	13
[이예진(KAERI)]	
3. Autonomous Algorithm for Bubble Creation Operation in Pressurizer by Deep Reinforcement Learning .....	23
[이대일(조선대)]	
4. Development of interacting multiple model using wall temperature and radiation distribution outside of reactor vessel for classification and identification of sequence of events of severe accidents in nuclear power plants .....	33
[김정택(KAERI)]	
5. 원자력 사고 대응에서 목표충돌(goal conflict) 및 운전원 반응에 대한 기초 연구 .....	46
[이용희(KAERI)]	
6. 기존 시뮬레이터에 중대사고 모델 추가 구현 방법 .....	48
[이정훈(미래와도전)]	
7. 직무분석와 전산화절차서의 정형화된 MMIS 개발 .....	60
[정연섭(KHNP-CRI)]	
8. Diagnosis of abnormal conditions in nuclear power plants using artificial intelligence .....	66
[박지훈(조선대)]	

9. An intelligent operator support system for initial emergency responses in nuclear power plants .....	82
[강정성(UNIST)]	
10. 원전 기동/정지 운전 자동화 규칙 설계 .....	102
[장인석(KAERI)]	
11. SMART100 표준설계 인허가 획득을 위한 설계기준초과사고 및 중대사고 관련 인간 공학 적용 방안 .....	112
[김사길(KAERI)]	
12. 온톨로지 기반 운영기술지침 검색 및 감시 체계 개발 .....	125
[성노규(KHNP-CRI)]	

---

# Analysis of RPSs with Multiple Platforms from Safety and Security Point of View

---

정지예

경희대학교





# Analysis of RPS with Multiple Platforms from Safety and Security Point of View : Case Study for AGN-201K

2020 동계 I&C Workshop

Jiye Jeong ([jiye.khu@gmail.com](mailto:jiye.khu@gmail.com)), Gyunyoung Heo ([gheo@khu.ac.kr](mailto:gheo@khu.ac.kr))  
Department of Nuclear Engineering  
Kyung Hee University

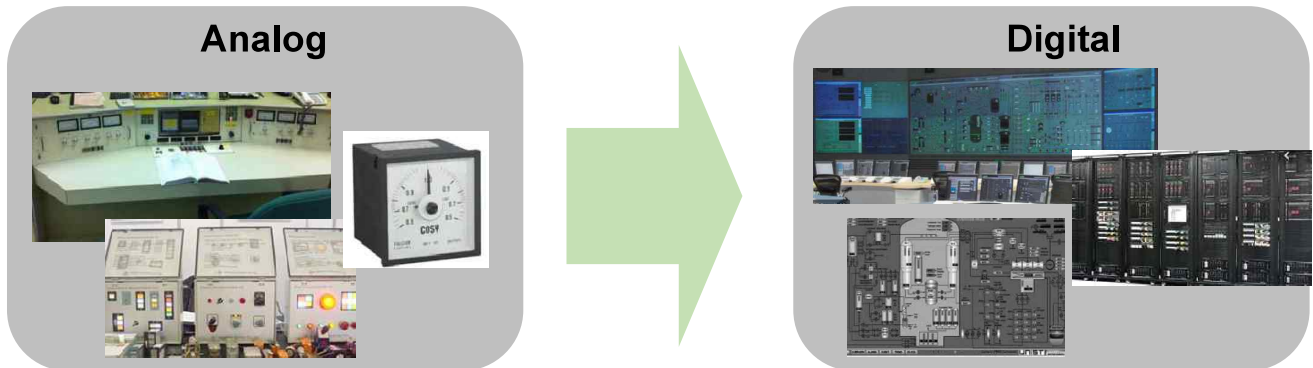
Analysis of RPS with Multiple Platforms from Safety and Security Point of View : Case Study for AGN-201K

## Table of Contents

- Introduction
  - 1) Background
  - 2) Goals
- System Modeling of RPS of ANG-201K
  - 1) System Modeling of RPS
  - 2) Case 1 : Four Channels of Analog
  - 3) Case 2 : Four Channels of PLC
  - 4) Case 3 : Four Channels of FPGA
  - 5) Case 4 : Digital Hybrid (Two channels of PLC + Two channels of FPGA)
- Conclusion
  - 1) Comparing Unavailability
  - 2) Next Activities

## Introduction

### >> BACKGROUND



### Issue of CCF (Common Cause Failure) : Enhanced Requirement of Diversity

NUREG/CR-6303 ("Methods for Performing Diversity and Defense-in-Depth Analysis of Reactor Protection System")  
 NUREG/CR-7007 ("Diversity Strategies for Nuclear Power Plant Instrumentation and Control System")  
 SECY 91-292 ("Digital Computer Systems for Advanced Light-Water Reactors")

## Introduction

### >> BACKGROUND

- Digital platforms of NPP I&C : PLC<sup>1)</sup>, FPGA<sup>2)</sup>
  - **PLC → for Safety System**
    - : High reliability, Dynamic Characteristics,
    - Easy maintenance, Cheap
    - But, weak to cyber security
  - **FPGA → Considered**
    - : High performance and low complexity,
    - High reliability, Easy maintenance,
    - good to cyber security,
    - But, expensive and large power consumption



PLC (SOOSAN ENS)



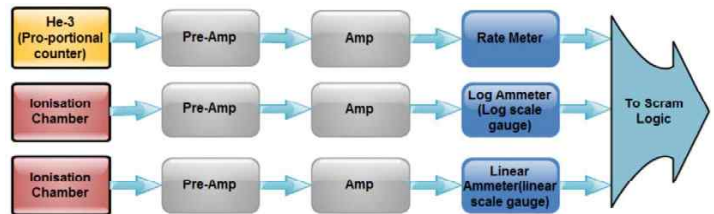
FPGA (DOOSAN)

1) PLC : Programmable Logic Controller  
 2) FPGA : Field Programmable Gate Array

## Introduction

### >> GOALS

- Single platform is still weak from CCF  
(Common Cause Failure)
  - Design Concept : Digital Hybrid with PLC & FPGA for Safety improvements
  - Compare Unavailability  
by Fault Tree Analysis (FTA) with failure data  
of RPS of AGN-201K

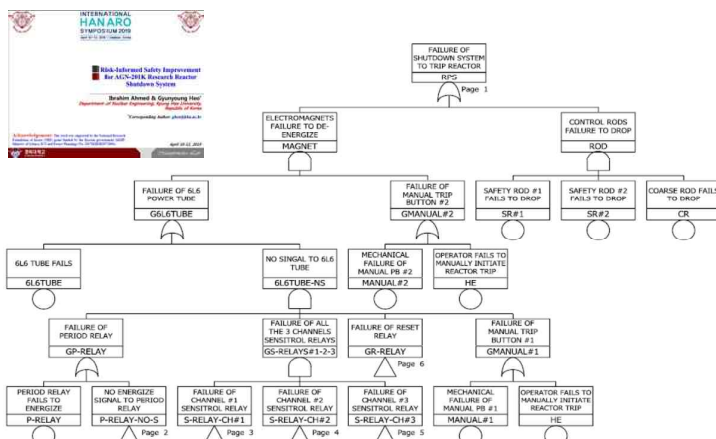


AGN-201K : Research Reactor in Kyung Hee University in Korea

## System Modeling of RPS of AGN-201K

### >> SYSTEM MODELING OF RPS

- System modeling FT for AGN-201K shutdown system and failure data collection<sup>[1]</sup>



Fault Tree Model of AGN-201K

- Previous system modeling included  
Operator error → excluded to analyze  
unavailability according to platforms.

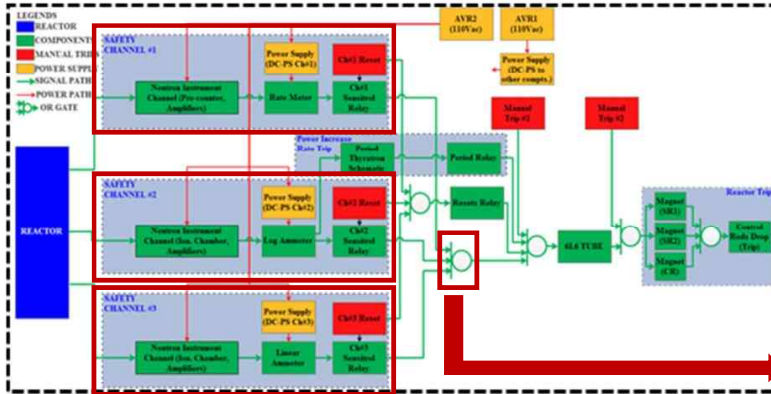
No	Component	Failure Rate
1	Neutron instrument	8.89E-5/h
2	Rate meters	3.00E-6/h
3	Log meters	3.00E-6/h
4	Sensitrol relays (S-relays)	8.30E-6/h
5	Power supply	5.00E-6/h
6	Rectifier	1.14E-5/h
7	Single rod accessories	3.00E-5/d

Failure Data of analog component of ANG-201K

[1] Ibrahim A, Heo G. Safety Improvement for AGN-201K Research Reactor Shutdown System. International HANARO Symposium – Daeseon (Korea) (2019.04)

## System Modeling of RPS of AGN-201K

### SYSTEM MODELING OF RPS



Logic Diagram of shutdown system of AGN-201K

#### Assumption

- The other components excepting "Safety Channel" are same.
- The Safety Channels are to scram logic (1 out of 3 logic)
- Compare unavailability of scram logic.

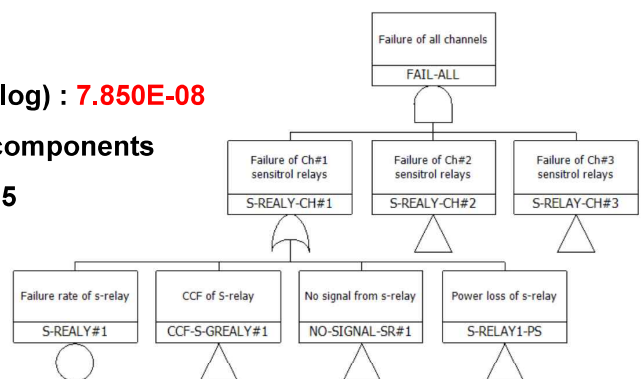
## System Modeling of RPS of AGN-201K

### SYSTEM MODELING OF RPS

#### Unavailability of current system (3 Channels of Analog) : 7.850E-08

- Analysis by FTA with the failure data of analog components
- Using Generic CCF alpha factors from NRC, 2015

Alpha Factor	CCCG=2	CCCG=3	CCCG=4
$\alpha_1$	9.70E-01	9.71E-01	9.73E-01
$\alpha_2$	3.05E-02	1.74E-02	1.27E-02
$\alpha_3$		1.19E-02	8.77E-03
$\alpha_4$			5.47E-03



Fault Tree Model of AGN-201K

(2) Cutset Probabilities of 3 Channels of Analog RPS

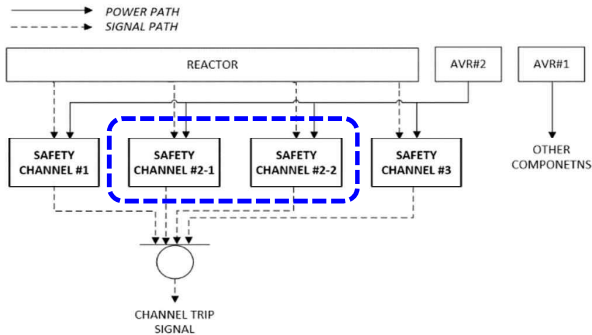
No	Cutset Probability	FV (Fussell-Vesely)	Event Description
1	7.850E-08	99.9997	CCF S-RELAY#1,2,3
2	7.522E-13	0.0010	CCF S-RELAY#1,3 AND S-RELAY#2
3	4.531E-13	0.0006	AVR#1 AND CCF S-RELAY#2,3
4	4.531E-13	0.0006	AVR#1 AND CCF S-RELAY#1,3

Critical basic event : CCF of S-relays

## System Modeling of RPS of AGN-201K

### SYSTEM MODELING OF RPS

- 3 Channels of Analog (current) → 4 Channels of RPS for **balance and redundancy**
  - Trip Signal : 1 out of 3 → 1 out of 4



- Case 1 : Analog of four channels
- Case 2 : PLC
- Case 3 : FPGA
- Case 4 : Digital Hybrid (PLC + FPGA)

## System Modeling of RPS of AGN-201K

### CASE 1 : FOUR CHANNELS OF ANALOG

- Unavailability of 4 Channels : **6.838E-08**
  - Analysis by FTA with the failure data of analog components

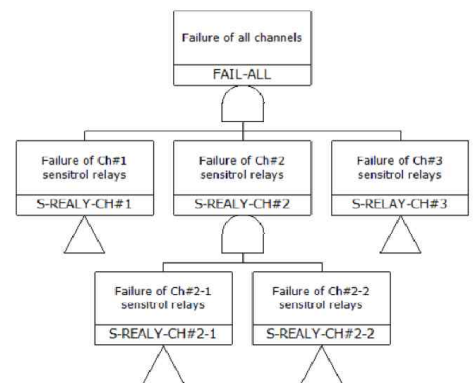
(1) Failure data of Analog components<sup>[1]</sup>

No	Component	Failure Rate
1	Neutron instrument	8.89E-5/h
2	Rate meters	3.00E-6/h
3	Log meters	3.00E-6/h
4	Sensitrol relays (S-relays)	8.30E-6/h
5	Power supply	5.00E-6/h
6	Rectifier	1.14E-5/h
7	Single rod accessories	3.00E-5/d

[1] Ibrahim A, Heo G. Safety Improvement for AGN-201K Research Reactor Shutdown System. International HANARO Symposium – Daejeon (Korea) (2019.04)

(2) Cutset Probabilities of 4 Channels of Analog RPS

No	Cutset Probability	FV (Fussell-Vesely)	Event Description
1	6.838E-08	99.9971	CCF S-RELAY#1,2-1,2-2,3
2	3.033E-13	0.0004	CCF S-RELAY#1,2-2,3 AND S-RELAY#2-1
3	3.033E-13	0.0004	CCF S-RELAY#1,2-1,3 AND S-RELAY#2-2
4	2.646E-13	0.0004	AVR#1 AND CCF S-RELAY#2-2,3



Top-level model of FT for 4 Channels of Analog

Critical basic event : CCF of S-relays



## System Modeling of RPS of AGN-201K

### » CASE 2 : FOUR CHANNELS OF PLC

#### ● Unavailability of 4 Channels : **6.429E-07**

→ Analysis by FTA with the failure data of PLC components

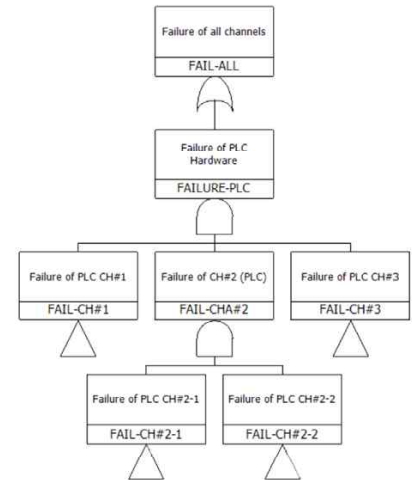
(1) Failure data of PLC components<sup>[2]</sup>

No	Component	Failure Rate [/hr]
1	Base board	0.71E-06
2	Power supply module	5.24E-06
3	Digital input module	0.94E-06
4	Digital output module (TTL)	8.24 E-06
5	Digital output module (relay)	2.12 E-06
6	Analog input module	7.99 E-06
7	Analog output module	8.95 E-06
8	Processor module	11.56 E-06

[2] Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). Reliability Analysis of PLC Safety Equipment, KAERI/CM-933/2005

(2) Cutset Probabilities of 4 Channels of PLC

No	Cutset Probability	FV (Fussell-Vesely)	Event Description
1	4.190E-7	65.17	CCF (4/4)
2	2.239E-7	34.82	CCF (3/4) of CH#1,2-1,2-2
3	4.377E-12	0.0007	Processor failure of CH#1 AND CCF (3/4) of CH#2-1,2-2,3
4	4.377E-12	0.0007	Processor failure of CH#2-1 AND CCF (3/4) of CH#1,2-2,3



Top-level model of FT for 4 Channels of PLC

Critical basic event : CCF of PLC

## System Modeling of RPS of AGN-201K

### » CASE 3 : FOUR CHANNELS OF FPGA

#### ● Unavailability of 4 Channels : **1.188E-07**

→ Analysis by FTA with the failure data of FPGA components

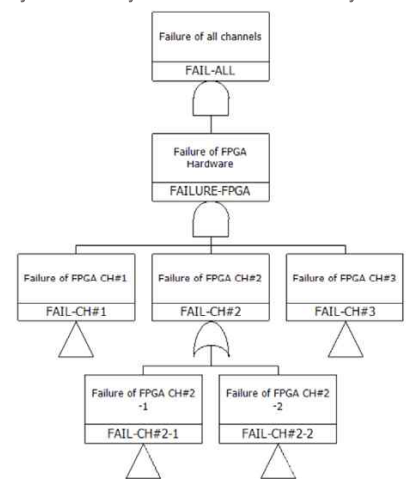
(1) Failure data of FPGA components<sup>[3]</sup>

No	Component	Failure Rate [/hr]
1	FPGA board	2.08E-06
2	Digital input module	1.65E-06
3	Digital output module	2.61E-06
4	Analog input module	4.29E-06
5	Analog output module	3.52E-06

[3] Reliability Analysis of FPGA-based Controller for Applying to Nuclear Instrumentation and Control System. Korea Institute of Electronic Communication Science (KIECS), Vol.9 No.10 (2014)

(2) Cutset Probabilities of 4 Channels of FPGA

No	Cutset Probability	FV (Fussell-Vesely)	Event Description
1	7.740E-08	65.17	CCF (4/4)
2	4.136E-08	34.83	CCF (3/4) of CH#1,2-1,2-2
3	2.550E-13	0.0002	Digital input board of CH#1 AND CCF (3/4) of CH#2-1,2-2,3
4	2.550E-13	0.0002	Digital input board of CH#2-1 AND CCF (3/4) of CH#1,2-2,3



Top-level model of FT for 4 Channels of FPGA

Critical basic event : CCF of FPGA

## System Modeling of RPS of AGN-201K

### » CASE 4 : DIGITAL HYBRID (TWO CHANNELS OF PLC + TWO CHANNELS OF FPGA)

- Unavailability of 4 Channels : **1.012E-12**

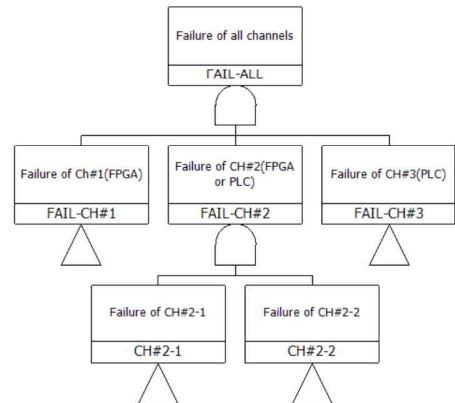
→ Analysis by FTA with the failure data of

PLC and FPGA components

→ No potential CCF between PLC and FPGA

(1) Cutset Probabilities of 4 Channels of Digital Hybrid

No	Cutset Probability	FV (Fussell-Vesely)	Event Description
1	1.008E-12	99.67	CCF of FPGA AND CCF of PLC
2	1.649E-16	0.016	Processor failure of PLC CH#3 AND CH#2-2 AND CCF of FPGA
3	1.300E-16	0.013	Analog output failure of PLC CH#3 AND Processor failure of PLC CH#2-2 AND CCF of FPGA
4	1.300E-16	0.013	Processor failure of PLC CH#3 AND Analog output failure of PLC CH#2-2 AND CCF of FPGA



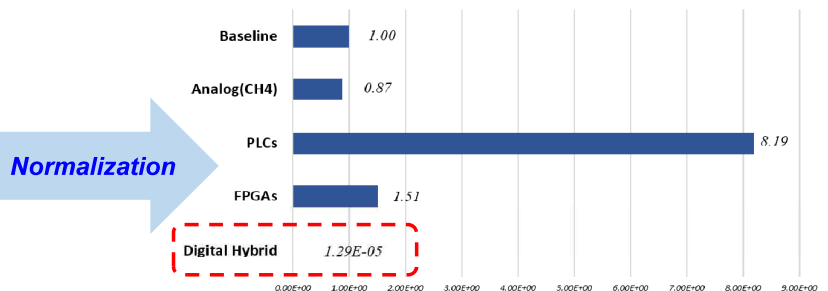
Top-level model of FT for 4 Channels of Digital Hybrid

→ Critical basic event : still CCF of FPGA and PLC each, but cutset probability improved

## Conclusion

### » COMPARING UNAVAILABILITY

No	Model	Unavailability
1	Baseline – Current system (Three channels of Analog)	7.850E-08
2	Four channels of Analog	6.838E-08
3	Four channels of PLCs	6.429E-07
4	Four channels of FPGAs	1.188E-07
5	Digital hybrid (Two channels of PLCs + Two channels of FPGAs)	1.012E-12



- Availability of single digital platform is worse than analog model. If digital platform is considered to use instead of analog, it is necessary to think system availability.

- The availability of Digital Hybrid model could be significantly improved.

⇒ Recommendation : Using two different platforms for safety system

## Conclusion

### >> NEXT ACTIVITIES

- Digital Hybrid model could be considered *economically*
  - The cost if S/W development and V&V would be increased
- Design Gap between two platforms → different timing bounds
- Consider Human errors
- Digital Hybrid model makes *cyber security* enhanced
  - Consider the cyber security of digital hybrid with Software Life Cycle
  - case study : RPS of AGN-201K

***-THE END-***

***Q&A***

Jiye Jeong ([jiye.khu@gmail.com](mailto:jiye.khu@gmail.com)), Gyunyoung Heo ([gheo@khu.ac.kr](mailto:gheo@khu.ac.kr))



---

# 시선엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인 평가를 위한 조사연구

---

이예진

한국원자력연구원

# 시선엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인평가를 위한 조사 연구

• • • •

2020.02.27

사고감시·대처연구실 이예진



## CONTENTS

• • • •

- 01 서론
- 02 엔트로피를 활용한 시선 이동 분석의 연구사례
- 03 시선분석을 위한 엔트로피의 활용 및 특징 분석
- 04 결론

# 01 서론

## 01 서론

시선엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인평가를 위한 조사연구

### » 연구배경 및 목적

- ✓ 시선추적은 인간의 무의식적 반응과 행동을 측정하기 위해 다양한 분야에서 활용되어 있음
- ✓ 시선의 분석을 위하여 응시시간, 최초응시, 응시비율, 응시횟수, 동공크기변화 등의 지표가 대표적이며, 이를 시각화 하는 방법으로는 Gazeplot, Heatmap이 있음
- ✓ Gazeplot과 Heatmap은 시선의 이동특성을 쉽게 파악할 수 있다는 장점을 갖지만, 정량적인 값을 도출해 내지 못하기 때문에 시선 이동의 특성을 비교하기에 어려움이 있음

**∴ 시선분석을 위해 엔트로피를 활용한 다양한 분야에서의 연구사례들을 조사분석함으로써 향후의 활용방안을 모색함**

## 02 엔트로피를 활용한 시선 이동 분석의 연구 사례

## 02 시선엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인평가를 위한 조사연구 엔트로피를 활용한 시선 이동 분석의 연구 사례

### » 연구범위 및 연구방법

- ✓ 구글 스칼라 검색을 통하여 1999년부터 2019년까지 엔트로피를 활용한 시선이동을 분석한 학술지 논문과 학술대회 발표논문 17편을 분석대상으로 함
- ✓ 연구논문의 활용분야는 의료, 영상, 항공, 인지, 디자인, 광고, 교육, 교통, 스포츠의 여러 분야를 포함하고 있음

# 02 시선엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인평가를 위한 조사연구 엔트로피를 활용한 시선 이동 분석의 연구 사례

## 분야별 연구사례

활용분야	연구내용
의료	디스플레이의 효과성 평가, 장애를 가진 그룹의 시선특성분석, 의사들의 전문지식수준평가 등에 시선엔트로피가 활용되고있음
영상	영상기술의 효과에 따라 사용자들의 시선특성을 알아보는데 시선 엔트로피가 활용되고 있음
항공	장주비행(공항 입출항의 비행)시 비행 단계를 시각의 특성에 따라 분류할 수 있을지에 대해 연구와 조종사들이 착륙 시 조종사의 전문지식수준에 따라 시선추적 특성을 비교함으로써 비행안전향상을 위한 비행특성을 시선엔트로피로 분석함
인지특성	장의존도(FDI)로 구별되는 인지 특성과 왜곡된 이미지를 보았을 때의 인지특성 그리고 호기심이 있을 때의 인지특성에 대하여 시선엔트로피가 활용되고 있음
인터페이스	화학 관련 산업의 제어실에서의 HMI에 따른 운전원들의 인지행동을 이해하기 위해 연구와 웹페이지에서 심미성을 정량적으로 측정하기 위해 시선엔트로피가 활용되고 있음

사고감사대처연구실이예진

KAERI 한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

7

활용분야	연구내용
광고	광고를 볼 때 브랜드 로고까지 가는데 소비자들의 시선은 어떠한 특성을 갖는지 알기 위해 시선엔트로피를 활용함
교육	물리학의 문제를 풀 때 세 가지 교육수준의 학생에 따라 어떠한 시각적 특성을 갖는지에 대해 알아보기 위해 시선엔트로피를 활용함
교통	운전 시 불안감이 운전자의 시선특성에 어떠한 변화를 주는지 알아보고자 시선엔트로피를 활용함
스포츠	배드민턴에서 서브 시 숙련자(1년이상 경력)와 비숙련자간(1년 미만의 경력)의 시선 탐색 전략의 차이를 알아보기 위해 시선엔트로피를 활용함

- ✓ 이해 가기 쉽게 설계된 디스플레이, 체계적인 시선 가이드스(Guidance)일수록 전략적인 시선경로값을 가지며 낮은 엔트로피를 나타냄
- ✓ 숙련자일수록 정형화된 시각적 패턴을 보이며 엔트로피가 낮아지는 경향을 보임 (스포츠에선 반대의 결과를 나타냄)
- ✓ 불안감이 증폭될수록 Gazeplot엔트로피가 더 높아지는 결과를 나타냄
- ✓ 심미성이 낮을 수록 Heatmap엔트로피는 낮게 나타남

사고감사대처연구실이예진

KAERI 한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

8



# 03

## 시선 분석을 위한 엔트로피 활용 및 특징분석

### 03 시선 분석을 위한 엔트로피 활용 및 특징분석

#### » 엔트로피를 활용한 Gazeplot의 정량화 방법

##### 1) 샤넌 엔트로피(Shannon entropy)

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

\* $p_i$ : 전체 AOI(Area Of Interest)에 대한 응시(fixation)횟수에 대한  $i$  번째 AOI의 상대적 응시 횟수 비율

\* $n$ : 전체 AOI 개수

- ✓ Gazeplot로부터 구해진 샤넌 엔트로피의 값이 높게 나타난다면 사용자가 그들의 시각적 주의를 AOI들 간에 고르게 주었음을 의미하고, 낮게 나타난다면 특정 AOI에 시선이 집중되었음을 의미할 수 있음 (KREJTZ, Krzysztof et al., 2014)
- ✓ 샤넌 엔트로피는 AOI에 시선이 머문 횟수의 확률로만 계산되기 때문에, AOI간의 시선의 이동패턴은 해석할 수 없다는 단점이 있음

# 03 시선 분석을 위한 엔트로피 활용 및 특징분석

## » 엔트로피를 활용한 Gazeplot의 정량화 방법

### 2) 마코프엔트로피(Markov entropy)

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \sum_{j \neq 1} p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

\* $p_i$ :  $i$  번째 AOI의 초기확률로,  $i$  번째 AOI의 응시횟수를 전체 AOI의 총 응시횟수로 나눈 값

\* $p_{ij}$ :  $i$  번째 AOI에서  $j$  번째 AOI로의 전이확률로,  $i$  번째 AOI에서  $j$  번째 AOI로 이동한 횟수를 전체 AOI간 이동횟수로 나눈 값

- ✓ 마코프체인을 활용한 마코프엔트로피는 시선의 이동 방향에 대한 정보를 포함한다는 장점을 가짐 (Shic at al., 2008)
- ✓ 마코프엔트로피는 각 AOI에 시선이 얼마나 오랫동안 머물렀는지에 대한 정보를 포함하지 못한다는 단점을 가짐 (즉, 1번 AOI에 1초 머물고 2번 AOI에 1초 머문 경우와 1번AOI에 2초 머물고 2번 AOI에서 1초 머문 경우의 엔트로피 값이 동일하게 표현됨)

# 03 시선 분석을 위한 엔트로피 활용 및 특징분석

## » 엔트로피를 활용한 Heatmap의 정량화 방법

### 1) Heatmap을 형성하는 연속확률분포 식

$$f_{XY}(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp - \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}$$

\* $\sigma$ : 시각(Visual Angle)을 의미하며, 사용자가 화면을 볼 때 인지할 수 있는 픽셀의 범위를 의미함

\* $p_{ij}$ :  $i$  번째 AOI에서  $j$  번째 AOI로의 전이확률로,  $i$  번째 AOI에서  $j$  번째 AOI로 이동한 횟수를 전체 AOI간 이동횟수로 나눈 값

- ✓ 시선이 가장 오래 머문 지점으로부터 적게 머문 지점까지 가우시안분포(Gaussian Distribution)의 형태를 갖고 있기 때문에 일반적으로 엔트로피를 계산하기 위해 가우시안분포를 활용함
- ✓ 화면의 픽셀이 1280\*800의 해상도를 갖는다면 총1280개의 x좌표와 800개의 y좌표로 이루어진 좌표의 조합을 만들 수 있음

# 03 시선 엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인평가를 위한 조사연구

## 시선 분석을 위한 엔트로피 활용 및 특징분석

### » 엔트로피를 활용한 Heatmap의 정량화 방법

2) Heatmap을 형성하는 결합확률분포 식 (한 화면에 Heatmap을 형성하는 여러 연속확률분포가 있을 경우)

$$\tilde{f}_{XY}(x,y) = \sum_1^{f_{num}} d \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}}$$

\*d: 응시시간(fixation duration)을 의미하며 응시시간에 따라 그 분포의 높이가 모두 다르므로 가중치가 다르게 부여됨

3) Heatmap엔트로피

$$H = - \sum_{xy} \tilde{f}_{XY}(x,y) \log \tilde{f}_{XY}(x,y)$$

# 03 시선 엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인평가를 위한 조사연구

## 시선 분석을 위한 엔트로피 활용 및 특징분석

### » 엔트로피를 활용한 Heatmap의 정량화 방법

2) Heatmap을 형성하는 결합확률분포 식 (한 화면에 Heatmap을 형성하는 여러 연속확률분포가 있을 경우)

$$\tilde{f}_{XY}(x,y) = \sum_1^{f_{num}} d \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}}$$

\*d: 응시시간(fixation duration)을 의미하며 응시시간에 따라 그 분포의 높이가 모두 다르므로 가중치가 다르게 부여됨

3) Heatmap엔트로피

$$H = - \sum_{xy} \tilde{f}_{XY}(x,y) \log \tilde{f}_{XY}(x,y)$$



## 시선 분석을 위한 엔트로피 활용 및 특징분석

### » Gazeplot엔트로피와 Heatmap엔트로피 특성 비교

- ✓ 샤넨엔트로피는 AOI간 시선 비율이 같게 분포될수록 커지기때문에 얼마나 각각의 요소들에 시선이 균등하게 분포되었는지 측정이 가능함. 따라서 관심정도, 호기심정도, 화면 디자인요소의 주의를 끄는 정도 등의 측정에 적합함. 하지만 정확하게 어느 지점을 보는지에 의의를 두기보단 범위가 있는 특정 영역을 지정 후 그 응시 빈도수의 비율에 관한 엔트로피임으로, 한 화면내 같은 수준의 다른 디자인요소를 비교하고자 할 때, 유용한 측정 지표라 말할 수 있음
- ✓ 마코프엔트로피는 AOI간 시선비율이 같게 분포되었더라도 본 순서에 따라서 엔트로피값이 달라짐. AOI간 무작위로 시선이 더 많이 이동했을 경우 높은 엔트로피값을 갖기 때문에 시선의 패턴을 측정이 가능함. 따라서 시선의 분산정도의 측정에 적합함
- ✓ Heatmap엔트로피는 순서에 대한 정보는 알 수 없으나 관심정도(interest)를 측정하기에 적합함. 또한 화면의 중앙으로 부터 시선의 분포에 대한 엔트로피의 측정에 적합함

## 04 결론

## 04 결론

시선엔트로피를 활용한 인터페이스 디자인평가를 위한 조사연구

- ✓ Gazeplot 엔트로피는 숙련자와 비숙련자의 시선패턴의 차이가 있는지에 대한 분석에 활용 가능함
- ✓ Gazeplot 엔트로피는 화면 디자인에 대한 패턴분석비교에 활용에서도 유용함

➔ 본 연구결과는 인터페이스 디자인의 적합성평가에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되기 때문에 향후 원자력분야의 화면설계 적합성평가에 활용할 계획임

THANK YOU

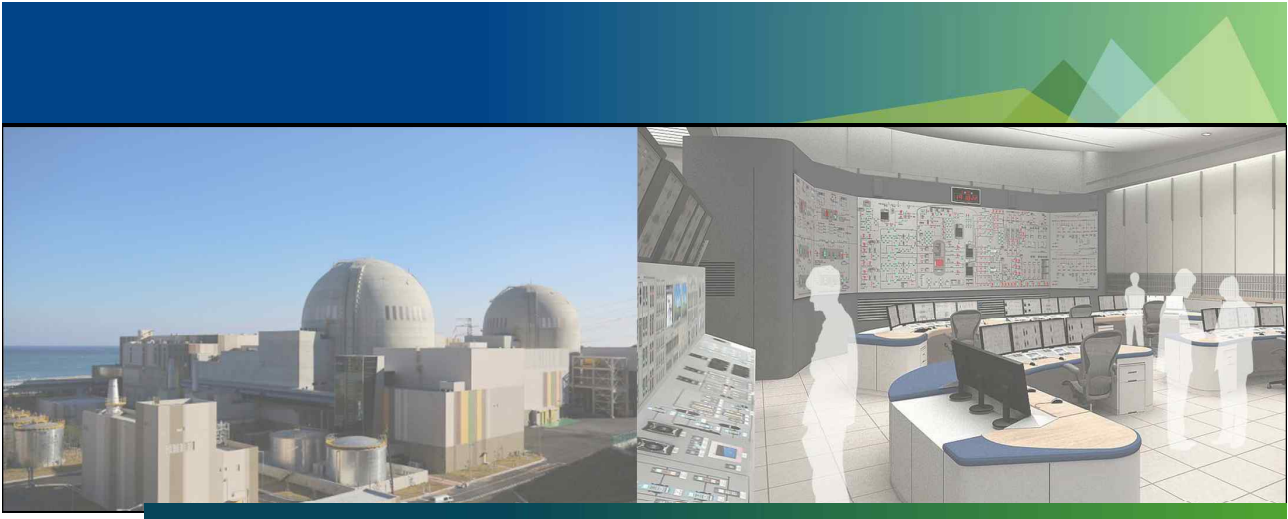
---

# Autonomous Algorithm for Bubble Creation Operation in Pressurizer by Deep Reinforcement Learning

---

이대일

조선대학교



## ... Autonomous Algorithm for Bubble Creation Operation in Pressurizer by Deep Reinforcement Learning ...

**Daeil Lee**

Human Engineering and Risk Analysis (HERA) Lab.

Department of Nuclear Engineering

Chosun University

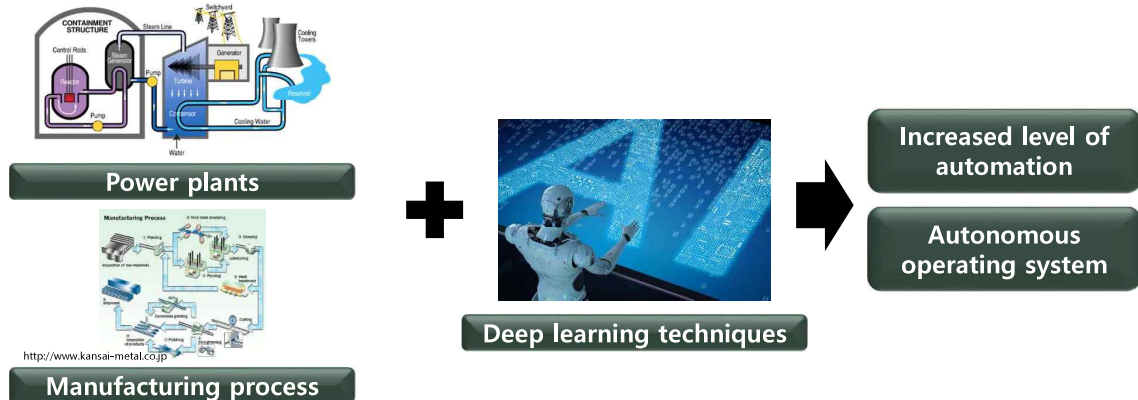
## Contents

1. Introduction
2. Task analysis of bubble creation operation
3. Development of deep reinforcement learning-based algorithm
4. Experiments
5. Conclusion

# 1. Introduction

## ❖ Autonomous operating system

- Autonomous operating system can **manage the overall system without the intervention of a human** [1].
- Complex system has a high-level of automation** to manage entire system [2].
- Deep learning techniques**, a kind of artificial intelligence (AI) method, is one of the recent research trends to develop a high-level of automation for an autonomous operating system.



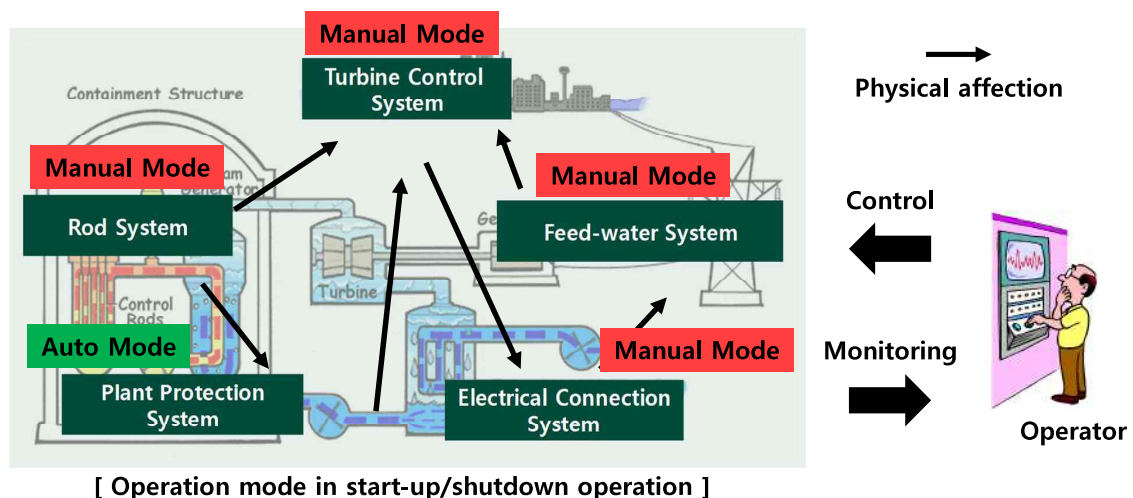
[1] Basher, H, and JS Neal. (2003). Autonomous Control of Nuclear Power Plants: Citeseer.

[2] Berkan, RC, BR Upadhyaya, LH Tsoukalas, RA Kisner, and RL Bywater. (1991). "Advanced automation concepts for large-scale systems." IEEE Control Systems no. 11 (6):4-12.

## 1.1 Motivation

### ❖ Level of automation in the nuclear power plant

- Nuclear power plant (NPP)**, a kind of a complex system, is operated by **highly automated controllers** to increase availability, reduce accident risk, and decrease operating costs [3].
  - However, start-up and shutdown operations still **require the operator's manual control** because it is **difficult for traditional control** theories to perform those operations thoroughly.



[ Operation mode in start-up/shutdown operation ]

[3] Basher, H, and JS Neal. (2003). Autonomous Control of Nuclear Power Plants: Citeseer.

## 1.2 Objective of this study

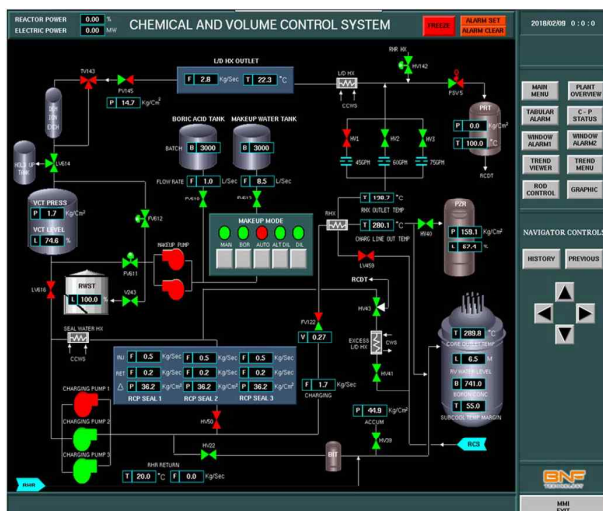
### ❖ Development of deep reinforcement learning-based algorithm for bubble creation operation in pressurizer

- Analyzing task for bubble creation operation using general operating procedures (GOPs)
  1. Identifying operational goals and manual control
  2. Defining inputs and outputs parameter required to perform operation steps in GOPs
  3. Simplifying operations steps and components to define problem domain and to develop an bubble creation operation algorithm
- Developing the bubble creation operation algorithm based on deep reinforcement learning (DRL)
  1. Developing an algorithm based on task analysis of GOPs
  2. Designing an agent's network and an reward logic for training the agent
    - Network – Long short-term memory (LSTM) network
    - Training method - Asynchronous advantage actor-critic (A3C) algorithm

## 1.3 Test-bed plant

### ❖ Compact Nuclear Simulator (CNS)

- Training and validating the developed algorithm using a compact nuclear simulator (CNS) as a real-time test bed
  - Utilizing CNS originally developed by the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) with a reference of a Westinghouse 900 MWe, three-loop pressurized water reactor (PWR)



[Chemical and Volume Control System (CVCS) in the CNS ]

Reference plant	Westinghouse PWR
Electrical output	900 MWe (100% Power)
NSSS Power, megawatt thermal	2800 MWth
RCS Pressure	160Kg/cm <sup>2</sup>
Loop	3 loop
Hot leg / Cold leg Temp	325°C / 290°C
RCS Average Temp	308°C
S/G Average Pressure	64.4Kg/cm <sup>2</sup>



## 2. Task analysis of bubble creation operation

### ❖ Overview of bubble creation operation

#### ■ Operation scope

- Included in the cold shutdown to hot shutdown ( $T_{avg} < 176.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $K_{eff} < 0.99$ ) condition
- Taking 12 hours in actual NPPs

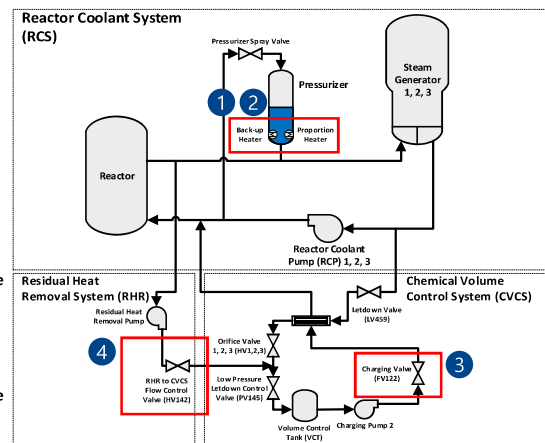
#### ■ Goal

- Heating up the plant using heaters (e.g., Back-up heater, proportional heater)
- Maintaining reactor coolant pressure in desired operation range
- Decreasing pressurizer level

Major parameter	Initial condition	Final condition
Pressurizer pressure	25 kg/cm <sup>2</sup>	25 kg/cm <sup>2</sup>
Pressurizer temperature	68 °C	194 °C
Average temperature	58 °C	83 °C
Pressurizer level	100 %	80 %
Back-up heater	Off	On
Proportional heater	0 %	100 %

[ Initial and final condition of the bubble creation operation ]

1. Back-up heater  
- Heating up pressurizer temperature
2. Proportional heater  
- Heating up pressurizer temperature
3. FV122 (Charging Valve)  
- Supplying coolant CVCS to RCS  
- Maintaining RCS pressure
4. HV142 (RHR to CVCS Flow Control Valve)  
- Supplying coolant RHR to CVCS  
- Maintaining RCS pressure



[ Simplified schematic of related components ]

## 2.1 Identifying operational tasks

### ❖ Task analysis using GOPs

- Analyzing by step number, task, and task type through GOPs
- Classifying task type as check or control
  - Control – Performing action(s) on the component
  - Check – Checking or monitoring plant state without action(s)

Step Number	Task	Task Type
1	• The reactor coolant loops and the pressurizer are filled and vented.	Check
2	• Letdown is established via the RHR letdown line, and three-letdown orifice isolation valves (HV1, HV2, and HV3) are open.	Check
3	• Pressurizer spray control valve, power-operated relief valve (PORV) and PORV block valve are in manual and closed modes	Check
4	• Slowly increase the RCS pressure up to the 20kg/cm <sup>2</sup> ~ 30kg/cm <sup>2</sup> range by adjusting HV142 (RHR to CVCS flow control valve) and FV122 (Charging flow control valve).	Control
5	• Maintain the flow through the bypass valve of RHR heat exchanger.	Check
6	• Check PORV position whether close or open. If PORV position is open, close PORV.	Check
7	• If PORV block valves are in man mode, put the associated PORV block valves to auto mode.	Check
8	• Energize all pressurizer heater groups and start increasing the pressurizer temperature.	Control
...	...	...

[ Task analysis result for bubble creation in a pressurizer ]

## 2.1 Identifying operational tasks

### ❖ Simplification of operational tasks and components

- **Classifying into discrete or continuous controls**
  - Discrete control – Two distinguished states (e.g., "On or Off", "Fully open or Closed")
    - Providing specific instructions on the control target in GOP
  - Continuous control – Adjustable states (e.g., valve position)
    - Providing only target value without specific guidelines
- **Defining input/output values to design the deep reinforcement learning-based algorithm**

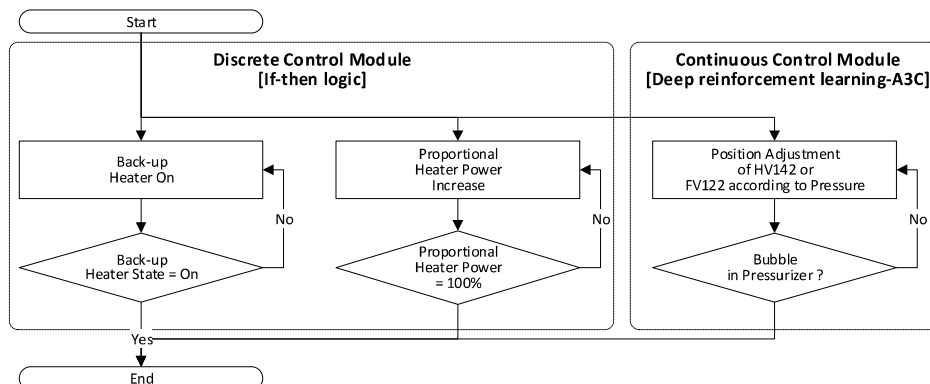
Task	Input	Output	Control Type	Constraints
• Put back-up heater from Off to ON.	• Back-up heater state	• Back-up heater control	• Discrete control	• Maintain RCS pressure between 20kg/cm <sup>2</sup> and 30kg/cm <sup>2</sup> .
• Increase the power of proportional heater from 0% to 100%.	• Proportional heater state	• Proportional heater control		
• Adjust HV142 (RHR to CVCS flow control valve) within the RCS pressure boundary.	• RCS pressure • HV142 position	• HV142 control	• Continuous control	
• Adjust FV122 (Charging flow control valve) within the RCS pressure boundary.	• RCS pressure • FV122 position	• FV122 control		

[ Simplified operational task for creating a bubble in the pressurizer ]

## 3. Development of DRL-based algorithm

### ❖ DRL-based algorithm for bubble creation operation

- **Developing bubble creation operation algorithm using the analyzed operational tasks**
  - **Discrete control module**
    - Applying If-then logic to perform clear rules that is derived from GOP
    - Required Components: Back-up heater, Proportional heater
  - **Continuous control module**
    - Applying If-then logic to perform clear rules that is derived from GOP
    - Required Components: HV142 valve, FV122 valve



[Overview of DRL-based algorithm for creating bubbles inside pressurizer ]



## 3.1 Discrete control module

### ❖ Development of If-then logic for heater operation

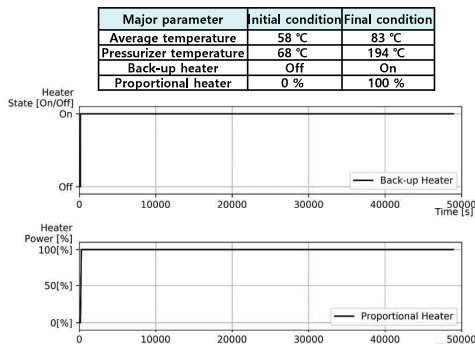
#### ■ Method

- Applying the if-then logic to controlling the back-up and proportional heaters

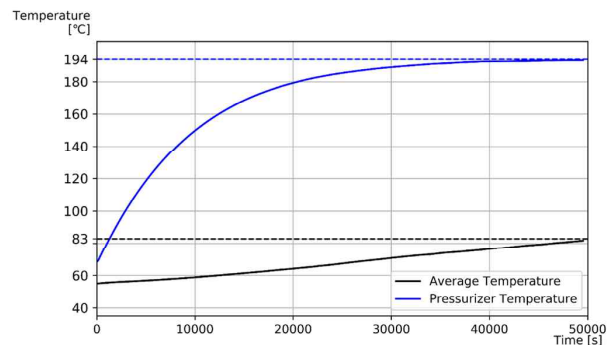
Rule number	Rule
1	If the back-up heater's state is "Off," push "On" button.
2	If the proportional heater power is 0% or below 100%, increase the power to 100%.

#### ■ Validation

- Starting back-up/proportional heaters according to if-then logic
- Increasing average/pressurizer temperature due to heater start



[ Change of state in back-up and proportional heaters ]



[ Trend of average/pressurizer temperature ]

## 3.2 Continuous control module

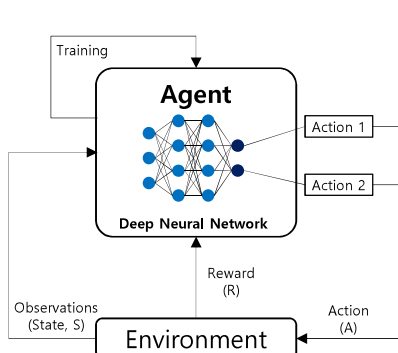
### ❖ Modeling A3C (Asynchronous Advantage Actor-Critic) agent

#### ■ Purpose

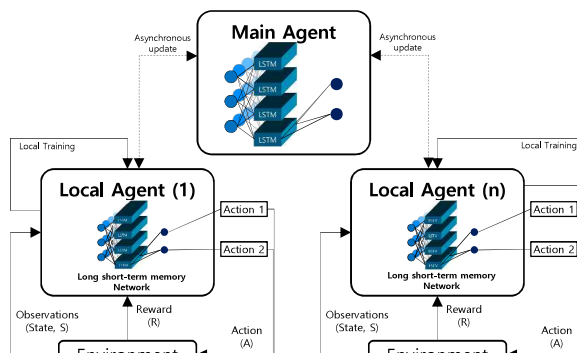
- Applying A3C agent as DRL-based algorithm for adjusting HV142 and FV122 valves
- Maintaining reactor coolant pressure in desired operation range using HV142/FV122 valves

#### ■ A3C agent

- Using A3C training algorithm that is one of the deep reinforcement learning (DRL) methods
  - Combined method with a reinforcement learning algorithm and deep neural network
- Reducing training time by utilizing multi-agents with multiple simulations
- Applying long short-term memory (LSTM) network to handle time series data



[ Training architecture of deep reinforcement learning ]

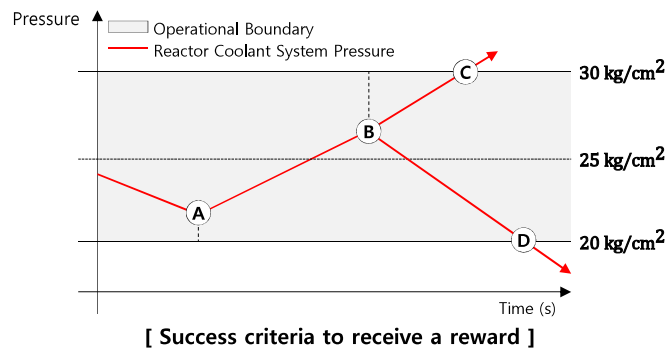


[ Training architecture of A3C with LSTM ]

## 3.2.1 Modeling A3C agent

### ❖ Reward design for training A3C agent

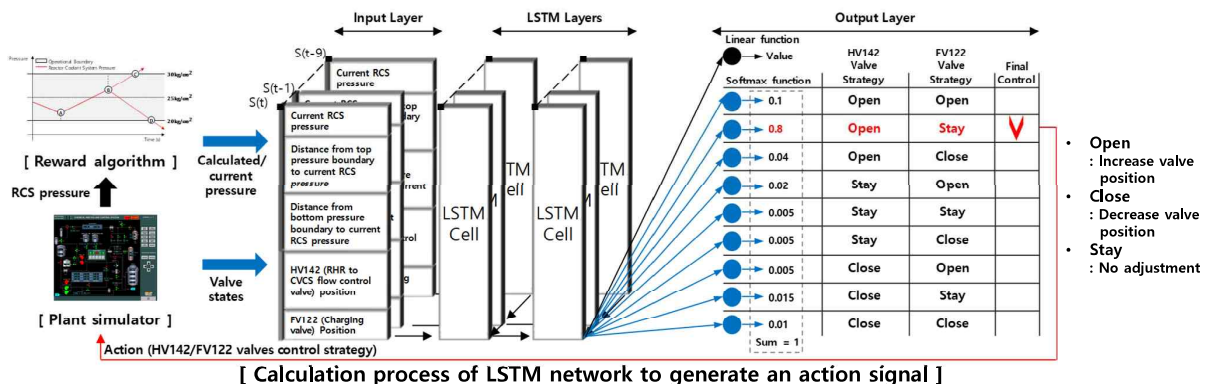
- **Purpose**
  - Defining the training direction for A3C agent in environment
  - Providing ways to maximize accumulated reward and to achieve operational goals
- **Success criteria to receive a reward**
  - Giving the reward to A3C agent when A3C agent is operating within RCS pressurize boundary (Point A, B)
- **Terminated condition**
  - Decreasing pressurizer level to 80% from 100%
  - Going out operational boundary (Point C, D)



## 3.2.1 Modeling A3C agent

### ❖ Modeling LSTM(Long short-term memory) Network

- Performing continuous control tasks considering the plant parameters and calculated values from the reward algorithm
- **Structure**
  - Defining the size of input/output layers according to the number of plant parameters and calculated values
    - Input layer (5 input variables, 10 time window), Output layer (9 output actions)
  - Utilizing LSTM cells to handle time series data
    - Optimized number of LSTM layers through experimental evaluation



## 4. Experiments

### ❖ Training and stability

#### ■ Training environment

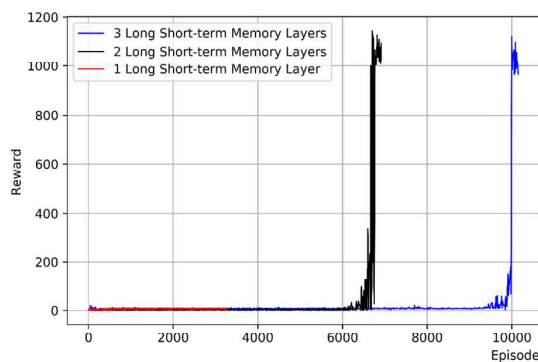
- Training A3C agents on a multi training environment by using 20 compact nuclear simulators

#### ■ Evaluation variables

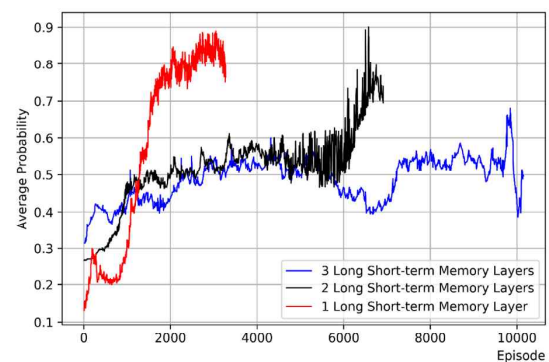
- Reward – Showing accumulated reward during one episode
- Average max probability – Representing average probability of selected action until end of episode

#### ■ Criteria of successful training

1. Achieving over 1000 score of accumulated reward during one episode
2. Increased and stabilized the value of average max probability



[ Accumulated reward per episode ]

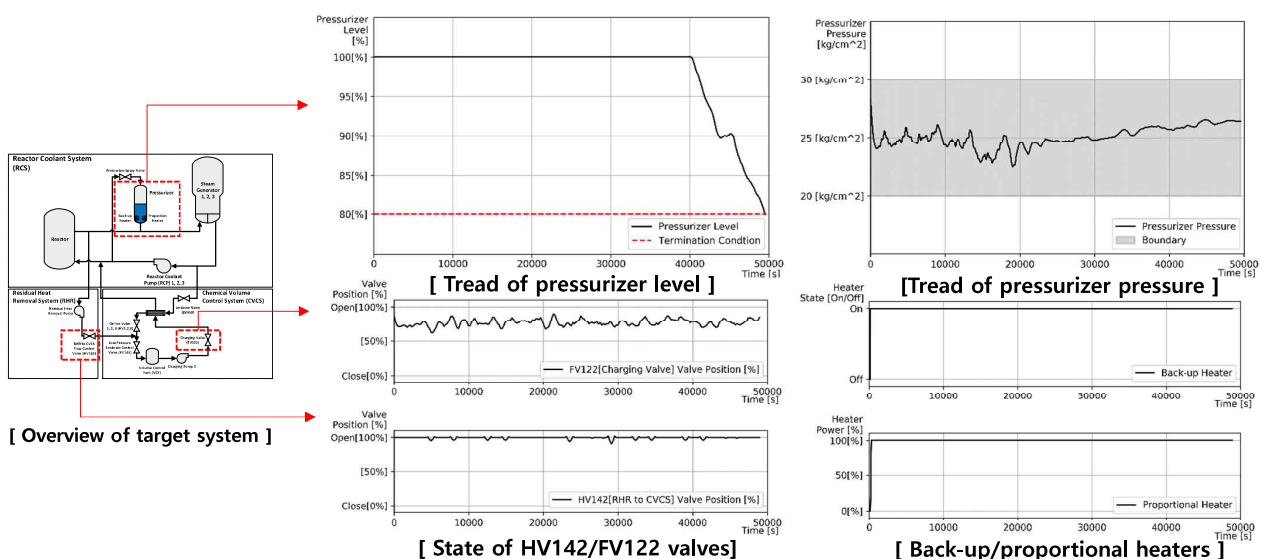


[Average max probability per episode ]

## 4.1 Experimental results

### ❖ Experimental results of developed algorithm

- Heating up coolant inside pressurizer by utilizing back-up/proportional heaters
- Managing pressurizer pressure (RCS pressure) within operational boundary by adjusting HV142/FV122 valves
- Creating bubbles inside the pressurizer and decreasing pressurizer level to 80% from 100%

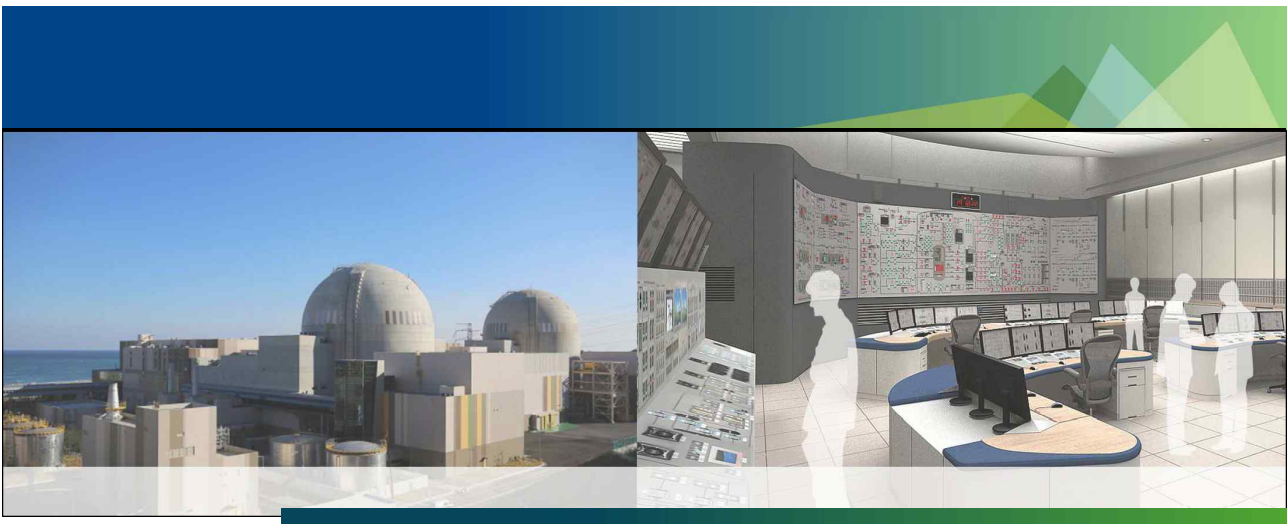


[ Back-up/proportional heaters ]

## 5. Conclusion

### ❖ Development of DRL-based algorithm for bubble creation operation

- Analyzing operational task for bubble creation operation using GOPs
- Identifying operational goals and simplifying operational steps to define input/output parameters for bubble creation operation algorithm
- Developing the bubble creation operation algorithm by using A3C agent and if-then logic
- Designing an agent's network and an reward logic for training the A3C agent
- Proving that the developed algorithm can create bubbles inside the pressurizer



# Thank you for listening !!

---

Development of interacting multiple model using  
wall temperature and radiation distribution outside  
of reactor vessel for classification and  
identification of sequence of events of severe  
accidents in nuclear power plants

---

김정택

한국원자력연구원

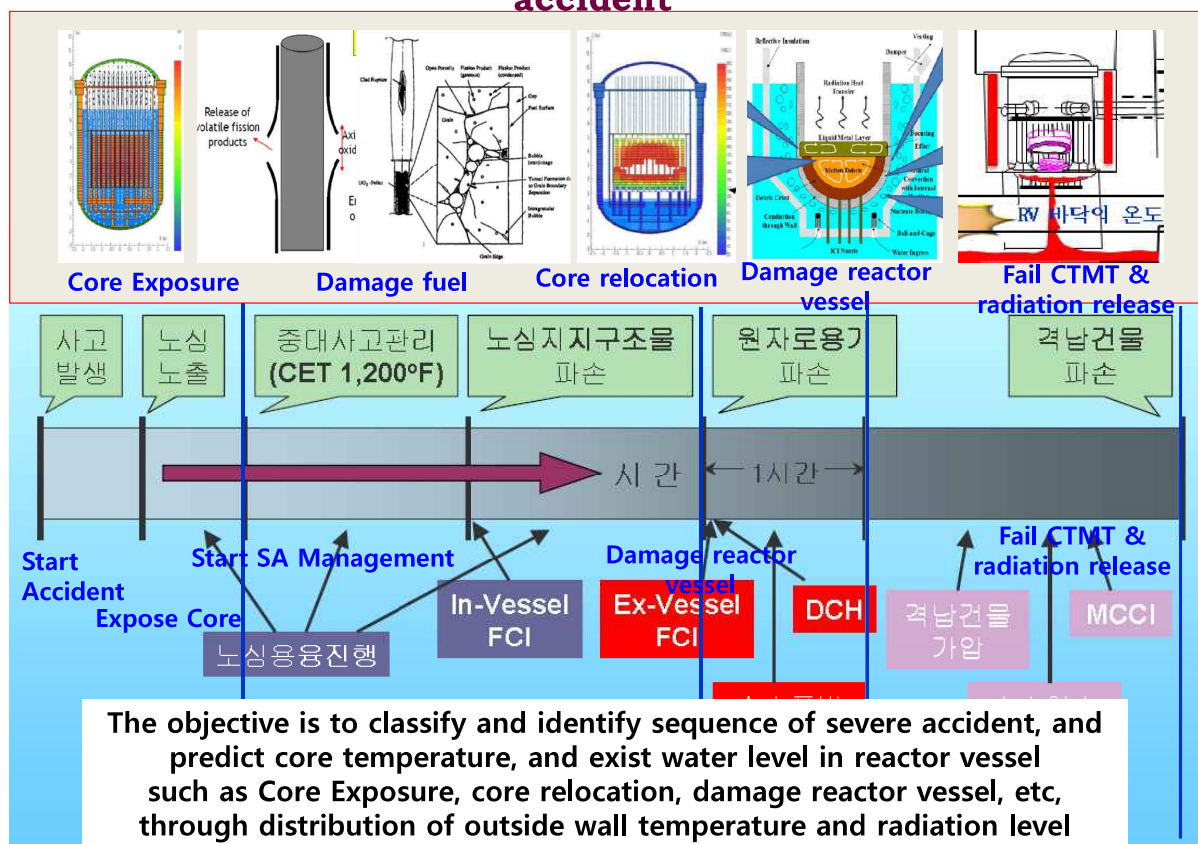
# Development of interacting multiple model using wall temperature outside of reactor vessel for classification and identification of sequence of events of severe accidents in nuclear power plants

(원자로 벽면 온도분포를 이용한 중대사고 노심상태 실시간 감시알고리즘 개발)

2020. 02. 27

Kim, Jung Taek, Kyung Youn Kim and Anil Kumar  
Research Department of Autonomous Operation  
Korea Atomic Energy Research Institute  
Jeju National University

개발 목표 : **Monitoring & identification of sequence of severe accident**



# Models for Temperature estimation

## State Space Model for temperature

$$\bar{T}_k = F_{k-1} \bar{T}_{k-1} + B_{k-1} w_{k-1}$$

$$T_k^M = H_k \bar{T}_k + v_k$$

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} T \\ T' \\ T'' \end{bmatrix}$$

State vector comprising of Temperature, rate of temperature, and second derivative of temperature

$T^M$  = Measured temperature from sensor

$F$  = State transition matrix,  $B$  = Input matrix,  $H$  = Measurement matrix

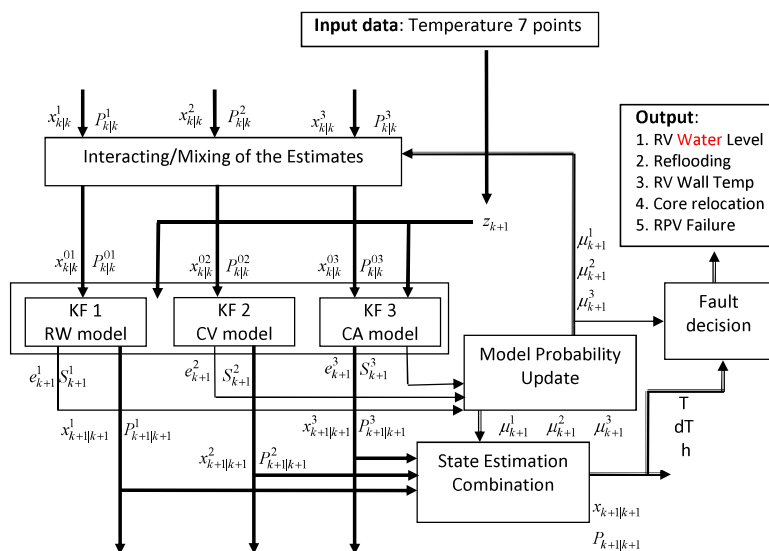
$\delta T$  = sampling time interval between two measurements

## Models for Temperature estimation (Three parallel Kalman Filters)

- **MODEL1** ==> Random walk model : Time T에 대한 온도 변화  
 $F=[1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0]$ ,  $B=[0 \ 0 \ 0]$ ,  $H=[1 \ 0 \ 0]$
- **MODEL2** ==> Constant Velocity (second order model) : 온도 변화 속도  
 $F=[1 \ \delta T \ 0; 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0]$ ,  $B=[\delta T^2/2 \ \delta T \ 0]$ ,  $H=[1 \ 0 \ 0]$
- **MODEL3** ==> Constant Acceleration (third order model) : 온도 변화 가속도  
 $F=[1 \ \delta T \ \delta T^2/2; 0 \ 1 \ \delta T; 0 \ 0 \ 1]$ ,  $B=[\delta T^2/2 \ \delta T \ 1]$ ,  $H=[1 \ 0 \ 0]$

## Application Plant for Prototype development of Modified IMM based-FDD (MIMM\_FDD) Algorithm

Input Point : Wall temperature 7Point



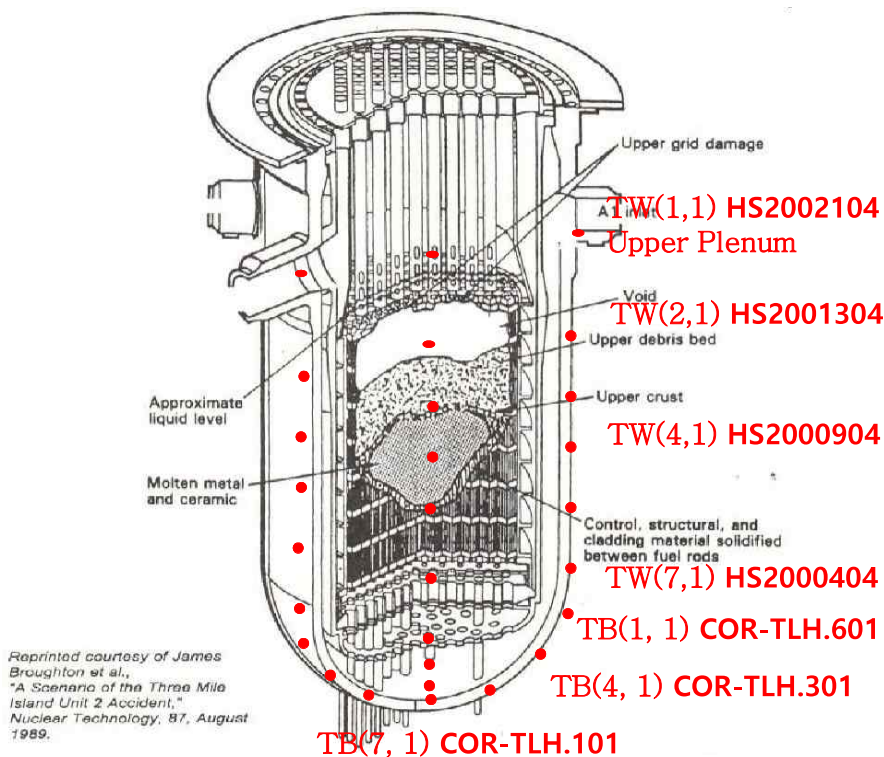
- Input Point  
 Wall temperature 4(1+3)(Vertical 4 Point, Lower hemisphere 3 Point)
  - RX Vessel Upper Plenum 1 Point (TW(1,1) HS20021)
  - RX Vessel Core Wall 3 Point (TW(2,1) HS20013), (TW(4,1) HS20009), (TW(7,1) HS20004))
  - Bottom hemisphere 3 Point (TB(1,1) COR-TLH.601), (TB(4,1) COR-TLH.301), (TB(7,1) COR-TLH.101)

- Out Point 5 State Prediction
  - RV Level and Reflooding
  - Dryout of Core
  - Temperature of core
  - RV Temp Wall temperature
  - Core relocation
  - RPV Failure

Out Point : 5 State Prediction



## Data point of wall temperature (외벽 온도 신호)



Provide simulation data of Wall temperature

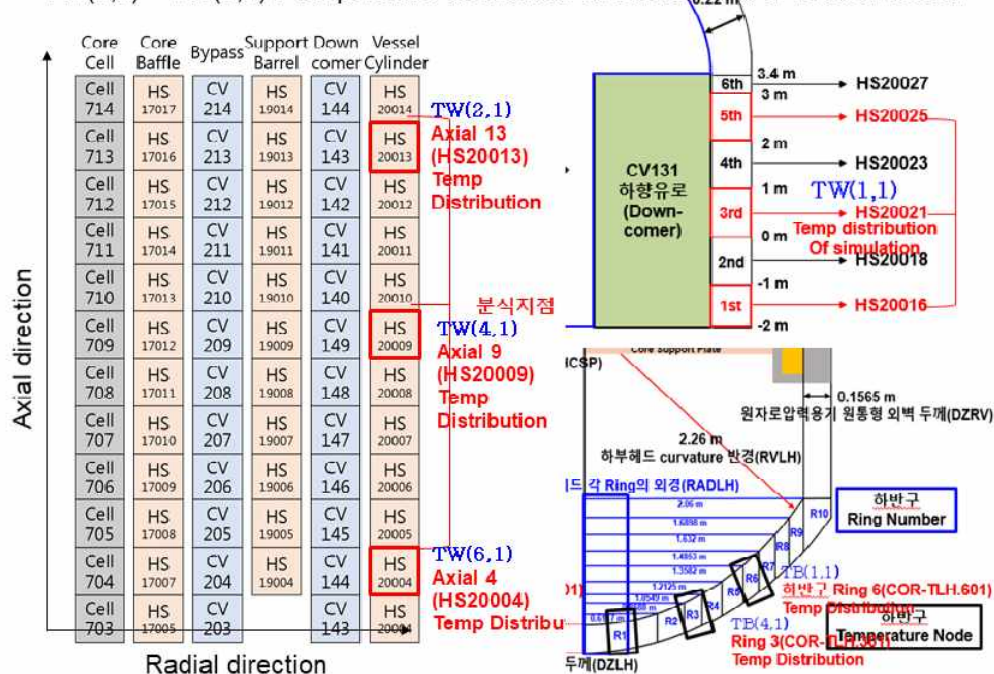
- RX Vessel Upper Plenum 1 Point  
(TW(1,1) HS20021)
- RX Vessel Core Wall 3 Point  
(TW(2,1) HS20013),  
(TW(4,1) HS20009),  
(TW(7,1) HS20004))
- Bottom hemisphere 3 Point  
(TB(1,1) COR-TLH.601),  
(TB(4,1) COR-TLH.301),  
(TB(7,1) COR-TLH.101)

SA Scenarios for Wall Temp Distribution

- SBO with basecase, 4<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup>, 13<sup>th</sup> Reflooding cases
- TLOFW with basecase, 4<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup>, 13<sup>th</sup> Reflooding cases
- SBLOCA with basecase, 4<sup>th</sup>, 9<sup>th</sup>, 13<sup>th</sup> Reflooding cases
- MBLOCA
- LBLOCA

## Data Modeling of wall temperature (외벽 온도 신호)

TW(2,n) ~ TW(2,7) : Temperature distribution of outside Wall of reactor vessel



Nodalization for calculation of temperature distribution of inside and outside core, and wall of reactor pressure vessel(RPV) cylinder and lower header in MELCOR code.



# Sequence of events of severe accidents scenario, SBO, TLOFW and LOCA for Data Modeling of wall temperature Estimation

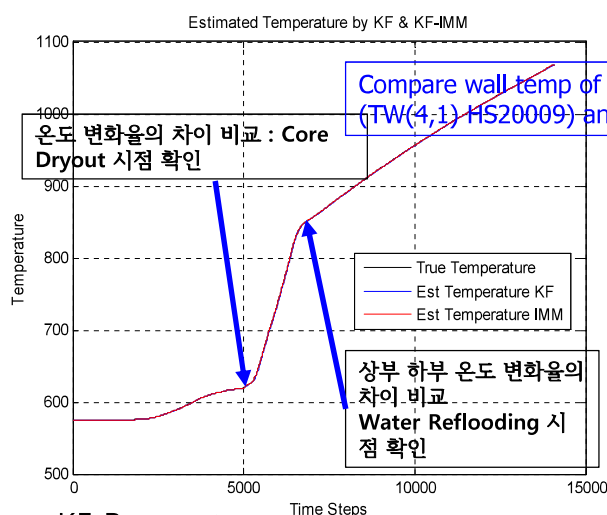
Sequence of events	Value of actuation	Time [s]				
		SBO	TLOFW	SBLOCA	MBLOCA	LBLOCA
RX Trip	RX Trip signal	0	0.01 (28s)	0.04 (148s)	0.01 (18s)	0 (6s)
Trip of RCP	Loss of electric power	0		1.57 (5,659s)		
Dryout of One SG	Mass of H <sub>2</sub> O < 1,000kg	0.95 (3,405s)	0.25 (908s)	3.51 (12,650s)		
Dryout of two SG	Mass of H <sub>2</sub> O < 1,000kg	1.04 (3,731s)	0.25 (900s)			
oxidation of fuel cladding	1,100K	2.59 (9,323s)	1.40 (5,025s)	1.57 (5,659s)	0.99 (3,577s)	0.70 (2,520s)
Dryout of core water level	Water level < -6.09m	2.97 (10,697s)	1.83 (6,599s)	1.95 (7,037s)	2.67 (9,620s)	0.99 (3,565s)
Melting fuel cladding	2,100K	3.20 (11,522s)	1.80 (6,466s)	1.85 (6,651s)	2.39 (8,591s)	0.89 (3,195s)
Melting fuel and core	2,800K	3.22 (11,580s)	1.84 (6,625s)	1.89 (6,788s)	2.44 (8,784s)	0.94 (3,385s)
Relocation of melting fuel and core	Mass of Relocation Fuel > 0.1kg	3.24 (11,650s)	1.95 (7,013s)	2.04 (7,338s)	2.79 (10,053s)	1.49 (5,352s)
Failure of RPV	Temp of penetration pipe > 1,273K	6.77 (24,358s)	4.90 (17,647s)	12.95 (46,632s)	4.07 (14,656s)	2.72 (9,787s)
Injection from SIT	Pressure of RV < 4.3 MPa	6.83 (24,575s)	4.96 (17,868s)	2.61 (9,392s)	0.28 (1,017s)	0.08 (287s)
Exhaustion of SIT	Level of SIT < 6.21m	7.11 (25,596s)	5.25 (18,889s)	12.99 (46,770s)	1.30 (4,697s)	0.22 (777s)
Additional Reflooding	13 <sup>th</sup> Reflooding	6,086 sec	3,601 sec	4,794 sec		
	9 <sup>th</sup> Reflooding	8,003 sec	4,301 sec	5,758 sec		
	4 <sup>th</sup> Reflooding	11,380 sec	7,427 sec	7,204 sec		

## SBO

CASE 1 HS-TEMP.2002104 : 상부

Noise: random noise with S.D of 0.1

MODEL2 => Constant Velocity (second order model) : Rate of Temperature(DT)

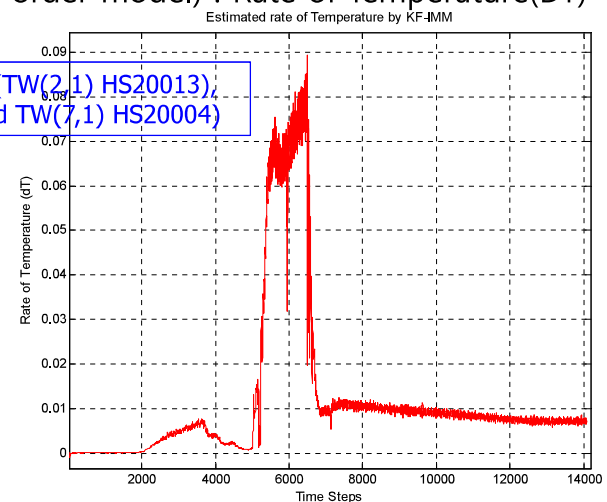


KF Parameters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 1e-8

Error Covariance = 100\*eye(3);



IMM Paramters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 1e-1;

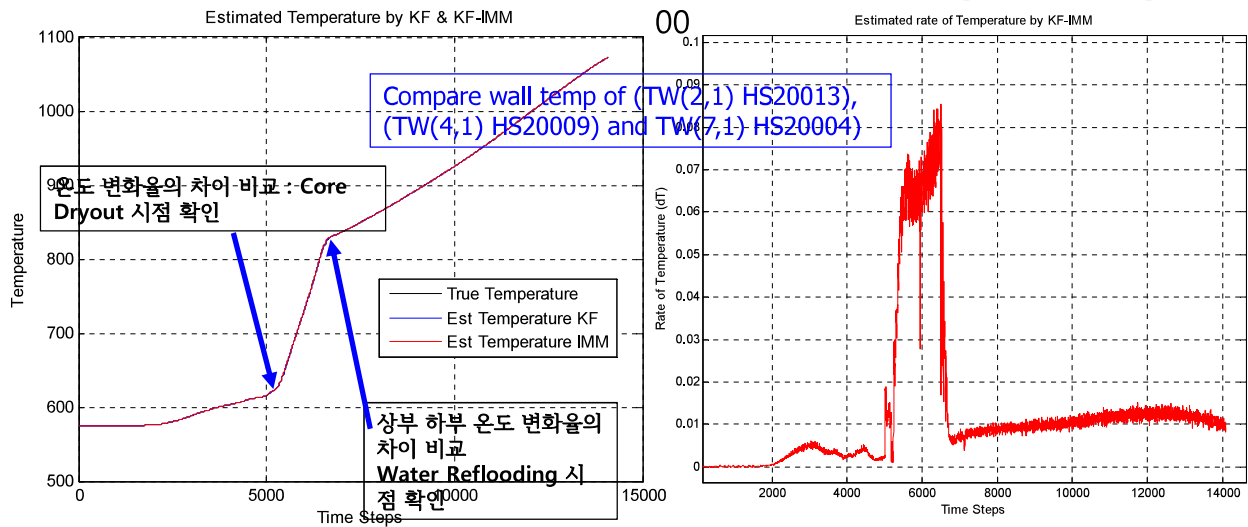
Error Covariance = 100\*eye(3);

Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with 0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

## CASE 3 HS-TEMP.2000904 노심 중부 SBO

Noise: random noise with S.D of 0.1

Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]; MC=1$



KF Parameters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 5e-9;

Error Covariance = 100\*eye(3);

IMM Paramters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 7e-2;

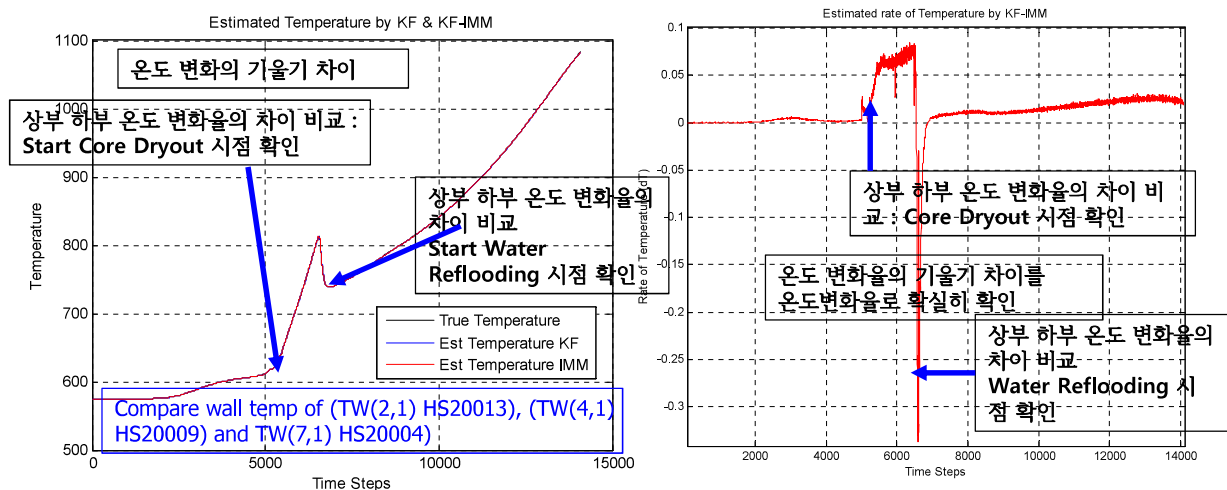
Error Covariance = 100\*eye(3);

Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with 0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

## CASE 4 HS-TEMP.2000404 : 노심하부 SBO

Noise: random noise with S.D of 0.1

MODEL2 => Constant Velocity (second order model) : Rate of Temperature(DT)



KF Parameters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 1e-9;

Error Covariance = 100\*eye(3);

IMM Paramters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 5e-2;

Error Covariance = 100\*eye(3);

Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with 0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

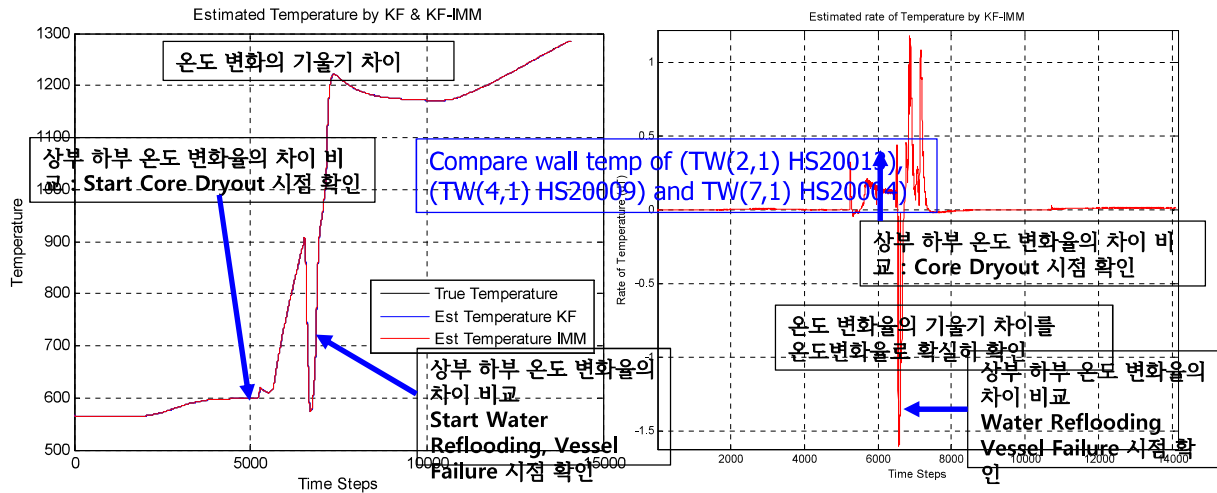
# SBO

CASE 5 COR-TLH.601 : 하반구 상부

Noise: random noise with S.D of 0.1

MODEL2 => Constant Velocity (second order model) : Rate of Temperature(DT)

Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]; MC=100$



KF Parameters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 1e-10;

Error Covariance = 100\*eye(3);

IMM Parameters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 2e-2;

Error Covariance = 100\*eye(3);

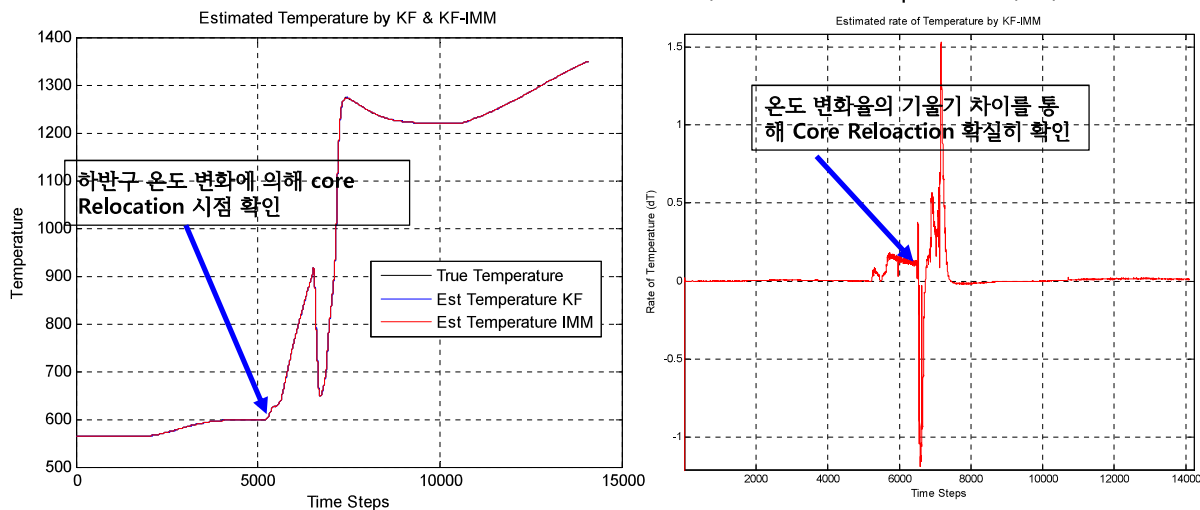
Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with 0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

# SBO

CASE 6 COR-TLH.301 하반구중간

Noise: random noise with S.D of 0.1

MODEL2 => Constant Velocity (second order model) : Rate of Temperature(DT)



KF Parameters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 1e-10;

Error Covariance = 100\*eye(3);

IMM Parameters:

P\_Noise\_Variance = 1e-10;

M\_Noise\_Variance = 2e-2;

Error Covariance = 100\*eye(3);

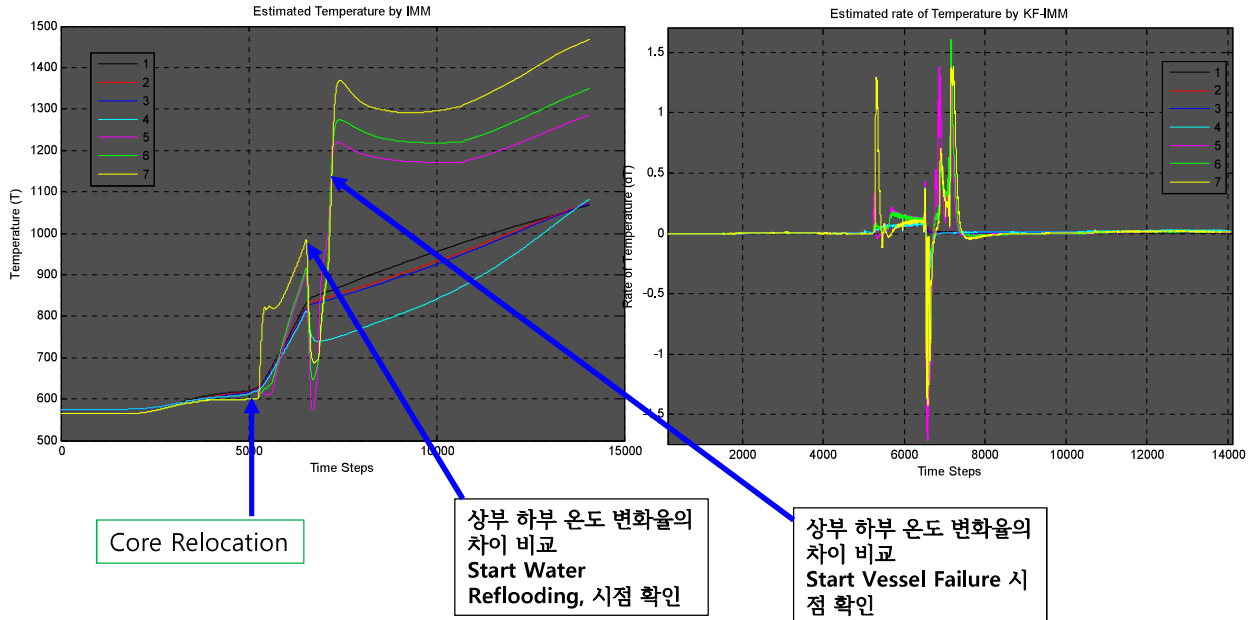
Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with 0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

# SBO

## 7 data Point Data 변화 비교

Noise: random noise with S.D of 0.1

Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]$ ; MC=100

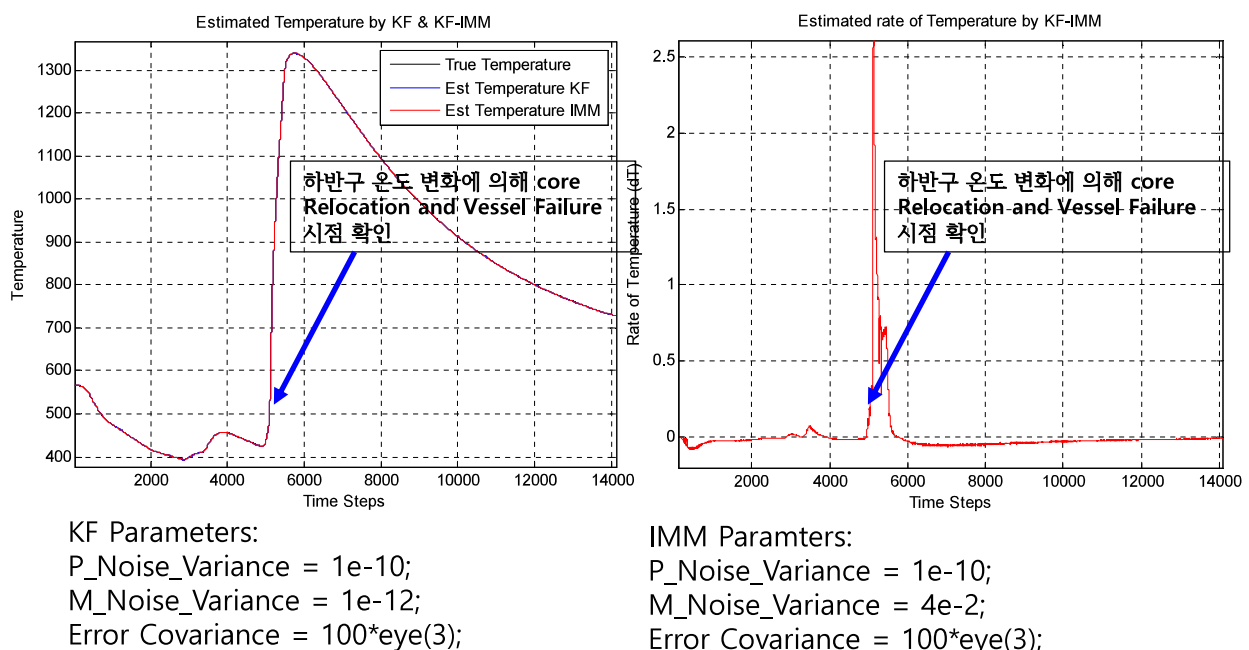


CASE 5 COR-TLH.601

# LBLOCA

Noise: random noise with S.D of 0.1

Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]$ ; MC=100



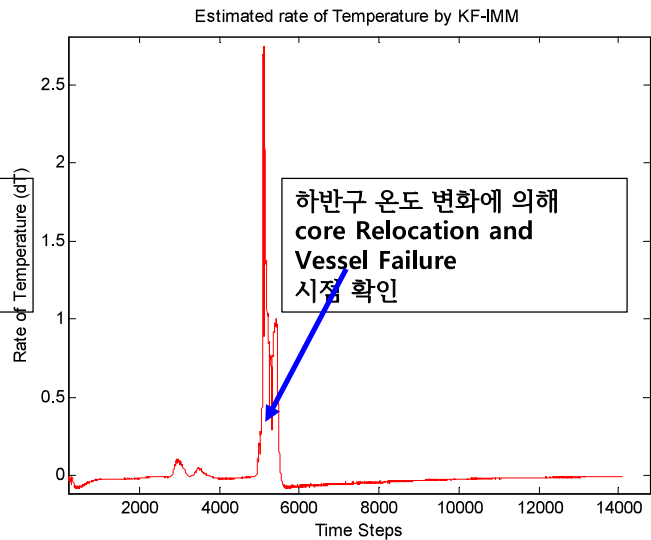
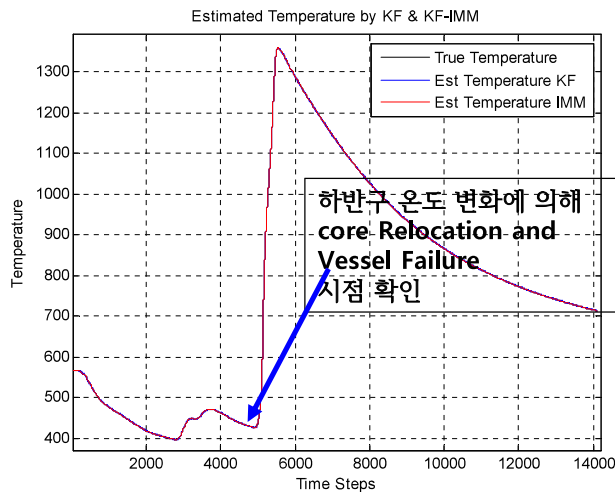
Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with 0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

# LBLOCA

CASE 6 COR-TLH.301

Noise: random noise with S.D of 0.1

Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]$ ; MC=100



KF Parameters:

P\_Noise\_Variance =  $1e-10$ ;

M\_Noise\_Variance =  $1e-12$ ;

Error Covariance =  $100 \cdot \text{eye}(3)$ ;

IMM Parameters:

P\_Noise\_Variance =  $1e-10$ ;

M\_Noise\_Variance =  $4e-2$ ;

Error Covariance =  $100 \cdot \text{eye}(3)$ ;

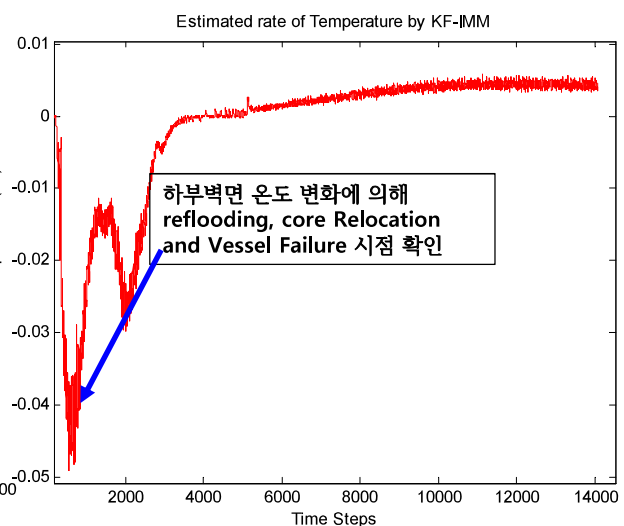
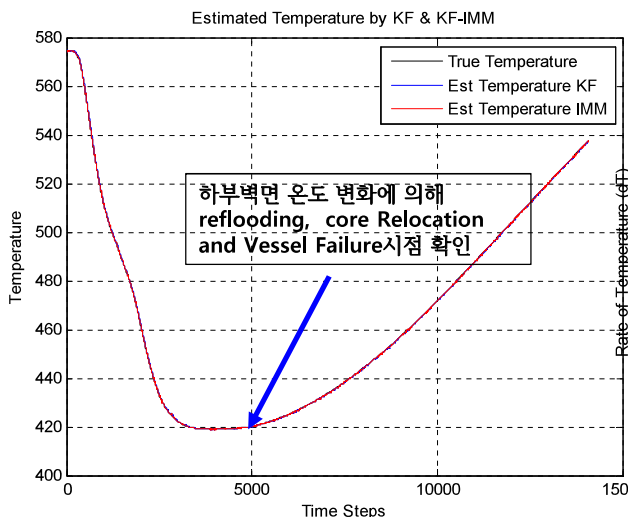
Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with 0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

CASE 4 HS-TEMP.2000404

# LBLOCA

Noise: random noise with S.D of 0.1

Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]$ ; MC=100



KF Parameters:

P\_Noise\_Variance =  $1e-8$ ;

M\_Noise\_Variance =  $8e-7$ ;

Error Covariance =  $100 \cdot \text{eye}(3)$ ;

IMM Parameters:

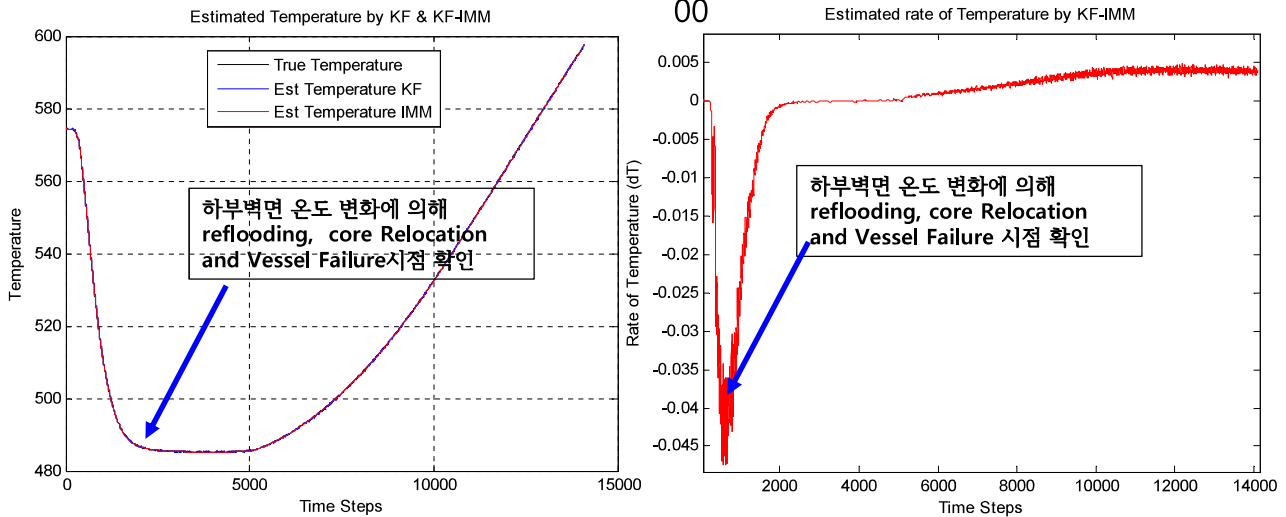
P\_Noise\_Variance =  $1e-8$ ;

M\_Noise\_Variance =  $5e-2$ ;

Error Covariance =  $100 \cdot \text{eye}(3)$ ;

Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with 0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

Noise: random noise with S.D of 0.1

Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]$ ; MC=1

KF Parameters:

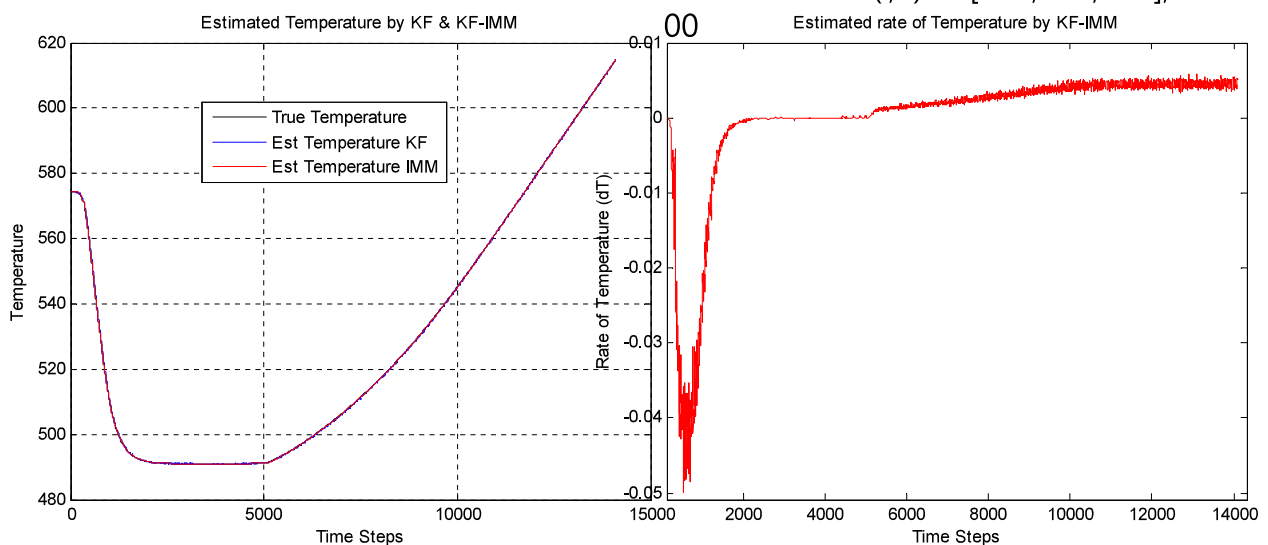
P\_Noise\_Variance =  $1e-10$ ;M\_Noise\_Variance =  $5e-9$ ;Error Covariance =  $100 \times \text{eye}(3)$ ;

IMM Paramters:

P\_Noise\_Variance =  $1e-10$ ;M\_Noise\_Variance =  $7e-2$ ;Error Covariance =  $100 \times \text{eye}(3)$ ;

Moving Average Model for Constant Velocity : Rate of Temperature(DT) with  
0.5 or 1 minutes, and focus on the time zoom of the changing rate of temp

Noise: random noise with S.D of 0.1

Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]$ ; MC=1

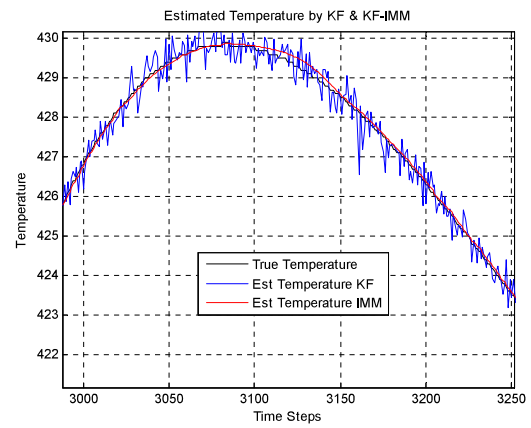
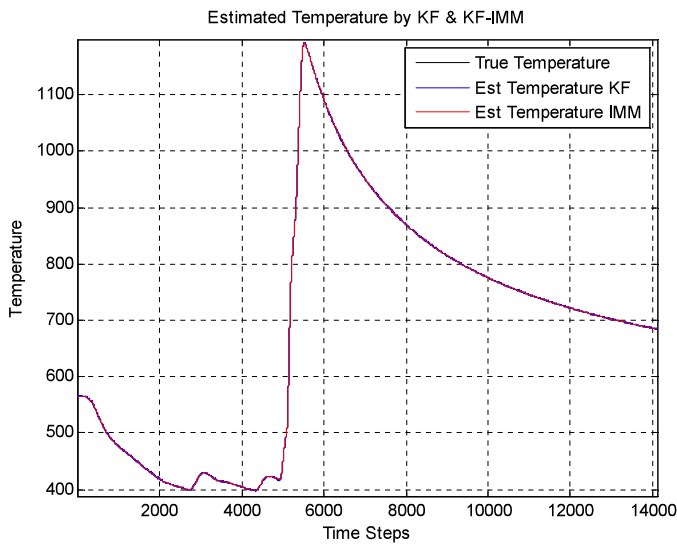
KF Parameters:

P\_Noise\_Variance =  $1e-10$ ;M\_Noise\_Variance =  $5e-9$ ;Error Covariance =  $100 \times \text{eye}(3)$ ;

IMM Paramters:

P\_Noise\_Variance =  $1e-10$ ;M\_Noise\_Variance =  $7e-2$ ;Error Covariance =  $100 \times \text{eye}(3)$ ;

Noise: random noise with S.D of 0.1 Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]$ ; MC=100



KF Parameters:

$P\_Noise\_Variance = 1e-10$ ;

$M\_Noise\_Variance = 5e-8$ ;

Error Covariance =  $100 \times eye(3)$ ;

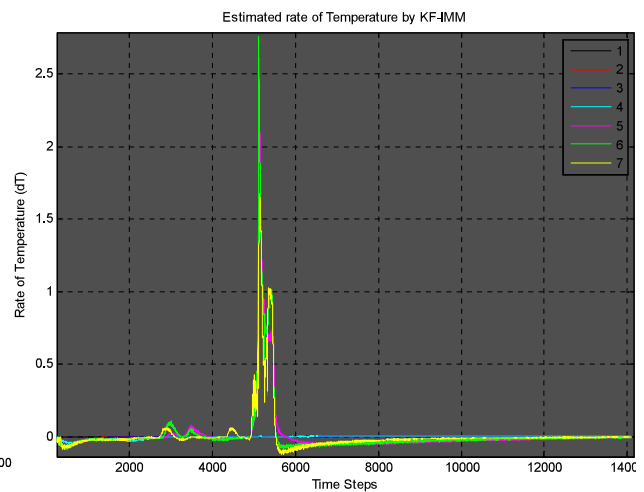
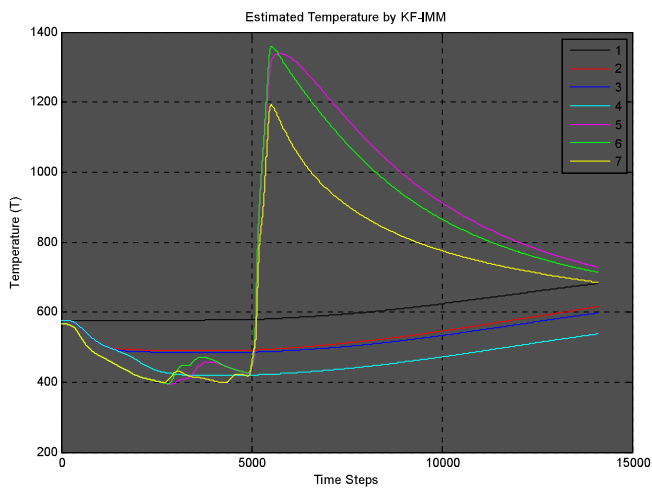
IMM Parameters:

$P\_Noise\_Variance = 1e-10$ ;

$M\_Noise\_Variance = 1e-1$ ;

Error Covariance =  $100 \times eye(3)$ ;

Noise: random noise with S.D of 0.1 Initial state  $x(:,1) = [300; 0.5; 0.5]$ ; MC=100

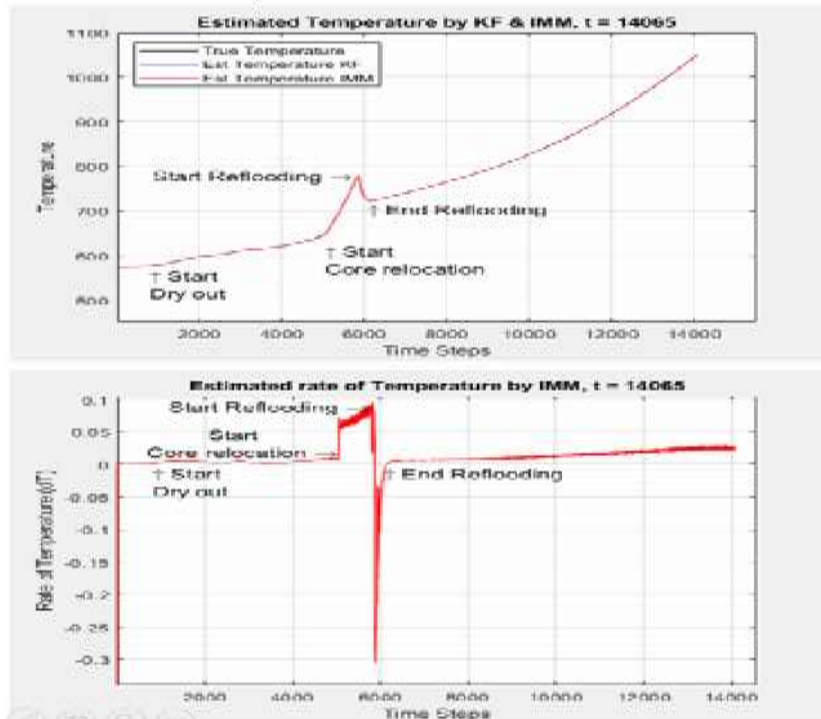




## Classification of Sequence of events of severe accidents scenario using Core Wall Temperature Estimation

### Temperature Estimation

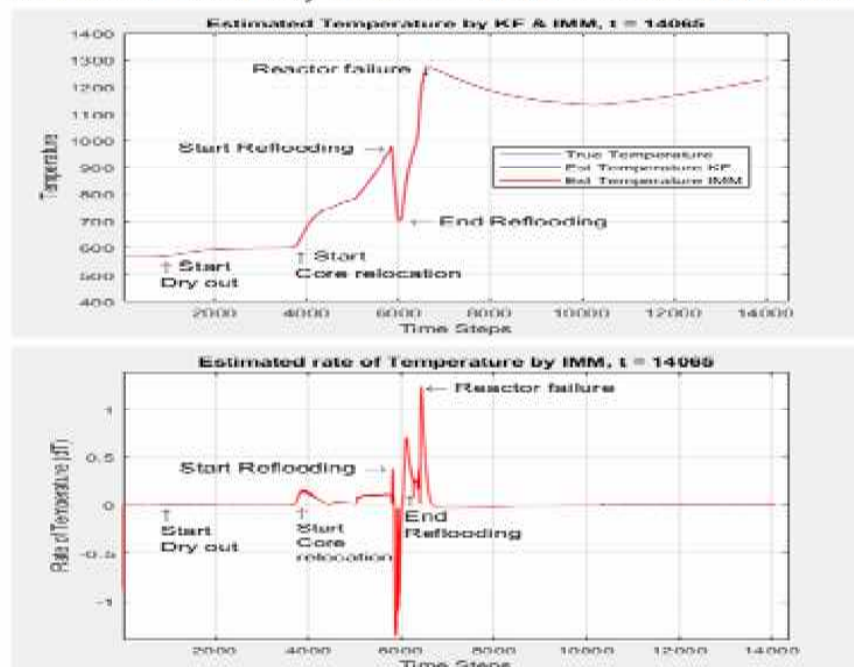
SA case: TLOFW, Sensor data : HS-EMP.2000404



## Classification of Sequence of events of severe accidents scenario using Wall Temperature Estimation in Hemisphere

### Temperature Estimation

SA case: TLOFW, Sensor data : COR-TLH.301



# Summary and Conclusions

- ◆ Development of interacting multiple model using wall temperature for classification and identification of sequence of events of severe accidents in nuclear power plants
  - State Space Models for Temperature estimation (Three parallel Kalman Filters)
    - ✓ MODEL1 ==> Random walk model : Time T에 대한 온도 변화
    - ✓ MODEL2 ==> Constant Velocity (second order model) : 온도변화 속도
    - ✓ MODEL3 ==> Constant Acceleration (third order model) : 온도변화 가속도
  - Data Model
    - ✓ Sequence of events of severe accidents scenario, SBO, TLOFW and LOCA
    - ✓ Data Modeling of wall temperature : 7 Data Point
- ◆ Summary of case study for Wall Temperature Estimation
  - 중대사고 초기 : 벽면온도 변화를 통해 노심의 온도 변화 및 개략적 수위를 예측할 수 있음.
  - 노심 상부, 하부의 온도 변화율의 차이 비교
    - ✓ Core Dryout 시점, Core Relocation, Core Reflooding 시점 확인
  - 노심 부위 와 하반부 부위의 온도 변화율의 차이 비교
    - ✓ Core Dryout, Core Relocation, Start and End Core Reflooding, RPV Failure 예측
    - ✓ 하반부 부위의 온도 변화율 감시를 통해 Core Dryout, Core Relocation 시점을 분명하게 예측할 수 있음.

---

원자력 사고 대응에서 목표충돌(goal  
conflict) 및 운전원 반응에 대한 기초 연구

---

이용희

한국원자력연구원

## 원자력 사고 대응에서 목표충돌(goal conflict) 및 운전원 반응에 대한 기초 연구 (A Preliminary Study on the Operators' Responses to Goal-Conflict for Coping to Nuclear Accidents)

이용희1)  
한국원자력연구원, 사고감시대처연구실

### 1. 서론

인간이 만든 (human-made) 기술 세계에서 안전성 확보를 위해 고려해야하는 상황의 범위가 원자력 시스템을 통해 지속적으로 확대되었다. 본 논문은 인적요소 측면에서 시스템의 다양한 목표 변화 및 운전원이 경험하는 목표에 대한 반응을 관측 및 검토하였다.

### 2. 배경 검토

원자력 시스템의 안전에 요구되는 고집적 에너지 또는 방사능 등 고려사항이 타분야와 달리, 안전 측면에 대해 매우 신중하고 보수적인 접근을 채택해왔다. 원자력 시스템은 정상운전 상황에는 매우 안정적이지만 정상운전 이외에는 시스템의 상황에 따라 상대적으로 급격하고 복잡하게 변화된다. 특히 원전의 중대사고 상황에서 안전을 확보하기 위한 전략에 대한 연구가 활발(1980/1988/1992 NRC, 2009 IAEA 등)한데, EOP/SAMG/EDMG/FLEX 등 주요 하드웨어 기능을 중심으로 연구 및 제안되고 있다(2018 송진호 외). 인적요소 측면을 보완하는 연구는 TMI 원전 사고 이후에 활발했던 D-CRDR, EOP upgrade, ERF/SPDS 등이 있으며, 최근에는 사고완화 과정을 지원하는 EID 중심의 새로운 상황인식 인터페이스 및 정보 제공 방안(2019 이현철 외)이 연구 개발되고 있다. 후쿠시마 원전 사고 이후 원자력 시스템의 안전성 확보에 대한 우리가 급격히 확대되면서, 궁극적인 안전성 요건의 하나로 예외적인 상황(unexpected situation)을 포함한 무방비 상태에 대한 대비(prepare the unprepared-ness)가 요구되고 있다(IAEA 2015). 원자력 분야에 서 경험된 운전원의 사고반응은 근원적 놀람(fundamental surprise)으로 표현되고 있지만 (2015 이용희), 근원적 놀람에 대한 연구는 매우 드물며(2018 이용희, 2019 김사길 외) 구체적으로 어떤 문제를 의미하는지는 아직 체계적으로 밝혀져 있지 않은 것으로 보인다.

### 3. 실험 내용

시스템의 거동을 맡은 사람에게 주어지는 상황 변화가 목표충돌(goal-conflict) 및 갈등의 가능성을 보일 경우, 실제로 어떤 반응 및 경험을 겪는가를 실험적으로 관측하고 분석하였다. 실험적 시나리오 진행 및 시뮬레이션 상황에서 일정한 절차적 요구 및 게임(오의 지진 및 고장, 제3자에 의한 인위적 차단 및 변경 등)을 통해 목표 충돌 및 갈등 반응을 관측하였다. - 실험 구성 (생략) - 실험 세부 내용 (생략) - 실험결과 (생략)

### 4. 결과 및 분석

후쿠시마 사고와 같은 중대사고의 경우에 제기되는 unknown-unknown risk에 대처하는 데

1) 042-868-2941, yhlee@kaeri.re.kr

인터페이스를 중심으로 한 보편이 얼마나 효과적일지는 확실하지 않다. 시스템의 거동과 관련하여 인간이 경험하는 상황은 계통의 기능 및 거동과는 별개의 문제일 수 있으므로, 원자력 안전성에 대한 불확실성 및 불신을 해소하지 못하고 있는 상황이다. 특히 구체적인 목표(goal)에 근본적인 변화가 불확실성을 가질 경우 요구범위 또는 예상을 벗어난다. 시스템의 목표가 명확하지 않을 경우 특히 운전원에게는 인지심리상의 문제와 어려움이 발생하는 것을 관측하였다. 이는 원자력 분야뿐만 아니라 우주/항공, 해양, 군사, 통신 등 다양한 분야에서 경험한 다양한 사례에서 공통적으로 제기된 내용이다(2016 이용희 외). 인간은 신체적/인지적으로 제한된 능력과 자원을 가지고 행동하므로, 인간의 실제적인 의사결정 및 거동은 기능적으로 완전할 수 없다는 제한적 합리성(bounded rationality)을 드러냈다. 인간 의 물리적인 제약을 넘지 못하는 한계뿐만 아니라 인지적인 측면에서도 다양한 한계를 보이고 있다. 단순한 의사결정에서도 나타나는 인간의 한계와 편향(bias)이 본 연구에서도 불가피하였음을 보였다. 시스템 운영의 목표는 시스템의 상황에 따라 변화되는데, 특히 사고 상황에서 안전 확보 중심의 대응을 위한 운전원 반응 목표에 근본적인 변화가 발생할 수 있다. 일반적으로 책임 최소화/회피와는 별개로 효율 보호 -> 기능 보호 -> 기기 보호 -> 업무 보호 및 누출 최소화 -> 피해 최소화 등이 불확실한 동료 및 기준으로 주어진다. 목표의 천이(transition) 변화가 객관적으로 명확하지 않으므로 주관적 가치 평가, 휴리스틱(heuristic)은 물론 모드 오류(mode error) 등 인지적으로 근원적인 어려움에 봉착한다. 목표의 갈등 및 충돌에서 겪는 문제는 크게 두가지로 양분된다. 우선 목표의 친숙도가 낮아 목표 달성을 위한 구체적 실행전략을 개발할 수 없는 경우와 목표 간의 우선순위 또는 상충관계 및 작용에 대한 처리가 불가능한 경우가 발생한다. 두가지 경우에 운전원의 반응은 외형적으로는 모두 인적오류 가능성이 매우 높은 비정상적인 반응(소위 3F 반응)으로 나타날 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 그러나 해결방법에서는 상당한 차이가 있는 것으로 보인다. 전자의 경우 시스템의 상황 인식의 지원 및 동적인 변화에 대한 적절한 정보를 제공함으로써 인적오류 가능성을 상당히 해소할 수 있을 것으로 보인다. 인적오류 방지를 위한 지원 방법으로는 실험 전에는 시각적 (정보)지원이 효과적일 것으로 예상되었으나, 실제 및 실험 후에는 일부 주관적 선호 및 실제 효과에 다른 방법으로 변동된 가능성이 포착되었다. 그러나 후자의 경우에는 목표 갈등 및 충돌을 해결하는 과정 및 방법을 통해 시스템 목표의 변화(transition)에 대한 인식 및 관련 의사결정을 지원하는 기법의 필요성이 부각된다. 원자력 시스템에서 안전성을 확보할 수 있도록 불확실성에 대처하는 별도의 원칙 및 새로운 인적요소 측면에서의 전략 개발이 시급하다는 것을 보여주었다.

### 5. 결론 및 토의

본 연구는 근원적 놀람을 일으키는 것으로 추정되는 목표의 갈등 또는 충돌(goal-conflict) 상황에 대한 관측 및 분석 등 기초연구 결과를 제시하였다. 사례 검토 결과 및 인지시스템 분야의 유사한 선행연구로 보아 종사자가 경험하는 목표의 충돌 및 갈등 문제를 기초(관측)실험을 통해 확인하였을 뿐만 아니라, 원자력 시스템에서 중대사고 및 스트레스 테스트 등에서 인적요소의 검증 및 대책 마련을 위한 기술적인 출발점을 모색하였다.

### 6. 참고문헌 (생략)

\* 본 논문은 과기부 원연사 과제인 '중대사고 완화조치 기술개발'의 일환으로 작성됨.

---

## 기존 시뮬레이터에 중대사고 모델 추가 구현 방법

---

이정훈

미래와 도전

2020년 동계 원자력 계측제어 워크숍

# MAAP5 Interface Library를 이용한 중대사고 모델 추가 구현 방법

2020.02.27



(주)미래와도전



## CONTENTS

- I 시뮬레이터 구성 개요
- II MAAP5 Interface Library 소개
- III 기존 시뮬레이터와의 연계 설계
- IV 기존 RELAP5와의 Interface
- V 시나리오 운영



# I 시뮬레이터 구성 개요

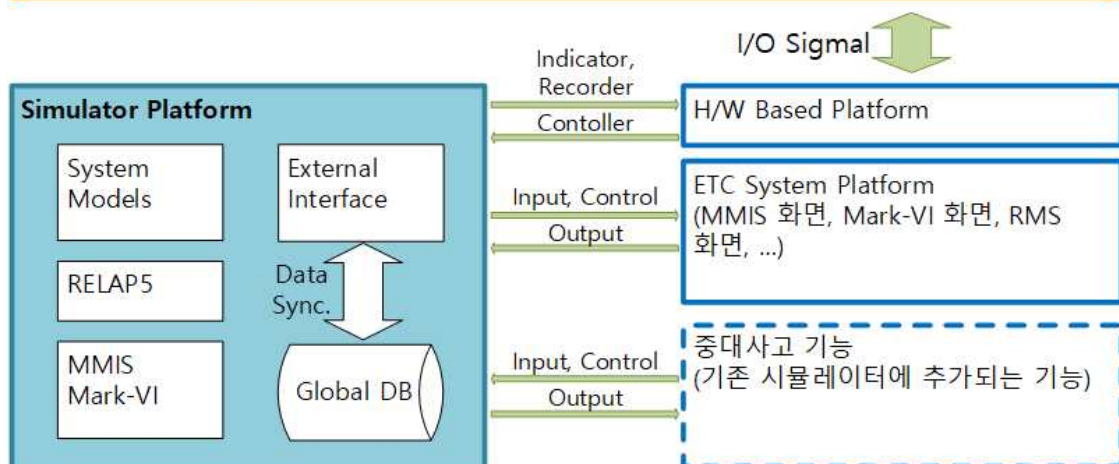
FUTURE & CHALLENGE TECHNOLOGE Co., Ltd.



## 01 시뮬레이터 구성 개요

### 시뮬레이터의 개략적 구조

Simulator H/W Panel  
(Main Control Board or LDP, Remote Shutdown Panel, etc.)

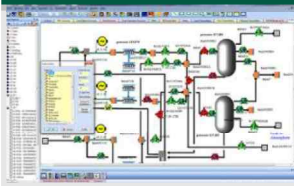


- ✓ 기존 Simulator Platform에는 노심/열수력 모델 구성을 위한 RELAP5 내장
- ✓ Simulator Platform은 외부 Emulation Program과의 Interface를 지원함

# 01 시뮬레이터 구성 개요

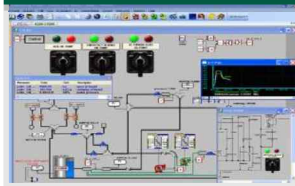
## 시뮬레이터의 Platform 구성 요소 (3KeyMaster)

### Simulation Platform



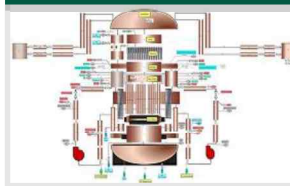
- 3KeyMaster 실행 파일
- Graphical Engineering Station

### Modeling Tools



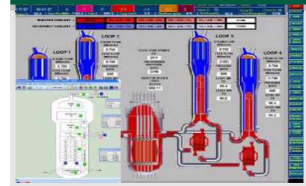
- FlowBase Tool
- Electrical Network Tool
- Logic & Control Tool 등

### Nuclear Modeling



- 3KeyRELAP5-RT™
- NESTLE
- 3KeySAA™

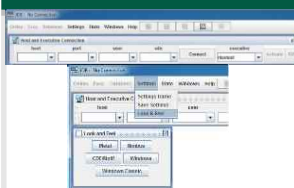
### 강사조작반



- SVIC(Scoping, V&V and IC)
- SBT(Scenario Based Testing)

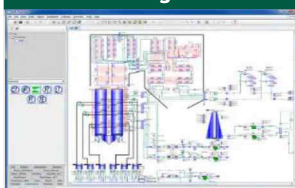
## 시뮬레이터의 Platform 구성 요소 (JADE)

### Simulation Platform



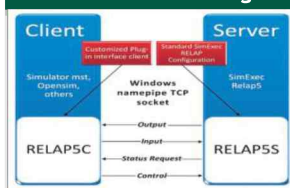
- SimExec 실행 파일
- JDashboard 사용자 화면

### Modeling Tools



- JFlow, JTopmeret 등 Tool
- JElectric, Jcontrol 등 Tool

### Nuclear Modeling



- RELAP5-HD
- REMARK

### 강사조작반

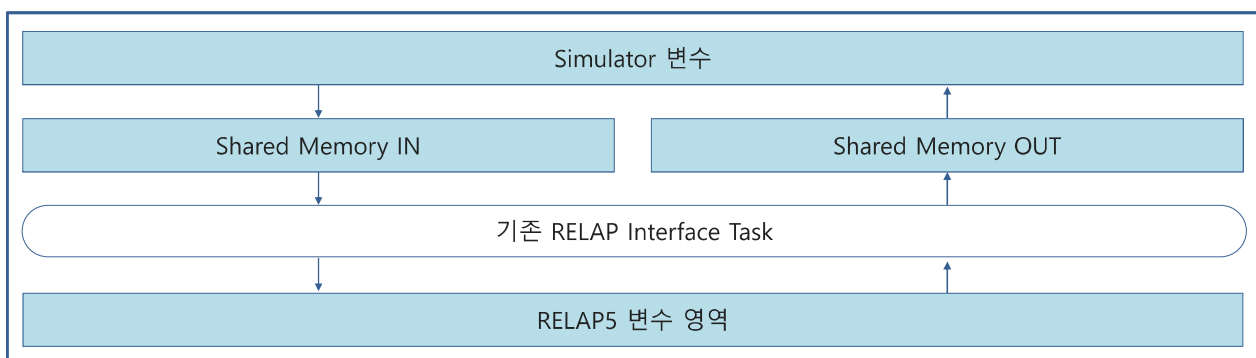


- JStation 강사조작반



# 01 시뮬레이터 구성 개요

## RELAP과 Simulator Platform과의 관계



### RELAP5 변수 영역

- ✓ Simulator 내 RELAP5 Task를 통하여 Simulator와 연계할 변수들이 저장된 메모리 영역

### RELAP Interface Task

- ✓ RELAP5 변수 영역에서 Simulator Task 들과 연계가 필요한 변수들을 RELAP의 입력과 출력을 기준으로 분류하여 공유 메모리의 정해진 주소에 저장하는 Task





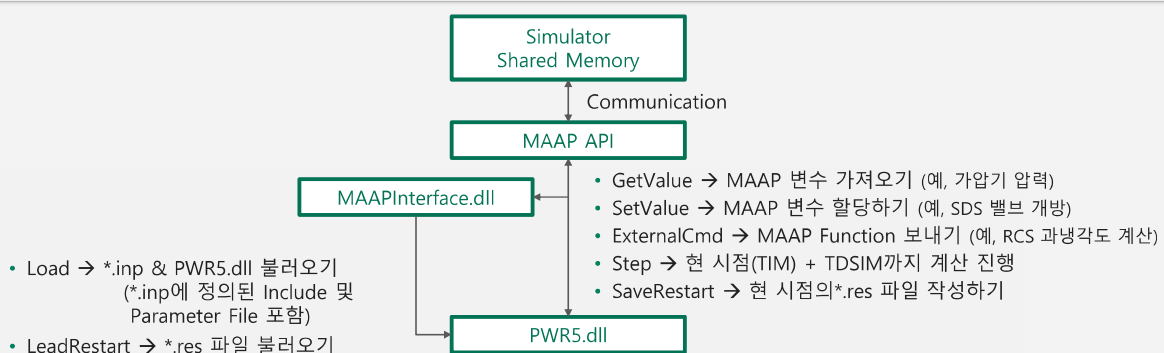
## MAAP5 Interface Library 소개

FUTURE & CHALLENGE TECHNOLOGE Co., Ltd.



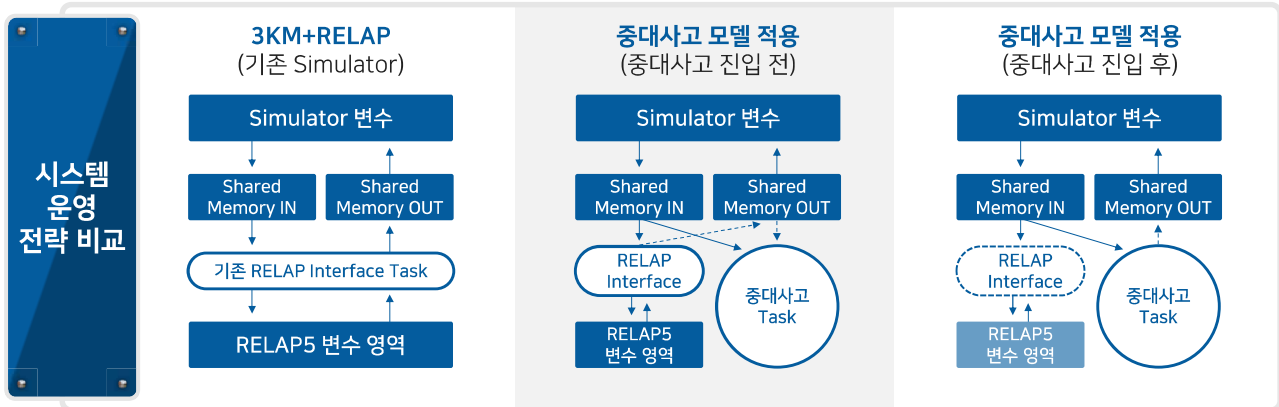
## 02 MAAP5 Interface Library 소개

### MAAP API의 구성 요소 및 적용



### 새로운 형태의 MAAP 연계 방안 : MAAP API

- (1) MAAP5.04 버전부터 제공(MAAPInterface.dll)되는 새로운 연계 기능
- (2) MAAP 소스 코드에의 접근 없이 주요 수치 계산을 수행하는 실행 파일(PWR5.dll) 제어 가능
- (3) 시뮬레이터 환경의 Timestep과 동기화(ISIMUL, TDSIM) 가능
- (4) 기 정의된 다양한 함수를 통해 외부 프로그램(MAAP API)에서의 제어
  - a. Load\*() : 입력(\*.inp) 및 PWR5.dll 불러오기
  - b. Get/SetValue\*() : MAAP 변수 가져오기/할당하기
  - c. ExternCmd\*() : MAAP Function 보내기
  - d. Step\*() : 시뮬레이터 환경의 다음 Timestep까지 계산 진행  
→ 실시간 또는 가속 모드 구현
  - e. LoadSaveRestart\*() : Restart File 불러오기 및 작성하기  
→ 각종 IC 설정, IC간 전환(Snapshot간 런타임 도약) 구현
- (5) MAAP 소스 코드 언어인 Fortran을 포함하여 C++, C# 등을 통해서도 외부 프로그램 개발 가능



### 중대사고 Task

- ✓ MAAP API와 Simulator Tool에서 제공하는 기능으로 구성
- ✓ 데이터 교환, Sync 유지 등 기능 수행



## 기존 시뮬레이터와의 연계 설계

## 03 기존 시뮬레이터와의 연계 설계

### 기존 시뮬레이터 주요 핵심 모델 변환 전략

대상 Task 또는 모델	기존 시뮬레이터 대응 부분
MasterRELAP5	<ul style="list-style-type: none"> <li>자체는 변환 필요 없으나 중대사고 이후 Task 기능을 수행하지 않도록 조정 필요</li> <li>2차계통을 중대사고 발생 이후에도 계속 활용하려면 시뮬레이터와 연계를 위한 Task 들의 설정 파일 일부 수정 필요</li> </ul>
FlowBase	<ul style="list-style-type: none"> <li>자체는 변환 필요 없고, 구현된 모델의 일부 변환 필요</li> </ul>
격납건물 모델	<ul style="list-style-type: none"> <li>FlowBase와 입/출력이 연계되어 있던 변수 조정 필요</li> <li>중대사고 이전에는 FlowBase와, 중대사고 이후에는 중대사고 모델과 연계하도록 변환 필요</li> </ul>
SI 및 PPS 모델	<ul style="list-style-type: none"> <li>FlowBase와 입/출력이 연계되어 있던 변수 조정 필요</li> <li>중대사고 이전에는 FlowBase와, 중대사고 이후에는 중대사고 모델과 연계하도록 변환 필요</li> <li>일부 안전 기능이 MACST 기기에 의해 수행될 경우 이에 대한 기능 구현 추가 필요</li> </ul>
사용후연료저장조 모델	<ul style="list-style-type: none"> <li>FlowBase와 입/출력이 연계되어 있던 변수 조정 필요</li> <li>FlowBase와 중대사고 모델 간 연계 대상의 절체 시점 조정 필요</li> <li>기존 모델에 사고 관련 기능이 매우 미흡하므로 처음부터 MAAP으로 모의하는 방안 추가 검토 필요</li> </ul>
방사선 모델	<ul style="list-style-type: none"> <li>각 검출기 위치 별 방사선 계산 모델 전면 재검토 필요</li> <li>MAAP5에서 계산되는 방사선 값을 처음부터 적용하는 방안 추가 검토 필요</li> </ul>



10

## 03 기존 시뮬레이터와의 연계 설계

### 기존 중대사고 모델과의 비교(WSC 사)

구분	MELCOR 기반 기존 방식 (WSC사의 3KeySAA™ 유형)	신규 개발 방식
전환 방식	특정 시점에서의 <b>일괄 전환</b> 으로 데이터의 <b>불연속성</b> 야기	병행 및 동기화 계산으로 <b>연속성</b> 이 보장되는 <b>부드러운 전환</b>
전환 동작의 신뢰성(안정성)	코드 간의 <b>특성 차이 이해결로</b> 빈번한 시뮬레이터 <b>불안정</b> 야기	<b>동기화</b> 계산을 통하여 중대사고 모델로의 <b>안정적인</b> 전환
전환 시점	노심 과열(Heat-up) 전 전환으로 <b>RELAP5 계산 조기 종결</b> 사례 확인	노심 과열 상태에서 전환 ( <b>RELAP5 계산 영역의 최대화</b> )
전환 이전의 정보 제공 범위	전환 시점에 <b>부정확한</b> 모델 데이터 적용 (예, 격납건물 상태, 방사성물질 정보 등)	MAAP5 격납건물 및 MAAP-DOSE 계산 결과 활용 가능
전환 후의 정확성	전환 전·후의 코드 특성 차이로 인해 <b>정확성을 저감</b> 하는 영향 존재	각 코드 특성에 부합하는 병행계산 수행으로 코드 차에 의한 <b>부정확성의 원천적 배제</b>



## 기존 중대사고 모델과의 비교 (GSE 사)

구분	MAAP 기반 기존 방식 (GSE사의 PSA-HD™ 유형)	신규 개발 방식
개발 방식	중대사고 모델인 MAAP5 소스 코드의 직접적인 수정	MAAP5 소스 코드의 수정 없이 MAAP API를 통한 MAAP5 제어
유지 보수	MAAP5 버전 변경 시 <b>제작사에 의한</b> 소스 코드 재수정을 통한 유지 보수 필요	MAAP5 코드 재수정 없이 발주자 <b>자체적으로</b> 유지 보수 가능
QA 적용	제작사에 의해 변경된 소스 코드는 <b>EPRI QA 프로그램 미적용</b>	<b>EPRI QA 프로그램이 적용된</b> 실행 파일을 그대로 사용

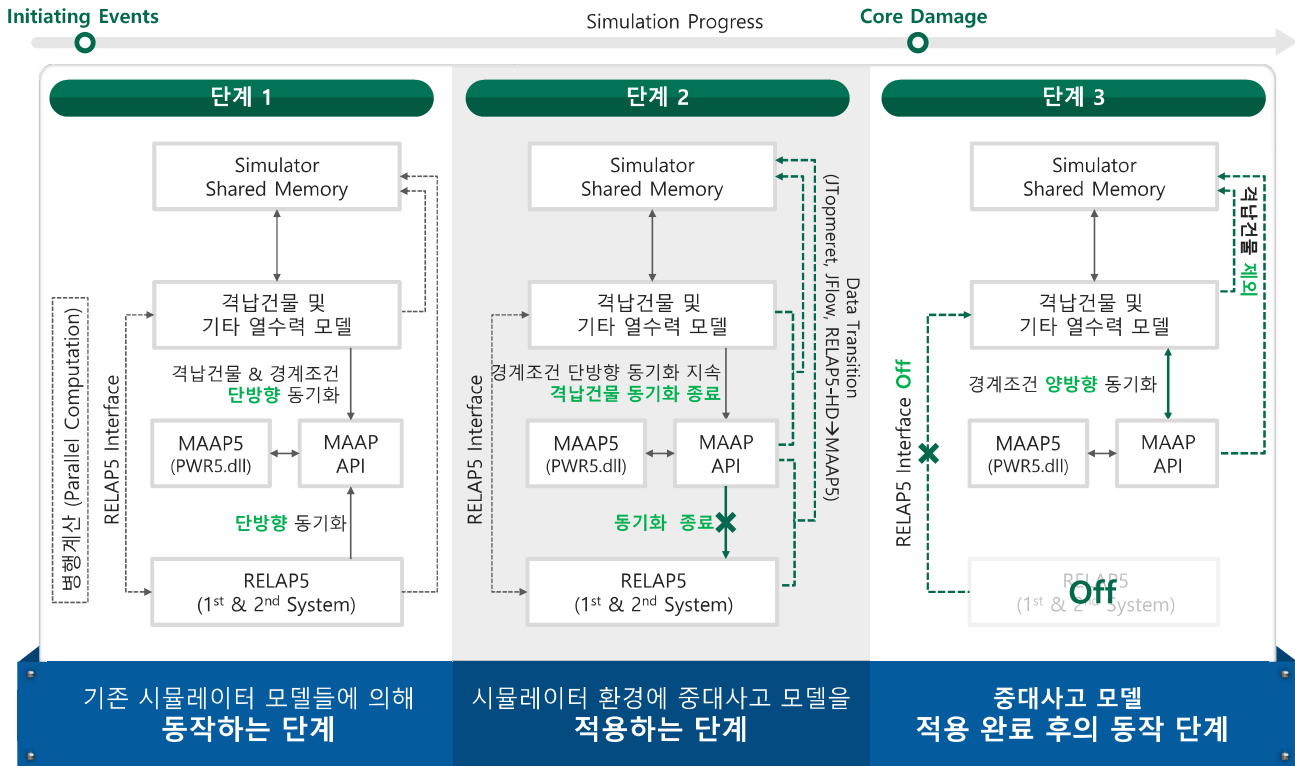
## IV

기존 RELAP5와의  
Interface



## 04 기존 RELAP5와의 Interface

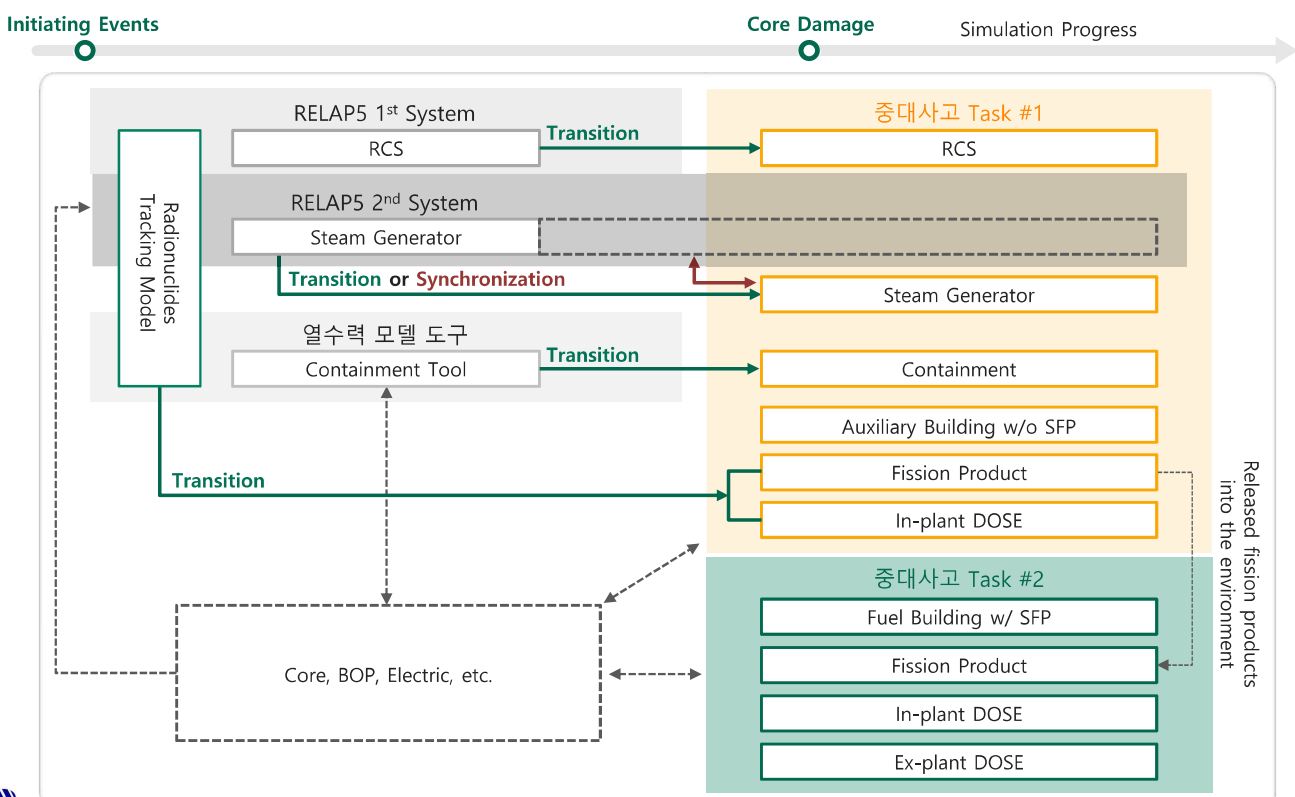
### RELAP5와 MAAP5의 연계 및 통합



14

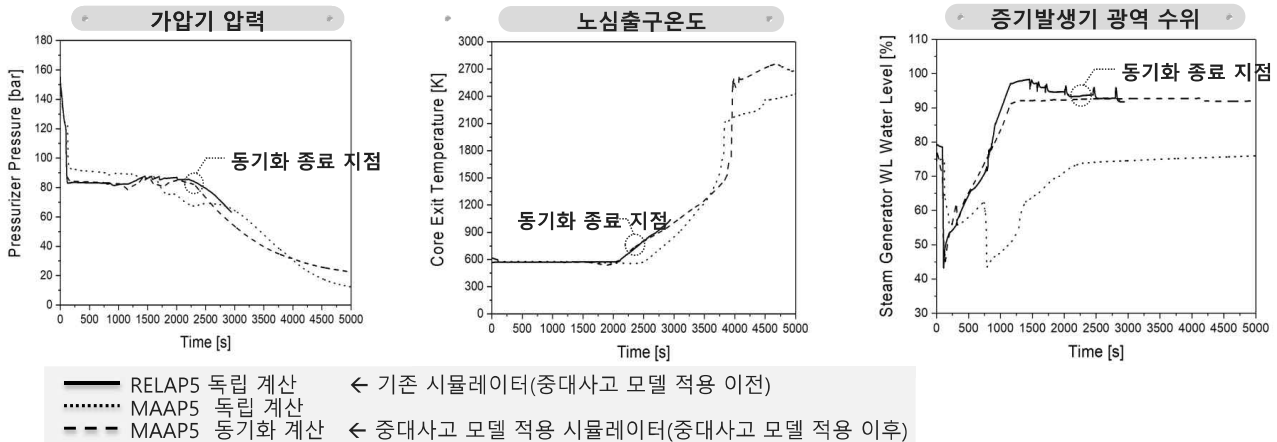
## 04 기존 RELAP5와의 Interface

### RELAP5와 MAAP5의 세부 기능 전환



## 04 기존 RELAP5와의 Interface

### RELAP5와 MAAP5의 세부 기능 전환



- ▶ 독립 계산된 RELAP5와 MAAP5의 결과는 다소 차이를 보이는 것으로 평가
- ▶ 동기화 종료 시점(2,312초)까지 RELAP5와 동기화 기술이 적용된 MAAP5의 거동은 매우 유사
  - MAAP API를 활용하여 RELAP5 계산 결과를 MAAP5로 동기화하는 기술의 독립 검증
  - 병행 및 동기화 계산 방식은 시뮬레이터에서의 중대사고 기능 구현을 위한 최적의 기술임을 확인

## 04 기존 RELAP5와의 Interface

### RELAP5와 MAAP5의 변수 연계

- ▶ 경계조건을 통한 유체 정보 송·수신 체계
  - 간접적인 방식으로도 정확한 질량 및 에너지 전달 모의를 위한 변수 목록 고려

RELAP5 변수	변수 유형	MAAP5 변수
P	압력	PRCS
TEMPF	물 온도	TWRCS
TEMPG	기체 온도	TGRCS
UF	물 내부에너지	UWRCS / MWRCS
UG	기체 내부에너지	UGRCS / MGRCS
HVMIX	물 및 기체의 엔탈피	HWRCs & HGRCS
QUALA	체적 내 비응축성 기체 질량비	$\sum M^{**}RCS$ / MGRCS
VELF*	체적 내 물 속도	N/A
VELG*	체적 내 기체 속도	N/A
...		

- RELAP5와 MAAP5의 코드 특성에 따라 내부적으로 계산하는 물성치(특히 엔탈피) 차이에 의한 **오차 최소화**
  - ↳ 각 코드의 특성에 부합하도록 데이터 변환 후 송·수신

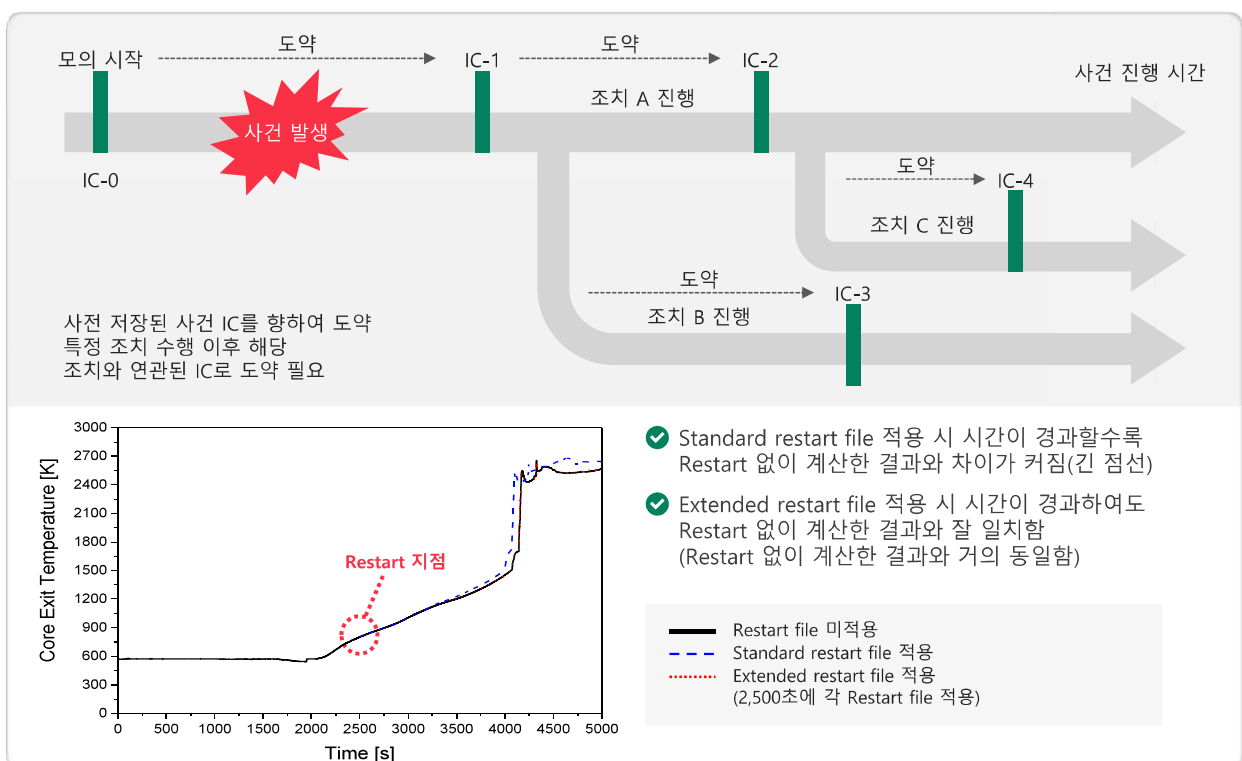
# V 시나리오 운영

FUTURE & CHALLENGE TECHNOLOGE Co., Ltd.



## 05 시나리오 운영

중대사고 교육훈련 시나리오 개발 : Snapshot 간 런타임 도약 기능



중대사고 교육훈련 시나리오 개발 : 검토 가능한 모든 경우에 대한 검토 및 시나리오 도출

검토 항목	검토대상	도출 요건
규제요건 및 지침	RG-N15.06 설계기준 초과사고 및 중대사고 관련 인간공학 적용	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시나리오 이행 시 필수 고려 요소</li> <li>• 모든 시나리오에 인간공학 프로그램 고려 여부</li> <li>• 시설 및 설비의 인간공학 설계가 시뮬레이터에 반영</li> <li>• 훈련프로그램을 이행하기 위한 설비로서의 적정성</li> </ul>
	RG-N17.07 원전 종사자의 교육훈련	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 교육훈련 계획에 부합하는 시나리오</li> <li>• 직무분석 결과가 잘 반영된 시나리오</li> <li>• 운전원의 실행 역무에 대한 훈련 지원</li> </ul>
중대사고 예방	MOG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시나리오로 구현할 대상 사고 또는 초기사건</li> <li>• 주제어실에서 직접 실행되는 시나리오</li> <li>• 외부에서 실행된 결과가 주제어실에 반영되는 사항</li> <li>• 상기 행위에 대한 결과 반영</li> </ul>
	MACST 전략	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,2,3단계의 각 단계 별 MACST 설비 투입 시 선행 조건 확인 및 실행 방법</li> <li>• 설치 시간을 고려한 적절한 MACST 설비 투입 가능 시기 설정</li> <li>• MACST 설비 투입 후 영향 사항 (물탱크 수위, 연료탱크 유량 등)에 대한 대처 방법</li> </ul>
중대사고 완화	SAMG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시나리오로 구현할 대상 사고 또는 초기사건</li> <li>• 생존 기기 범주 및 확인 요건</li> <li>• 주제어실에서 수행할 SAMG 단계 확인</li> </ul>

검토 항목	검토대상	도출 시나리오
중대사고 예방능력 평가 (다중고장사고)	EOP, MOG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 정지불능예상운전과도</li> <li>• 발전소 교류전원 완전상실사고</li> <li>• 증기발생기 전열관 다중파단사고</li> <li>• 급수완전상실사고</li> <li>• 계통간 냉각재상실사고</li> <li>• 정지냉각기능 상실사고</li> <li>• 최종열제거원 상실사고</li> <li>• 소형냉각재상실사고와 동시에 발생하는 안전주입 또는 재순환상실사고</li> <li>• 사용후연료저장조 냉각기능 상실사고 (9가지)</li> </ul>
중대사고 완화능력 평가 (노심손상사고)	SAMG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공학적 판단과 확률론적안전성평가 결과 등을 종합적으로 고려하여 선정 (발전소별 개별적으로 제시되어야 함.)</li> <li>• 특히, 결정론적 해석 관점에서 2가지 주요 초기사건을 고려</li> </ul>
설계기준초과 자연재해 대응 능력 평가	EOP, MOG, SAMG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대체교류디젤발전기상실을 포함한 모든 교류전원 완전상실 및 최종열제거원 상실사고에 대한 사고경위</li> </ul>
인위적재해 대응능력 평가	EOP, MOG, EDMG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 의도적인 항공기충돌을 포함한 인위적 원인에 의한 화재 또는 폭발로 발생하는 광역손상 (시설 내의 필수전원 (교류 및 직류) 공급기능과 제어계측기능의 장기적인 상실 포함)</li> </ul>

| THANK YOU



---

## 직무분석와 전산화절차서의 정형화된 MMIS 개발

---

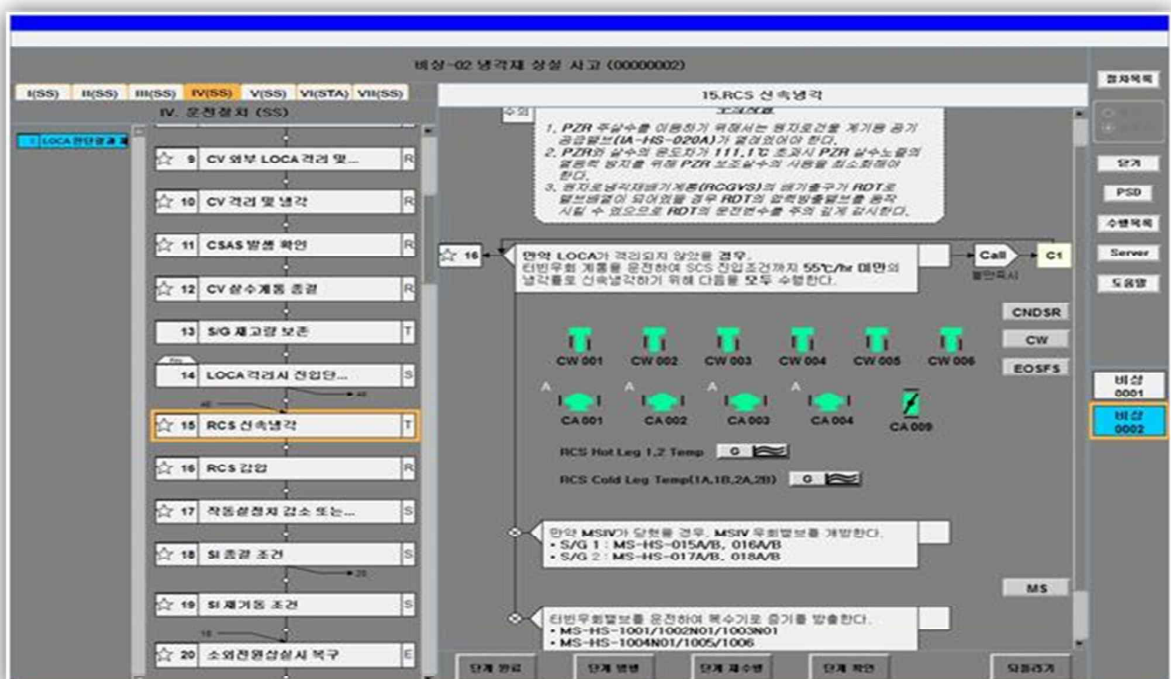
정연섭

한국수력원자력 중앙연구원

# 직무분석과 전산화절차서의 정형화된 MMIS 개발

Yeonsub Jung(ysjung62@khnp.co.kr)  
Korea Hydro Nuclear Power Co.

## 전산화절차서시스템 화면

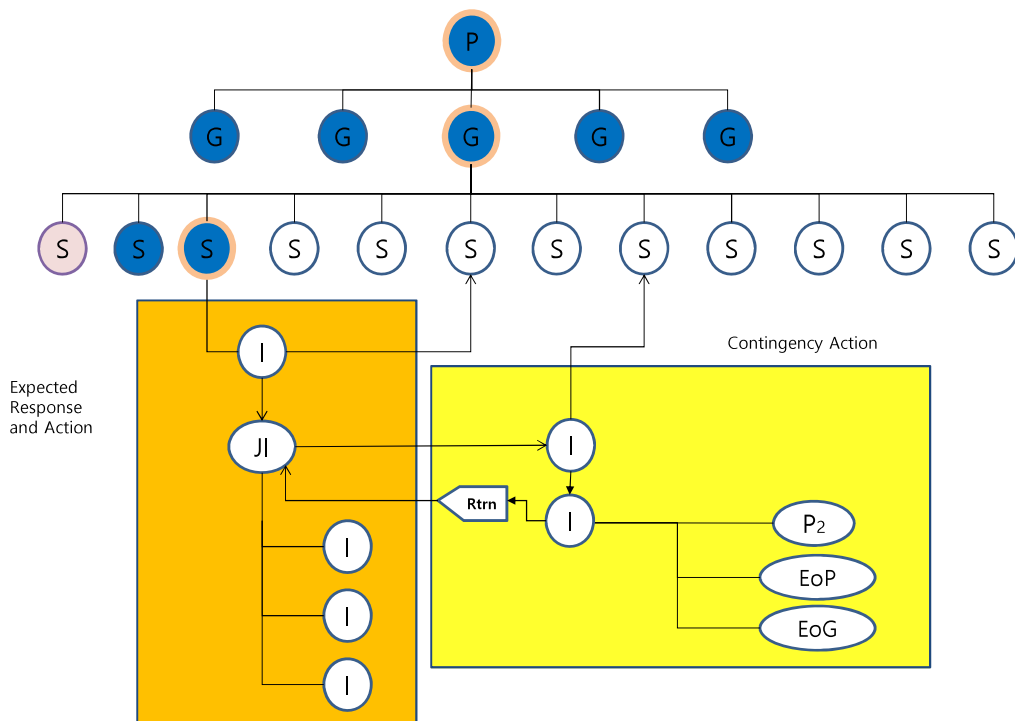




## 전산화절차서시스템 특성

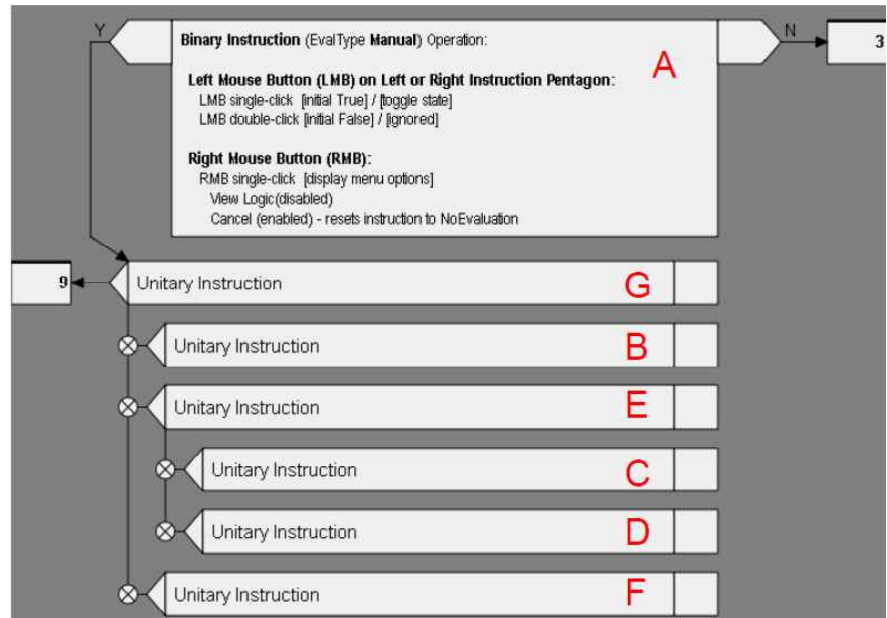
- 발전소 상황에 적합한 단계 제시
- 운전원간 수행중인 단계 공유
- 절차 수행의 Place-Keeping 표시
- 절차 수행에 필요한 발전소 정보 표시
- 절차서의 수동 및 자동 평가 및 다음 단계 제시
- 동적인 발전소 상태에 따라 지시문의 수행상태 변경 가능 (Token 부여)

## 전산화절차서의 구성요소



## 흐름 논리도(Flowlogic Diagram)

- 절차서의 구성요소인 단계 이하의 지시문 순서 표시
- APR1400 고유



## 직무분석과 최신 논리학의 명제

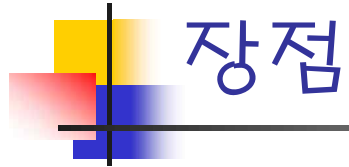
- 논리 명제 (명제논리학)형 지시문
  - 가압기 압력이 45기압 이상이다.
  - SG2에서 파단이 발생하였다.
  - If-Then: 그가 네 오빠면(F) 나는 니 엄마다(F). 논리명제에서는 T
- 술어 명제(술어논리학)형 지시문
  - 인간인 인간공학자가 없다.  $\forall X \text{ HFE}(X) \rightarrow \sim \text{Human}(X)$
- 양상 명제(양상논리학)형 지시문
  - 물을 주입하면 증기폭발이 일어날 수 있다.
  - 그가 네 **진짜** 오빠면(F) 나는 니 엄마다(F). 양상명제에서는 F
- 일반 지시문
  - V101을 개방하라
  - 가압기 압력이 45 이상인가?
  - 조심하여 운전하라

## 절차서 명제로의 전환

- 지시문을 절차서 명제로의 전환 근거와 원리
  - 참 거짓보다 읽고(○) 수행하면(⊙)참
  - 절차서는 발전소를 원하는 상태로 변화시키는 목적 (언어행위)
  - 명령대로 실행되었으면 "참"
  - 의문문의 경우 대답이 Yes이면 "참"
  - 주의문의 경우 읽고 준수하면 "참"
  - 지시문에 다치논리 적용 Null/True/False/NA
- 절차적 명제로의 전환 예
  - V101을 개방하라 -> 개방 완료 후에 "참"
  - 가압기 압력이 45 이상인가? -> 45 이상이면 "참"
  - 조심하여 운전하라 -> 읽고 이해하면 "참"

## 정형화된 MMIS

- 제어논리는 CLD 기반으로 정형화
- 감시 및 제어는 P&ID 기반으로 정형화
- 전산화절차서 MMI의 정형화 원칙
  - 숲은 개요창에 대응
  - 나무는 단계창에 대응
  - Flowlogic Diagram으로 지시문 표현
  - 지시문은 Flowlogic 흐름에 따라 수행되지만, 수행 후에도 Token을 보유하여 수행 상태 변경 가능
  - 단계 수행이 완료되면 지시문의 Token은 반납됨



## 장점

---

- 지시문의 흐름이 명확
- 이중컬럼에 비해 Place-Keeping 명확

---

Diagnosis of abnormal conditions in  
nuclear power plants using artificial  
intelligence

---

박지훈

조선대학교

# Diagnosis of abnormal conditions in nuclear power plants using artificial intelligence

Ji Hun Park, Man Gyun Na \*

Chosun University



## Contents

**01** | Introduction

**02** | AI for diagnosing abnormal conditions

**03** | Classification performance comparison

**04** | Conclusion



# 01 Introduction

## 01 Introduction

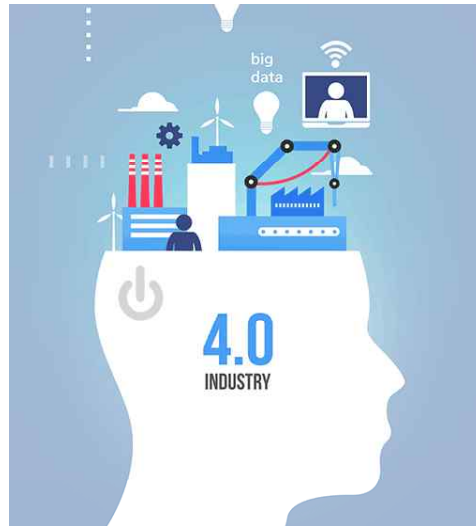
### ■ Background

- This study was carried out as part of the tasks aimed at developing plant condition diagnosis and prediction using artificial intelligence and optimization of abnormal state safety measures.
  - ✓ The long-running Nuclear Power Plants (NPPs) have a higher frequency of failure than the newly constructed NPPs due to the aging of the equipment, and it can lead to major accidents by combining minor failures and human error.
  - ✓ As a result, recent researches on the management of long-term aging NPPs have been focused on, and interest in them has increased.
  - ✓ In the field of NPPs instrument and control, there is a need to efficiently and safely manage NPPs by developing a program that can preemptively diagnose failures of measuring instruments and safety critical system facilities using the 4<sup>th</sup> industrial revolution technology.
  - ✓ It is expected to contribute to the promotion of NPPs safety through the development and application of innovative technologies such as artificial intelligence as the basic research on the core technologies of the 4<sup>th</sup> industrial revolution applicable to the NPPs.

# 01 Introduction

## ■ Objective

- Utilize the available simulator to collect NPPs abnormal scenario.
- Based on the collected scenarios, various AI models are applied to perform the diagnosis.
- Perform qualitative assessment of which AI model is good among various AI models.

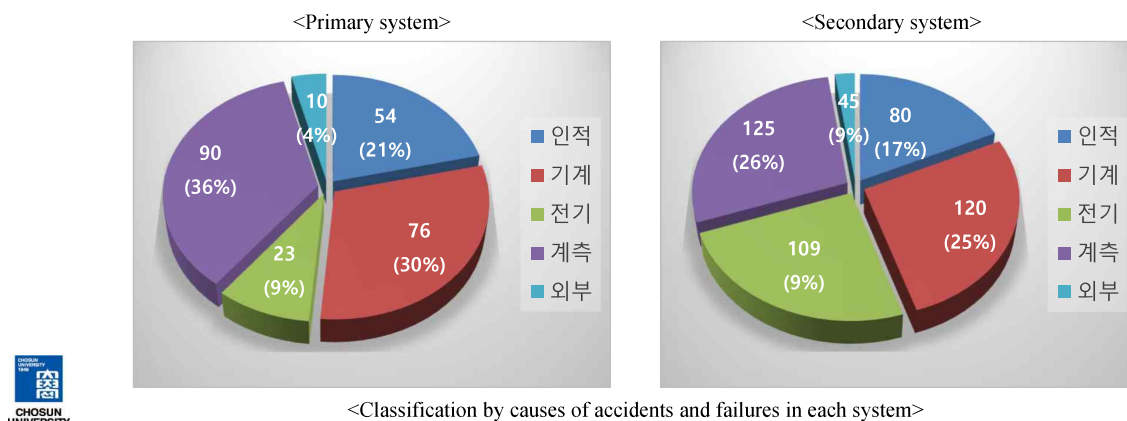


## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

### ■ Simulation of abnormal conditions data in NPPs

- In order to collect abnormal state data in the NPPs, the accident and failure cases of the NPPs were investigated and analyzed.
  - ✓ The information on the accidents and failures of domestic NPPs that occurred between 1978 and 2018 through the Operational Performance Information System for NPPs operated by the Korea Institute of Nuclear Safety was specifically identified as the cause, system of occurrence, and contents of the incident.

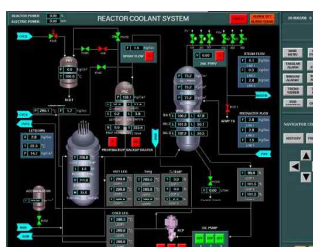


## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

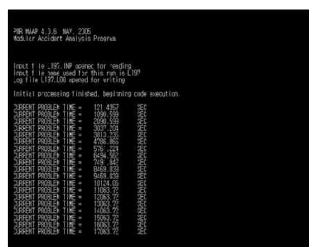
### ■ Simulation of abnormal conditions data in NPPs

- Investigation on accidents and failures of NPPs selected abnormal conditions such as instrument defects, equipment failures, and pipe leakages, which are the main causes of accidents and failures.
  - ✓ The 23 abnormal scenarios have been selected that could be implemented in a variety of simulators that are currently available.

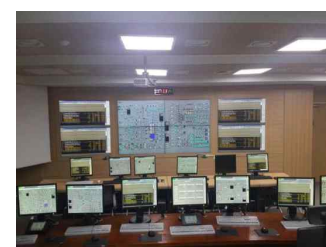
<The simulators used for building the abnormal database>



<Compact Nuclear Simulator (CNS)>  
[WH-900 type]



<Modular Accident Analysis Program (MAAP)>  
[OPR-1000 type]



<KINGS simulator>  
[APR-1400 type]

## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

### Simulation of abnormal conditions data in NPPs

- The selected abnormal scenarios are shown in the following table.

Number	Abnormal classification	System	Abnormal scenario
1	Instrument defects [#10]	Primary	Pressurizer pressure channel failure (High / Low)
2		Primary	Pressurizer water level channel failure (High / Low)
3		Secondary	Steam generator pressure channel failure (High / Low)
4		Secondary	Steam generator water level channel failure (High / Low)
5		Secondary	Main steam flow channel failure (High / Low)
6	Equipment failures [#8]	Primary	Dropping control rods
7		Primary	Continued insertion and withdrawal of control rods
8		Primary	Pressurizer PORV failure
9		Primary	Pressurizer safety valve failure
10		Primary	Pressurizer spray valve failure
11		Primary	Charging pump failure stop
12		Secondary	Main feedwater pump stop
13		Secondary	Main steam line isolation
14	Pipe leakages [#5]	Primary	Letdown flow path leakage
15		Primary	Letdown heat exchanger tube rupture
16		Primary	Charging water line leakage
17		Primary	Loss of coolant accident
18		Secondary	Steam generator tube rupture



9

## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

### Simulation of abnormal conditions data in NPPs

- Input and output variables were selected for 23 abnormal scenarios to classify abnormal condition by referring to abnormal procedure.

절차서 명	작무 스텝	작무	작무동사	정보	작무형태	입력	출력
절차서	스텝	작무	동사	정보	Task type	Input	Output
비정상-20-01	2	압력 및 중량 확인					
가압기 수위 채널 BB-LT459 고장 '고'	2.1	수위 선택 스위치를 확인한다	확인한다	수위선택스위치	확인	수위 선택 스위치 (BB-LT459)	
	2.1.1	"PZR CONT LVL HIGH HTRS ON" 경보가 발생했는지 확인한다	확인한다	PZR CONT LVL HIGH HTRS ON	확인	Alarm: PZR CONT LVL HIGH HTRS ON	
	2.1.2	PZR LVL HIGH ALERT 경보를 확인한다	확인한다	PZR LVL HIGH ALERT	확인	Alarm: PZR LVL HIGH ALERT	
	2.1.3	PZR CH A WTR LVL HIGH(RT) 상태들이 중동되었는지 확인한다	확인한다	상태동	확인	PZR CH A WTR LVL HIGH(RT) 상태동	

<Task analysis results of WH-900 pressurizer water level channel failure high scenario>

절차서 명	작무 스텝	작무	작무동사	정보		작무형태	입력	출력	
절차서	스텝	작무	동사	정보	정보특성	기준값	Task type	Input	Output
비정상-3451B 가압기 수위 감소	2.0	경보 및 중량							
	2.1	선택된 가압기 수위 채널(RC-LT-110X/110Y) 고장 '고' (fall High)							
	2.1.1	주제어실 경보창에 다음과 같은 경보가 발생한다	확인한다	LEVEL ERROR HI	경보	발생	확인	Alarm: LEVEL ERROR HI	
			확인한다	LEVEL HI/LO	경보	발생	확인	Alarm: LEVEL HI/LO	
	2.1.2	유출유량(CV-R1-202A) 증가	확인한다	유출유량	parameter	증가	확인	유출유량(CV-R1-202A)	
	2.1.3	선택된 가압기 수위 지시계(RC-LT-110XA/110YA) 및 수위 기록계(RC-LR-110) 고수위 지시	확인한다	가압기 수위 지시계	parameter	고수위	확인	가압기 수위 지시계 (RC-LT-110XA/110YA)	

<Task analysis results of OPR-1000 pressurizer water level channel failure high scenario>

절차서 명	작무 스텝	작무	작무동사	정보	작무형태	입력	출력
절차서	스텝	작무	동사	정보	Task type	Input	Output
비정상-3451-02	4.1.1	다음 경보가 발생한다.					
		PZR Level PRV TSB	확인한다		확인	PZR Level PRV TSB	
		P1 (P1 PZR Level Alarm) (Alarm TSB)	확인한다		확인	P1 PZR Level AUTO Selection TSB	
		PZR Level Channel DEV	확인한다		확인	PZR Level Channel DEV	
		PZR Level HI	확인한다		확인	PZR Level HI	
		PZR Level (High Toward) Error	확인한다		확인	PZR Level (High Toward) Error	
	4.1.1.가	보지 지면 시 가압기 설계수위가 감소되어 여과의 불충족에 도달하면 경보가 발생한다.	확인한다		확인	PZR Level(Low Toward) Error	
		PZR Level Lo	확인한다		확인	PZR Level Lo	

<Task analysis results of APR-1400 pressurizer water level channel failure high scenario>



10

## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

### ■ Simulation of abnormal conditions data in NPPs

- The variables collected through task analysis are as follows.

Simulator type	CNS	MAAP	KINGS
Number of selected variables	137	60	1215

- NPPs process variables selected through task analysis are shown in the following table.

CNS	MAAP	KINGS
CHARGING FLOW CONTROL VALVE(PV12) POSITION	Time	Time
FW CONTROL VLV #1 POS(0-1)	FPZ	alCVFAH002 02 output
FW BYPASS VLV #1 POS(0-1)	ZWPZ	alCVFAH002 03 output
FW CONTROL VLV #2 POS(0-1)	TWPZ	alCVFAH011 01 output
FW BYPASS VLV #2 POS(0-1)	PBS	alCVFAH011 03 output
FW CONTROL VLV #3 POS(0-1)	BUS	alCVFAH011 03 output
FW BYPASS VLV #3 POS(0-1)	ZWBS	alCVFAH012 01 output
HP TURBINE STOP VALVE POSITION(0-1)	ZWUS	alCVFAH012 02 output
HP TURBINE BYPASS VALVE POSITION(0-1)	QZHT	alCVFAH012 03 output
GLAND SEAL STEAM VALVE POSITION(0-1)	PRB(1)	alCVFAH013 01 output
45(HV) GPM ORIFICE VALVE POSITION	TWRB(1)	alCVFAH013 02 output
45(HV2) GPM ORIFICE VALVE POSITION	TWRB(1)	alCVFAH013 03 output
EXCESS LETDOWN VALVE(HV4) POSITION	ZWRWST	alCVFAH014 01 output
HV6 VALVE POSITION	ZWRB(1)	alCVFAH014 02 output
LETDOWN ISOLATION VALVE(VS9) POSITION	ZWRB(3)	alCVFAH014 03 output
POWER OPERATED RELIEF VALVE(PV44) POSITION	ZWRB(3)	alCVFAH015 02 output
PSV10 VALVE POSITION	ZWRB(4)	alCVFAH165 03 output
PV145 VALVE POSITION(0-1-0)	ZWRB(3)	alCVFAH018 output
REHEATER STOP VALVE POSITION(0-1)	ZWRB(6)	alCVFAH024 01 output
TV143 LETDOWN TEST/ DEMINERALIZER DEVERT VALVE POSITION	WWBB	alCVPAH024 output
STEAM DUMP VALVE POS(0-1)	WGDB	alCVPAH035 output
PV101 VALVE POSITION(0-0-1-0)	WWUB	alCVPAH006 02 output
PV102 VALVE POSITION(0-0-1-0)	WU3B	alCVPAH007 01 output
PV201 VALVE POSITION(0-0-1-0)	WWFWBS	alCVPAH007 02 output
PV202 VALVE POSITION(0-0-1-0)	WWFWLS	alCVPAH001 output
PV301 VALVE POSITION(0-0-1-0)	QDEYAY	alCVPAH004 01 output
PV302 VALVE POSITION(0-0-1-0)	WUWY	alCVPAH004 02 output
CONTROL BANK A POSITION	WGRV	alCVTAH003 output
SPEED SETPOINT RPM	WWBST	alCVTAH036 output
ACCELERATION SETPOINT	WUHSST	alCVTAH04 02 output
TURBINE SPEED RPM	WUUSB	alCVTAH04 03 output
SHUTDOWN BANK D POSITION	WWRD	alCVTAH07 02 output
SHUTDOWN BANK C POSITION	WSTRD	alCVTAH07 03 output
SHUTDOWN BANK B POSITION	W(3)	alCVTAH11 01 output
SHUTDOWN BANK A POSITION	W(4)	alCVTAH11 02 output
CONTROL BANK D POSITION	W(5)	alCVTAH12 01 output
CONTROL BANK C POSITION	W(6)	alCVTAH12 02 output
CONTROL BANK B POSITION	W(7)	alCVTAH025 output
BOIC ACID INJECTION VALVE (PV610) STATUS	W(8)	alCVTAH025 output
MAKEUP WATER INJECTION VALVE (PV613) STATUS	W(9)	alCVTAH022 01 output

## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

### ■ Simulation of abnormal conditions data in NPPs

Devision	Abnormal scenario	CNS (WH-900)	MAAP (OPR-1000)	KINGS (APR-1400)	Number of data
Instrument defects	Pressurizer pressure channel failure (High / Low)	41	-	-	41
	Pressurizer water level channel failure (High / Low)	23	201	8	232
	Steam generator pressure channel failure (High / Low)	-	-	-	0
	Steam generator water level channel failure (High / Low)	80	-	-	80
	Main steam flow channel failure (High / Low)	-	-	-	0
Equipment failures	Dropping control rods	48	-	5	53
	Continued insertion and withdrawal of control rods	16	-	-	16
	Pressurizer PORV failure	50	-	-	50
	Pressurizer safety valve failure	50	-	-	50
	Pressurizer spray valve failure	50	101	-	151
	Charging pump failure stop	1	-	-	1
	Main feed-water pump stop	3	-	6	9
	Main steam line isolation	3	-	4	7
Pipe leakages	Letdown flow path leakage	50	-	8	58
	Letdown heat exchanger tube rupture	50	-	4	54
	Charging water line leakage	30	-	-	30
	Loss of coolant accident	30	200	-	230
	Steam generator tube rupture	36	100	-	136
Total number of data		560	602	35	1,197

## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

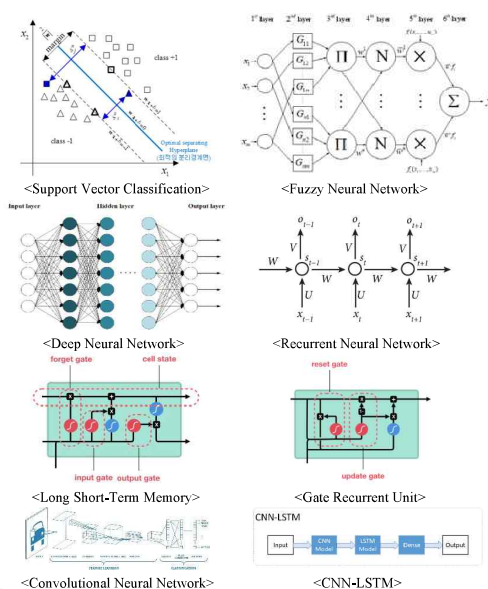
### ■ AI used for abnormal conditions classification models

- A total of 8 AI models were used and are part of the machine learning and deep learning models.
- The used model is as follows.
  - ✓ Support Vector Classification (SVC)
  - ✓ Fuzzy Neural Network (FNN)
  - ✓ Deep Neural Network (DNN)
  - ✓ Recurrent Neural Network (RNN)
  - ✓ Long Short-Term Memory (LSTM)
  - ✓ Gate Recurrent Unit (GRU)
  - ✓ Convolutional Neural Network (CNN)
  - ✓ CNN-LSTM (CLSTM)

## 02 AI for diagnosing abnormal conditions

### ■ AI used for abnormal conditions classification models

- Introduction of used AI models



AI model	Main characteristic
SVC	Kernel function, Mapping the data to higher dimensions Support vector, maximum-margin hyperplane
FNN	Fuzzy Inference System + Neuronal Training System Membership function (Gaussian distribution)
DNN	Input layer – Hidden layers – Output layer (Feed-forward) Optimization : Backpropagation through error
RNN	Specializing in time series data, Hidden state (Update) Previous value affects current, Vanishing gradient problem
LSTM	Solve the vanishing gradient problem of RNN Memory block (Input gate, Output gate, Forget gate), Cell state
GRU	Solve the vanishing gradient problem of RNN Update gate, Reset gate, Structurally simple than LSTM
CNN	Convolution, Pooling, Flatten, Fully connected Feature extraction, Image processing specialization
CLSTM	Input – CNN model – LSTM model – Dense – Output Feature extraction (CNN) and time series (LSTM)



## 03 Classification performance comparison

## 03 Classification performance comparison

### ■ AI implementation

- The previously published AI was used to evaluate the performance of abnormal conditions diagnosis.
  - ✓ The purpose of this performance comparison is to **derive the optimal AI model for performing abnormal conditions diagnosis.**
  - ✓ The abnormal data collected using CNS, MAAP, and KINGS was applied for AI.
  - ✓ To implement the derived AI, programming code python was used, and tensorflow, keras, and scikit-learn, known as machine learning and deep learning libraries, were implemented.



<Python and machine learning / deep learning library>

# 03 Classification performance comparison

## AI performance evaluation requirements

- Evaluation criteria are required for selection of the optimal AI through AI performance evaluation.
- The performance requirements used to select AI technology are as follows.

Performance requirements	Contents	Range
Accuracy	Whether the actual and predicted values match	0% ~ 100%
Loss	Error between actual and predicted values	-
Training performance	Minimum epoch required to reach target performance	0 ~ 50 Epoch
Diagnosis time	Diagnosis time for untrained abnormal scenarios	-

- The **accuracy** and **loss** can be selected to determine the AI performance by selecting the highest and lowest values, respectively.
- The **training performance** showed how quickly the accuracy reached above a certain level.
- The **diagnosis time** was assumed to have been diagnosed when the probability value calculated by the softmax function was indicated as 99% or more. In addition, diagnosis time was defined as the time taken from malfunction to diagnosis.



17

# 03 Classification performance comparison

## AI performance evaluation requirements

- How to measure the diagnosis time.
- Apply test data to the trained model to compare the predicted results with the actual data. In addition, the model with the highest accuracy was used as the prediction result.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



18

## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with CNS data

- Training was conducted using **CNS [WH-900 type]** data in AI.
- ✓ The results for each AI model are shown in the table below.

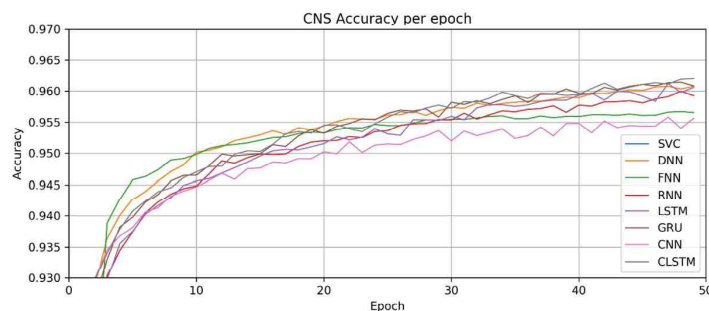
AI model	Non-linear	Time-series	Accuracy	Loss	Training performance [95%]	Diagnosis time
SVC	○	×	<b>53.15%</b>	-	-	<b>Failure</b>
FNN	○	×	95.67%	0.10885	12 Epoch	+9 sec
DNN	○	×	96.07%	0.10601	11 Epoch	+7 sec
CNN	○	×	95.58%	0.11020	21 Epoch	+6 sec
RNN	○	○	95.99%	0.11343	19 Epoch	+6 sec
LSTM	○	○	96.12%	0.11169	17 Epoch	+6 sec
GRU	○	○	96.14%	0.11097	17 Epoch	+6 sec
CLSTM	○	○	96.20%	0.10609	15 Epoch	+6 sec

- ✓ The SVC model failed the diagnosis, and the entire diagnosis takes less than 10 seconds.
- ✓ In addition, models with relatively time-series characteristics show slightly better results.

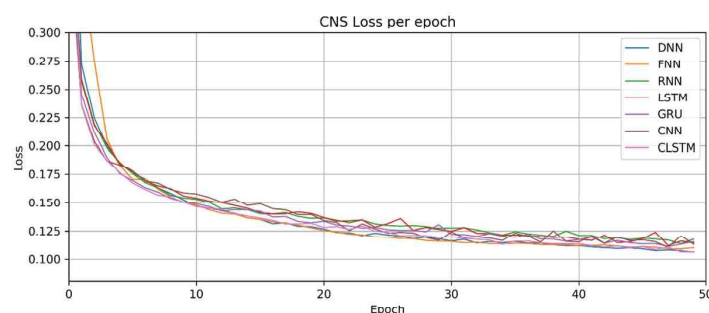
## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with CNS data

- Accuracy and loss representing the training performance are shown in the following graph.



< Accuracy of trained AI models from training data (CNS) >

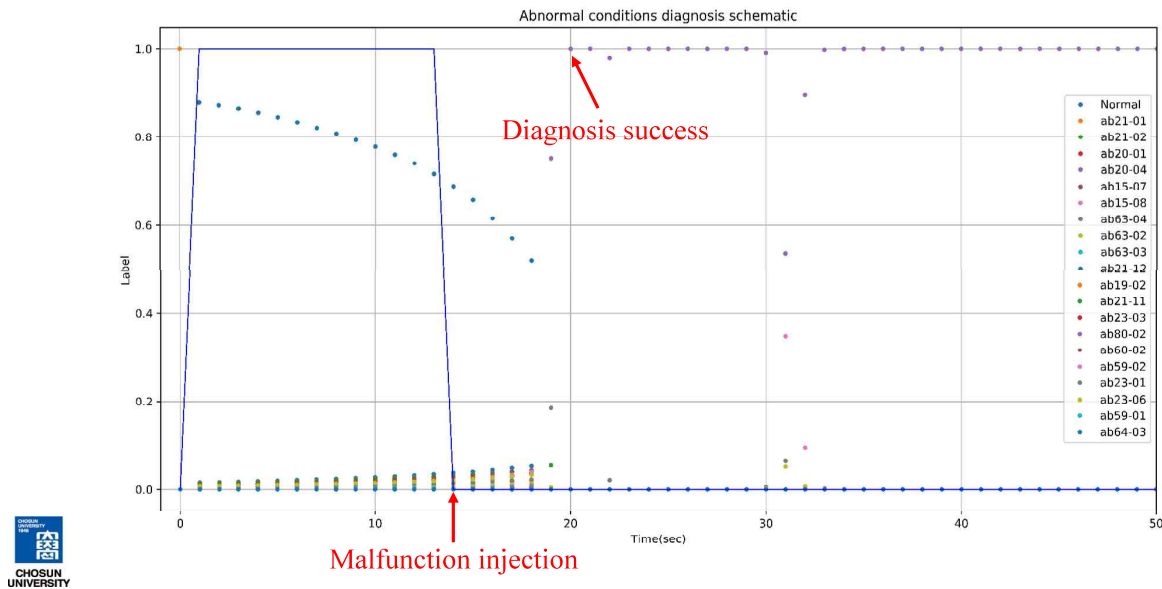


< Loss of trained AI models from training data (CNS) >

## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with CNS data

- Prediction results of the CLSTM model.
  - ✓ Malfunction = Pressurizer water level channel failure Low (ab20-04) and time (blue line) = 12 sec.



21

## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with MAAP data

- Training was conducted using MAAP [OPR-1000 type] data in AI.
  - ✓ The results for each AI model are shown in the table below.

AI model	Non-linear	Time series	Accuracy	Loss	Training performance [98%]	Diagnosis time
SVC	○	×	63.13%	-	-	Failure
FNN	○	×	98.67%	0.04340	16 Epoch	+58 sec
DNN	○	×	98.91%	0.02936	10 Epoch	+25 sec
CNN	○	×	98.89%	0.03129	14 Epoch	+15 sec
RNN	○	○	98.75%	0.03173	14 Epoch	+15 sec
LSTM	○	○	98.78%	0.03118	15 Epoch	+21 sec
GRU	○	○	98.77%	0.03152	14 Epoch	+13 sec
CLSTM	○	○	98.86%	0.03013	14 Epoch	+7 sec

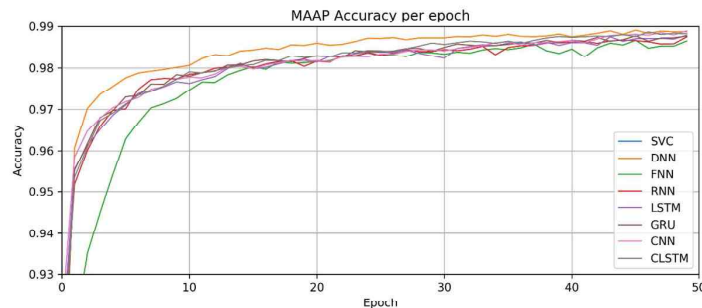
- ✓ As with the previous CNS data, the SVC model failed the diagnosis, and the time-series model showed better results.
- ✓ The reason why the diagnosis time is larger than the diagnosis using CNS data is because of two events, hot-leg LOCA and cold-leg LOCA, which have similar behavior.

22

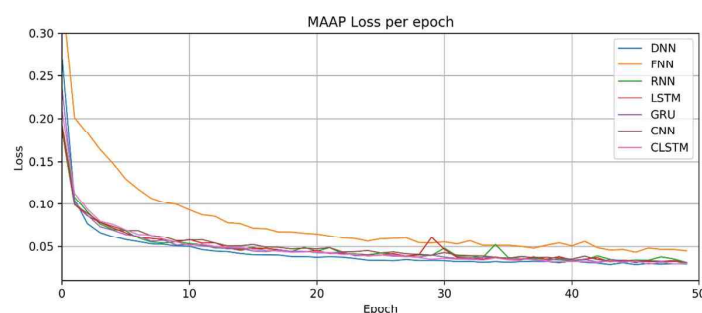
## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with MAAP data

- Accuracy and loss representing the training performance are shown in the following graph.



< Accuracy of trained AI models from training data (MAAP) >

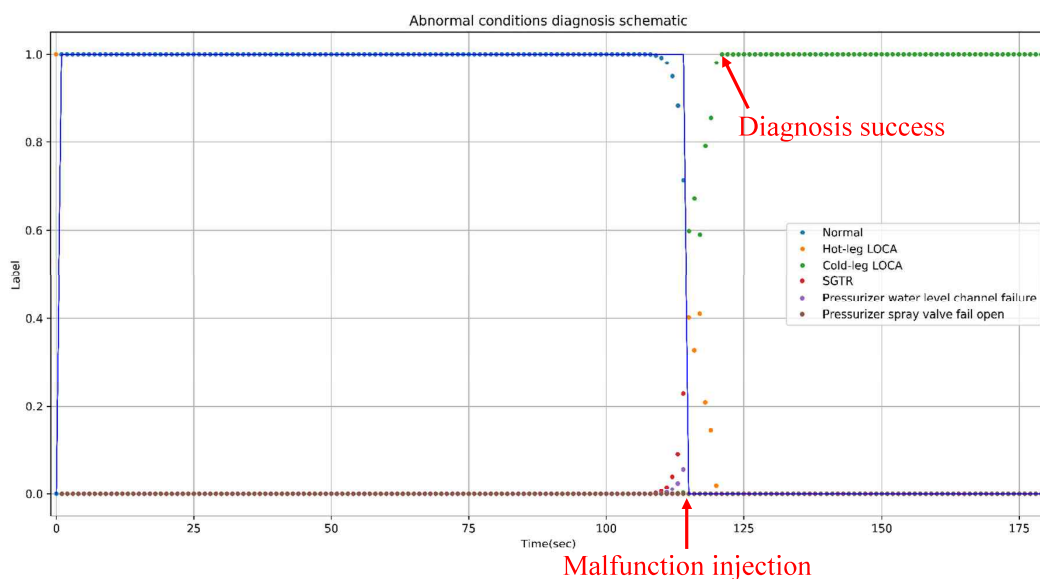


< Loss of trained AI models from training data (MAAP) >

## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with MAAP data

- Prediction results of the CLSTM model.
  - ✓ Malfunction = Cold-leg LOCA and time (blue line) = 113 sec.



## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with KINGS data

- Training was conducted using **KINGS [APR-1400 type]** data in AI.
- ✓ The results for each AI model are shown in the table below.

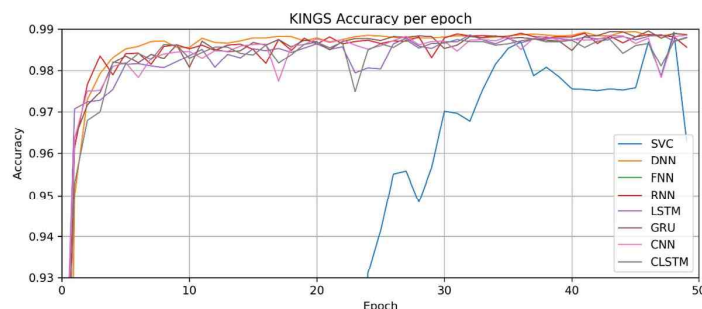
AI model	Non-linear	Time series	Accuracy	Loss	Training performance [98%]	Diagnosis time
SVC	○	×	98.92%	-	35 Epoch	Failure
FNN	○	×	22.29%	2.01330	-	Failure
DNN	○	×	98.93%	0.04314	5 Epoch	+10 sec
CNN	○	×	98.85%	0.04271	5 Epoch	+11 sec
RNN	○	○	98.89%	0.04292	4 Epoch	+10 sec
LSTM	○	○	98.86%	0.04216	6 Epoch	+10 sec
GRU	○	○	98.95%	0.04156	5 Epoch	+11 sec
CLSTM	○	○	98.78%	0.04566	5 Epoch	+10 sec

- ✓ In the case of KINGS data, it was smaller than the other two data, and reached the target accuracy in a short time.
- ✓ In addition, the SVC model, which is efficient in small data, has also been trained, but failed to diagnose normal data and specific accident data.

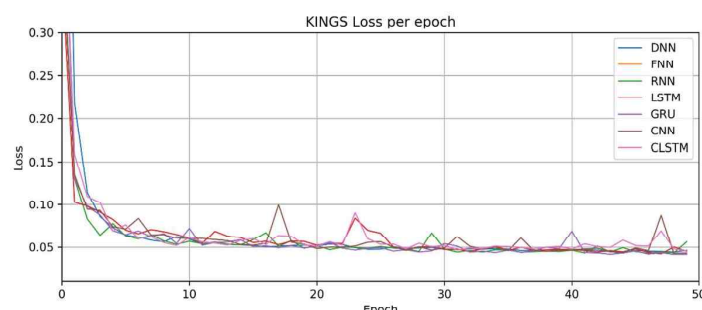
## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with KINGS data

- Accuracy and loss representing the training performance are shown in the following graph.



< Accuracy of trained AI models from training data (KINGS) >

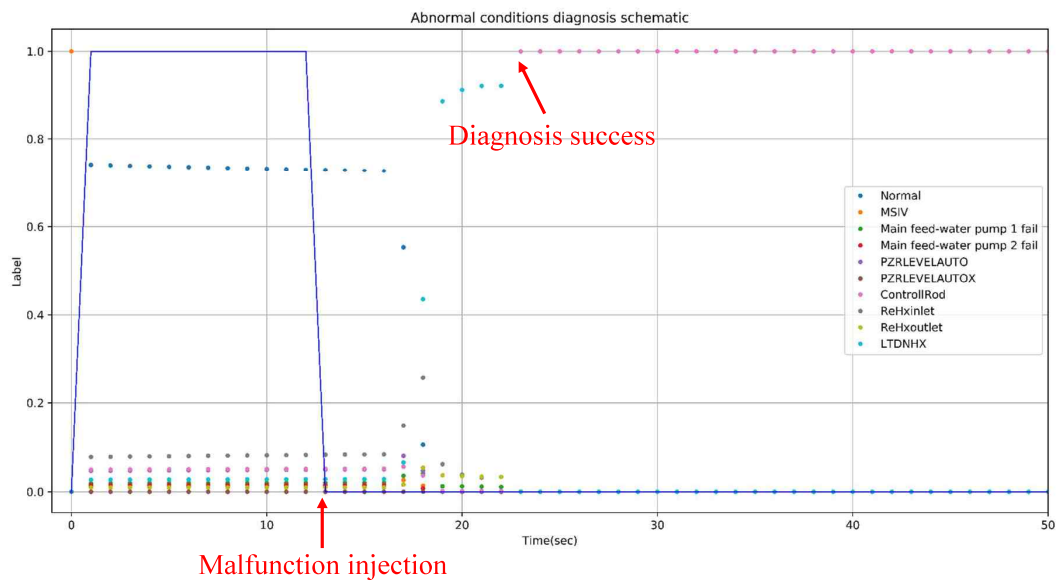


< Loss of trained AI models from training data (KINGS) >

## 03 Classification performance comparison

### ■ Performance of AI trained with KINGS data

- Prediction results of the CLSTM model.
  - ✓ Malfunction = Drop or misalign control rod and time (blue line) = 11 sec.



## 04 Conclusion



## 04 Conclusion

### ■ Summary and Conclusion

- 23 abnormal data were obtained from a available simulator (CNS, MAAP, KINGS) for simulating abnormal scenarios in NPPs.
- Python was used to apply AI, and machine learning and deep learning frameworks such as tensorflow, keras, and scikit-learn were used.
- 4 requirements were used to evaluate AI performance: **accuracy, loss, training performance, and diagnosis time.**
- As a result, since the NPPs has time series data, **the model having time series characteristics shows relatively good results.**

### ■ Future plan

- Complementary aspects of model and data.
  - ✓ AI model optimization and application of additional AI models.
  - ✓ Verification of previously collected data and diversification of malfunction time.
  - ✓ Construct additional abnormal scenario data that can be simulated.
  - ✓ Detecting abnormal scenarios as well as deriving related procedures and components.



**Thank you  
for your attention**

---

An intelligent operator support system  
for initial emergency responses in  
nuclear power plants

---

강정성

울산과학기술원

# An Intelligent Operator Support System for Initial Emergency Responses in NPPs

Jung Sung Kang

## CONTACT

Jung Sung Kang  
M.S Course  
jungsungkang@unist.ac.kr



**SAPHE**  
NUCLEAR Safety Assessment and Plant HMI Evolution

2

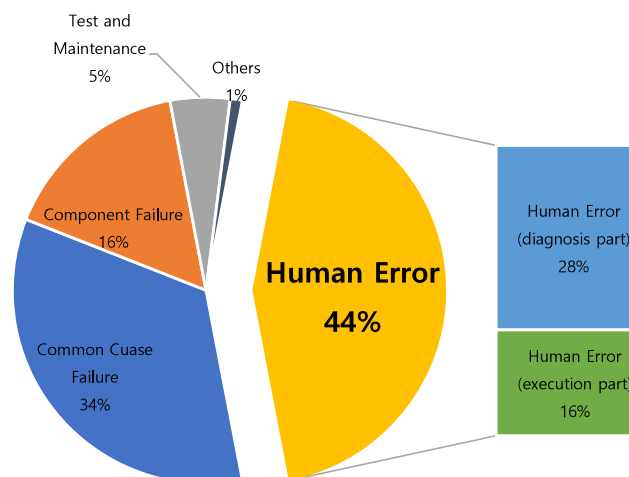
## CONTENTS

1. Introduction	03
2. Framework	13
3. Function Design	16
4. Conclusion	35

# Introduction

## I. Introduction

### Background



### Event contributions to the core damage frequency of a reference plant [1]

[1] Analysis of an Operators' Performance Time and Its Application to a Human Reliability Analysis in Nuclear Power Plants  
Wondea Jung, Jinkyun Park, Jaewhan Kim, and Jaejoo Ha

# I. Introduction

## Background

### Air Algérie Flight 5017 Accident (2014)



- Mechanical Problem (Sensor Failure)
- Emergency Situation → Pilot Panic
- Wrong Decision Making



Occupants/Fatalities: 116/116 (100%)

# I. Introduction

## Background

### Emergency Operation Condition



- Rapid change in parameters
- Heavy Workload
- Time Pressure



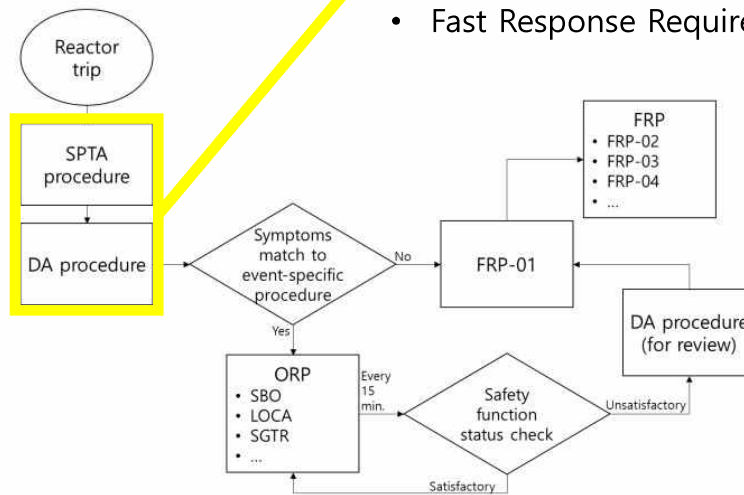
Human Error & Misdiagnosis

# I. Introduction

## Background

## Target Scope

- Simple Tasks
- Fast Response Required



## General Structure of a CE-based EOP system [2]

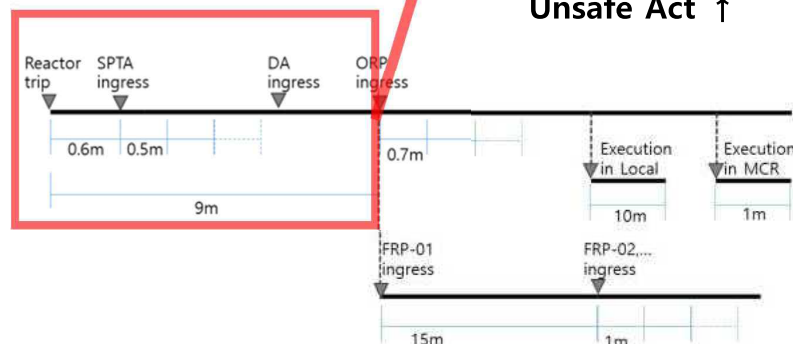
[2] An HRA Method for Digital Main Control Rooms Part I: Estimating the Failure Probability of Timely Performance, KAERI/TR-7607/2019

# I. Introduction

## Background

- Time Pressure
- High Workload

Unsafe Act ↑



## Key estimates in typical timeline [2]

[2] An HRA Method for Digital Main Control Rooms Part I: Estimating the Failure Probability of Timely Performance, KAERI/TR-7607/2019

# I. Introduction

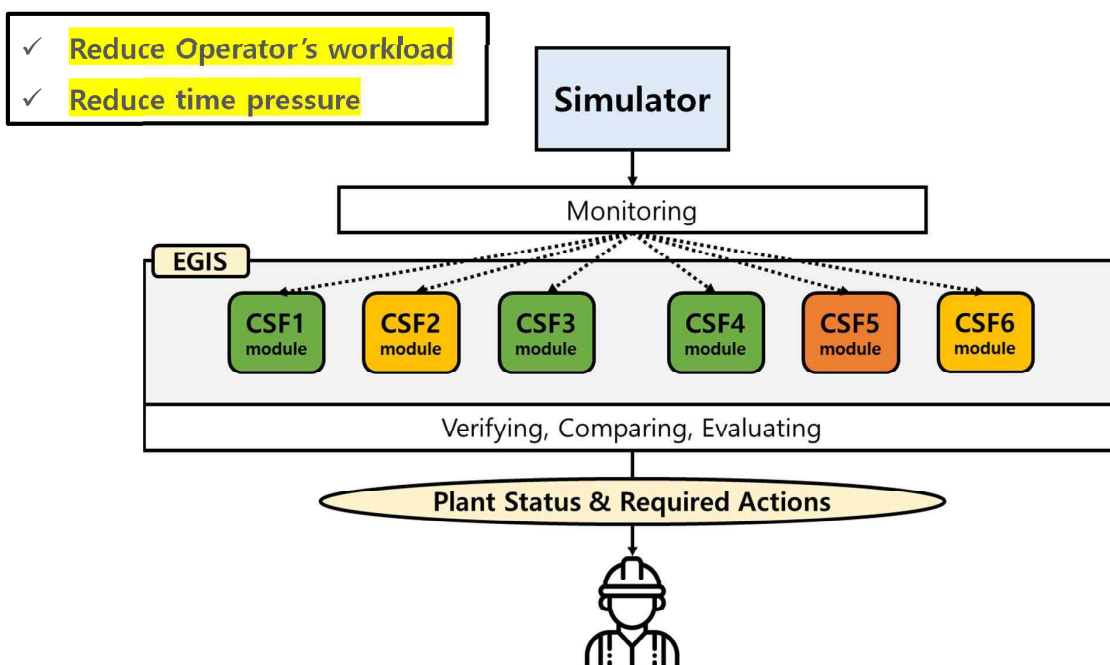
## Objective

### Emergency Guidance Intelligent System(EGIS) Objective

- This system **reduces operator's workload** by automating simple tasks and providing intuitive information.
- This system **saves time for initial responses** by performing tasks in parallel with each CSF module.
- This system **provides an appropriate procedure** after initial responses are finished.

# I. Introduction

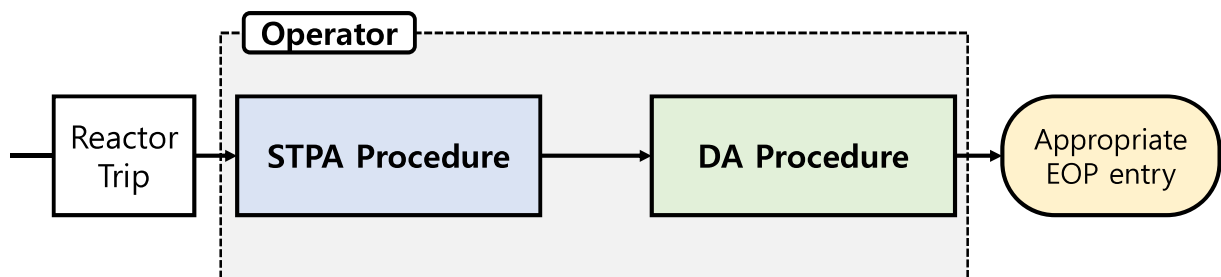
## Structure





# I. Introduction

Timeline

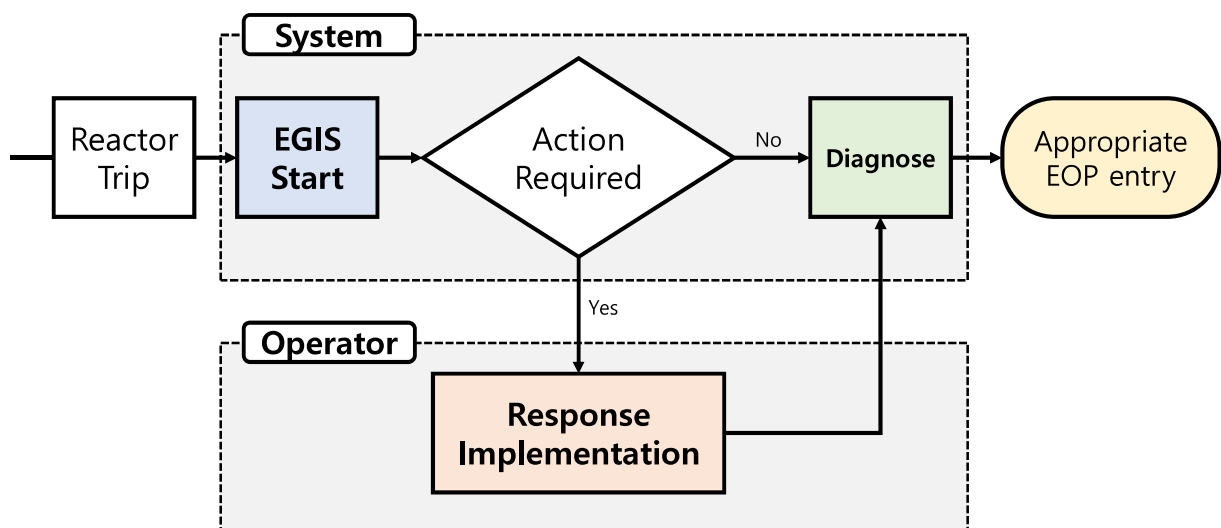


Existing Process in an Emergency Situation

# I. Introduction

Timeline

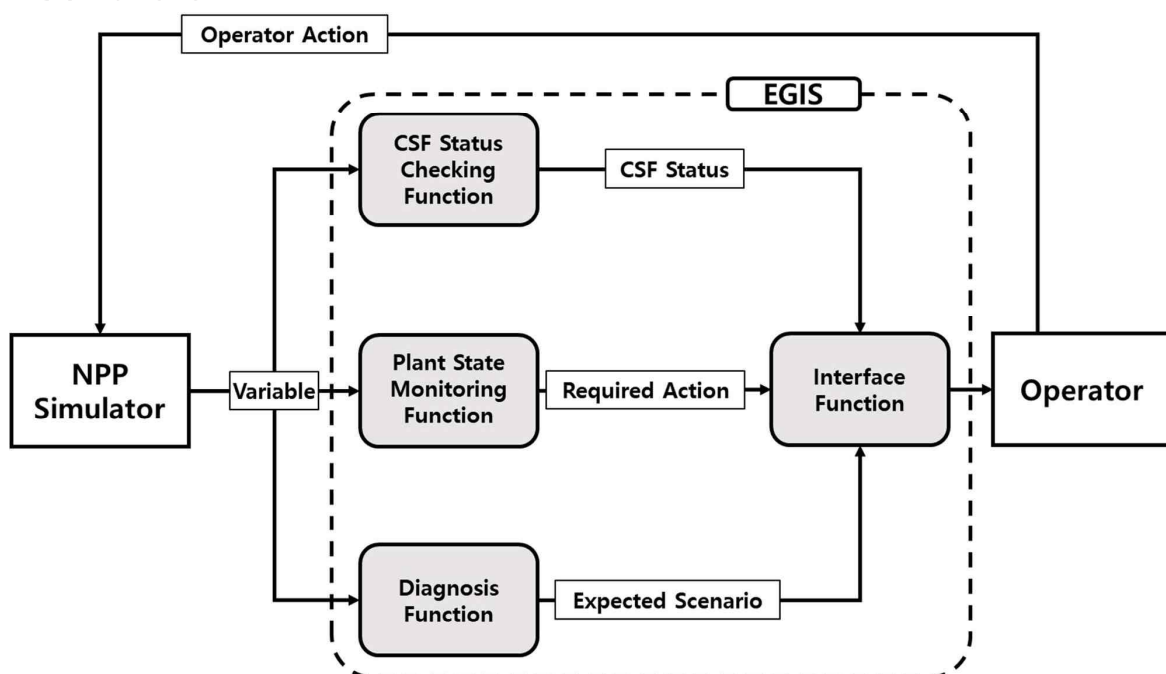
✓ provides an appropriate procedure



# Framework

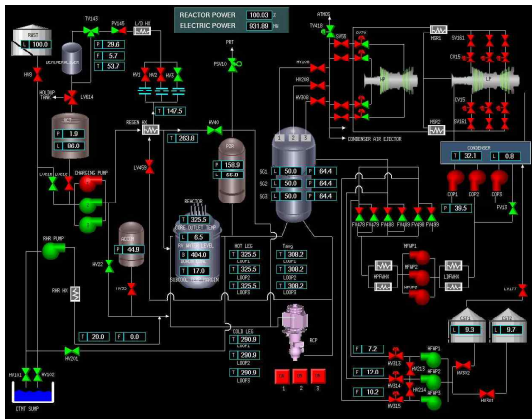
## II. Framework

EGIS Framework



## II. Framework

### Environment



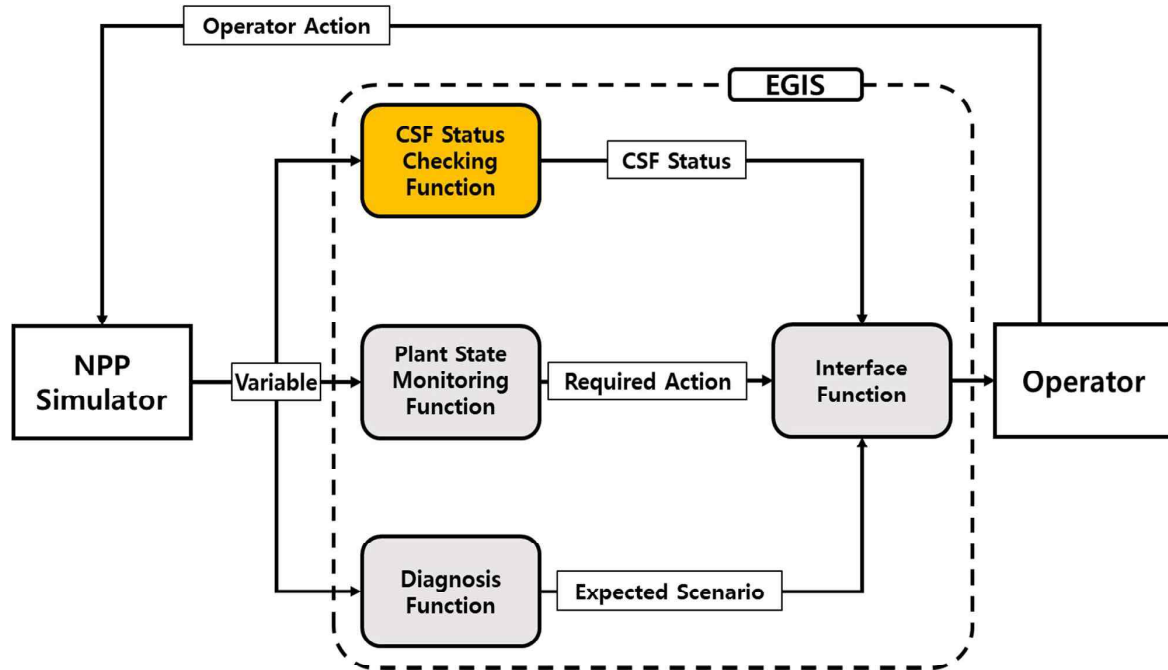
Compact Nuclear Simulator

- Westinghouse PWR
- 930Mwe
- Compact Simulator
- 3 loops

# Function Design

## III. Function Design

### CSF Status Chekcing Function



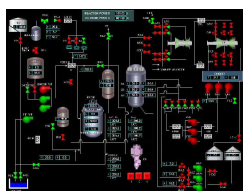
## III. Function Design

### ① CSF Status Checking Function

1. CSF1: Subcriticality
2. CSF2: Core Cooling
3. CSF3: Heat Sink
4. CSF4: RCS Integrity
5. CSF5: Containment Integrity
6. CSF6: RCS Inventory

### CSF Status Color Level

Level	Color	Status
4	Red	Immediate operation action required
3	Orange	Operation action required quickly
2	Yellow	Operator action required partly
1	Green	No operation action required



Real time  
Variable Data



CSF Tree  
Logic Code

```

runtime@localhost:~/JS
File Edit View Search Terminal Help
Cold leg 2 Temperature : 290.8858947753906250
Cold leg 3 Temperature : 290.8876953125000000
PZR Pressure : 55.7817001342773438
Cooling Rate 1 : 0.0000000000000000
Cooling Rate 2 : 0.0000000000000000
Cooling Rate 3 : 0.0000000000000000
Cooling Rate Success : 1.0000000000000000
CSF Status : GREEN
< 75 >
Cold leg 1 Temperature : 290.8929136183593750
Cold leg 2 Temperature : 290.8858947753906250
Cold leg 3 Temperature : 290.8876953125000000
PZR Pressure : 55.7817001342773438
Cooling Rate 1 : 0.0000000000000000
Cooling Rate 2 : 0.0000000000000000
Cooling Rate 3 : 0.0000000000000000
Cooling Rate Success : 1.0000000000000000
CSF Status : GREEN
< 76 >
Cold leg 1 Temperature : 290.8929136183593750
Cold leg 2 Temperature : 290.8858947753906250
Cold leg 3 Temperature : 290.8876953125000000
PZR Pressure : 55.7817001342773438
Cooling Rate 1 : 0.0000000000000000
  
```

CSF Status  
Data

## III. Function Design

### Plant State Monitoring Function

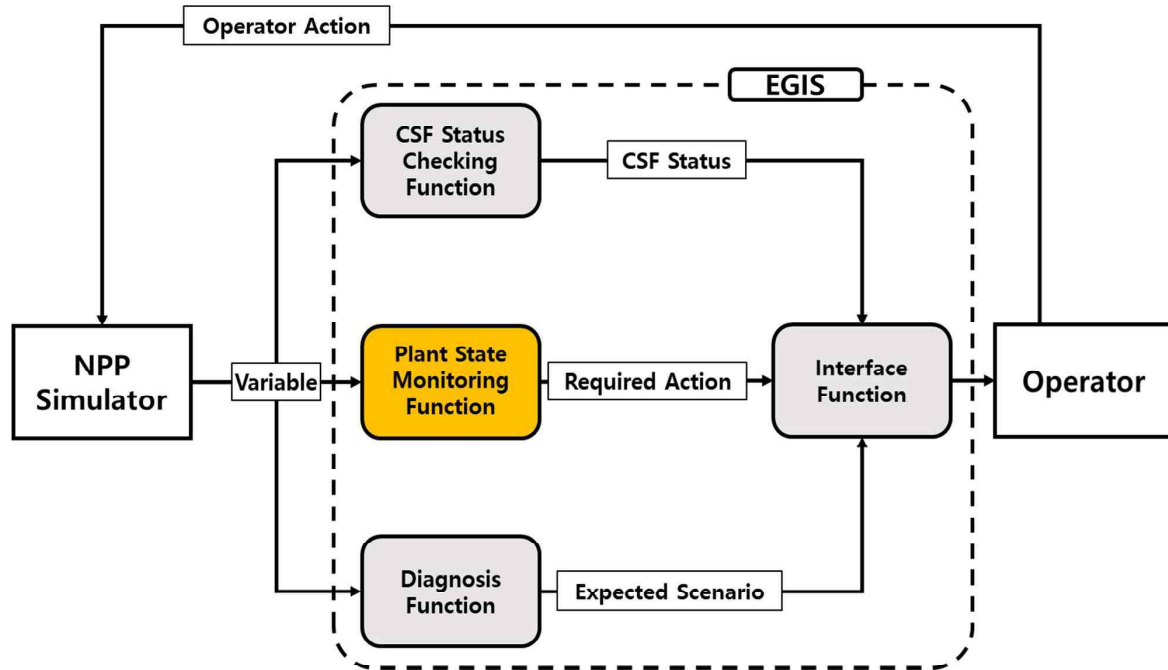


Fig 6. EGIS Framework

## III. Function Design

### Plant State Monitoring Function

- **Procedure based tasks** (ex. ESFAS, RCP stop) + **support system related tasks** (ex. CCW, Electrical System)
- **Process of plant state monitoring Function**
  1. Monitoring
    - ✓ Alarm occurrence (ex. SIAS activation)
    - ✓ State of indicator (ex. Valve open/close state)
    - ✓ Component parameter (ex. Flow rate)
    - ✓ Graph Constraint (ex. P-T curve)
    - ✓ Trend (ex. Graph increase/maintain/decrease)
  2. Comparing: Compare state with embedded condition
  3. Notifying: Notify appropriate tasks when a condition is satisfied
  4. Numbering: Count task number that operators need to check

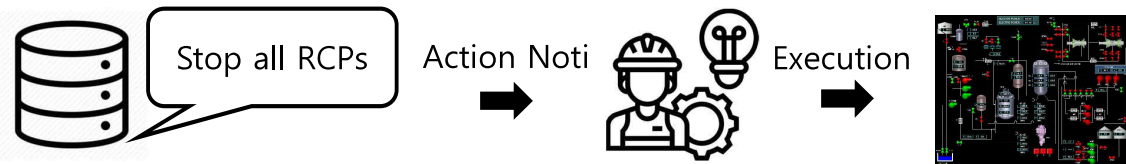
## III. Function Design

### Plant State Monitoring Function

### RCP Stop Task

Action/Expected Response	Response Not Obtained
21.0 Check IF RCPs should be stopped : 21.1 2SI pumps -At least one running 21.2 RCP trip parameter ----- Less than 97Kg/cm2 21.3 Stop all RCPs	21.1 Go to step 22 21.2 Go to step 22
22.0 Inspect if any S/G (Steam Generator) has failed. ...	

If  $KCHRG1 == 1$  or  $KCHRG2 == 1$  or  $KCHRG3 == 1$ :  
 if  $ZINST\ 65 \leq 97\ \text{#[kg/cm}^2\text{]}$   
 Action21.3\_plot



UNIST

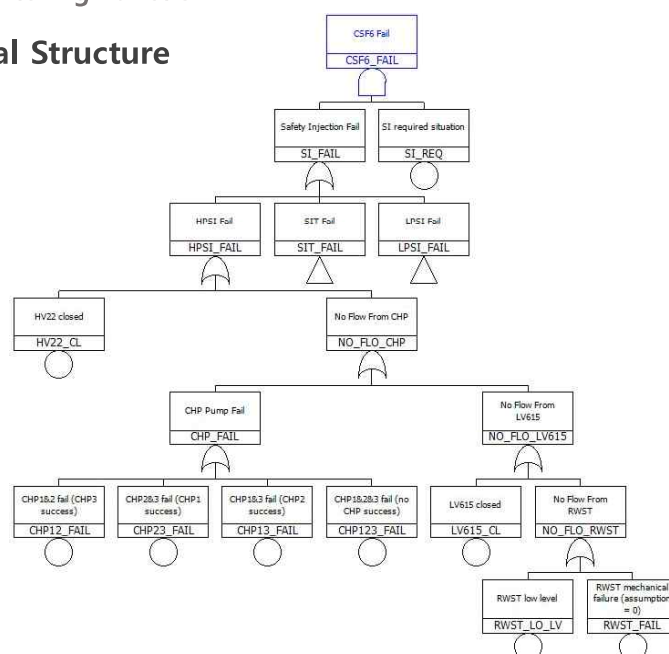
Fig 9. Procedure-based Monitoring Function Process

SAPHE

## III. Function Design

### Plant State Monitoring Function

#### ✓ Hierarchical Structure



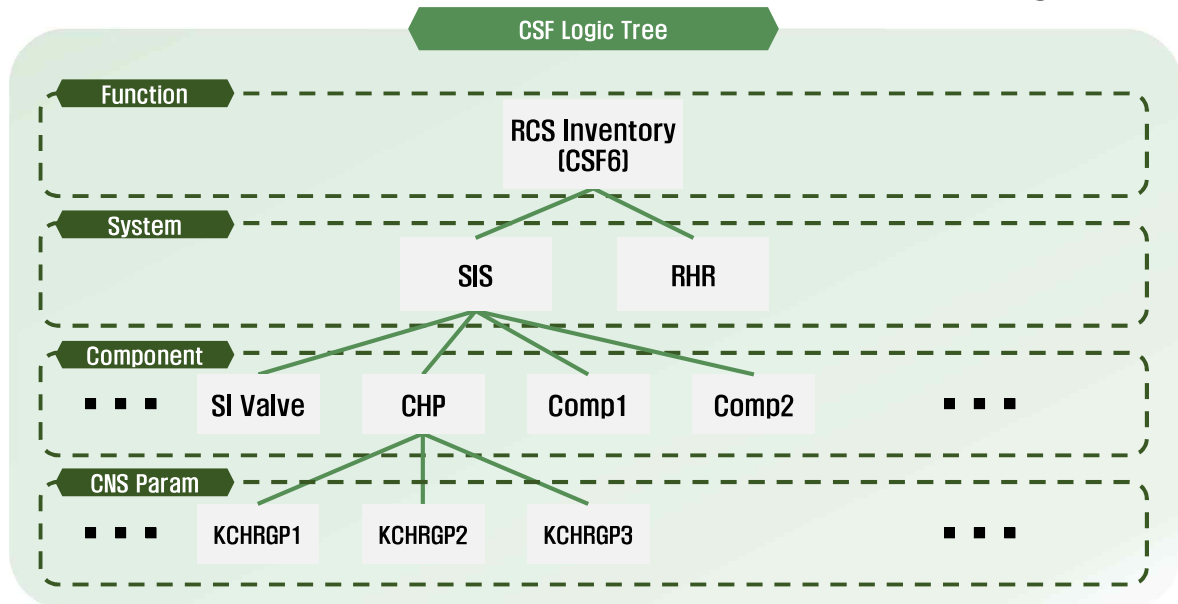
UNIST

SAPHE

### III. Function Design

#### Plant State Monitoring Function

- Provides information about CSF correlation data based on MLD logic



### III. Function Design

#### CSF Status Monitoring Function

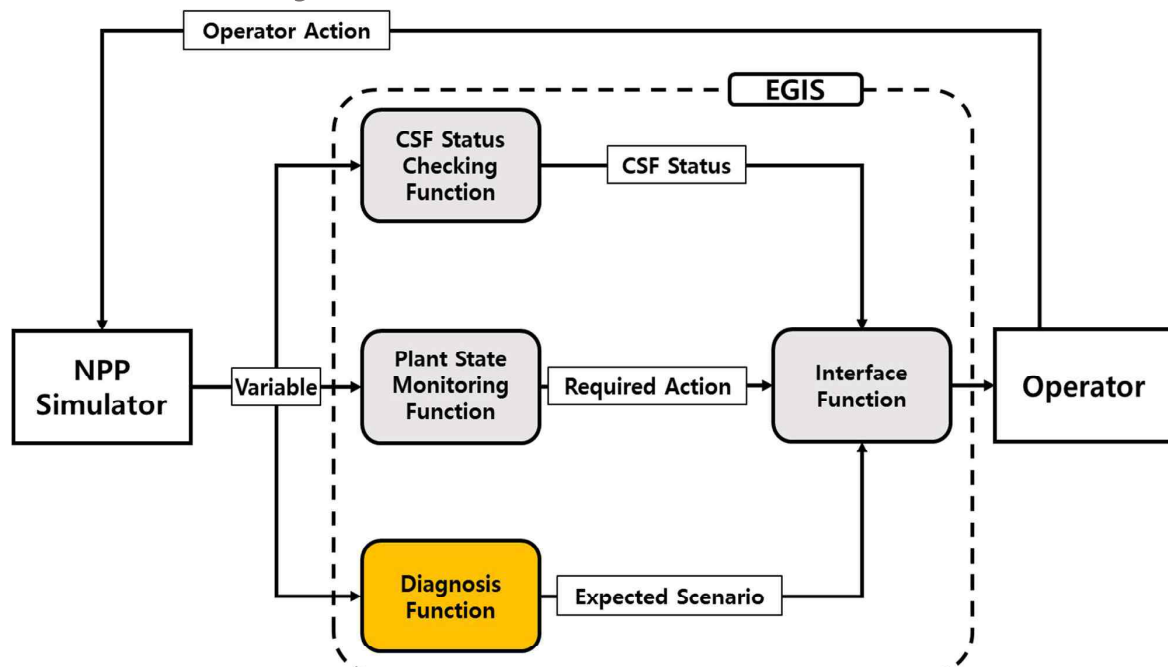


Fig 6. EGIS Framework



## III. Function Design

### Diagnosis Function

#### 1. Model: Gated Recurrent Unit (GRU)

#### 2. Data

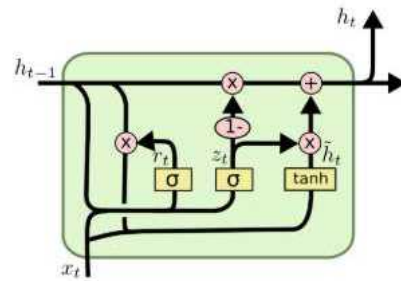
- 900sec / 21 diagnosis parameters
- Simple Trip/LOCA/SGTR/ESDE/LOAF

#### 3. Data set

- Training/validation set : GTRN 1 · LOCA 105 · SGTR 45 · ESDE 90 · LOAF 1, Total : 242
- K-fold validation (fold = 3, validation = 33%)
- Test set : 43 (Same break location, 3 different size (small, medium, large))
- Sensor failure time : 0 sec (0 sec is the most effective time from 0 to 300 sec)

#### 4. Hyper parameters

- Adam, Learning rate : 4.5e-4
- Epoch : 5000
- Binary crossentropy
- Sigmoid, Softmax

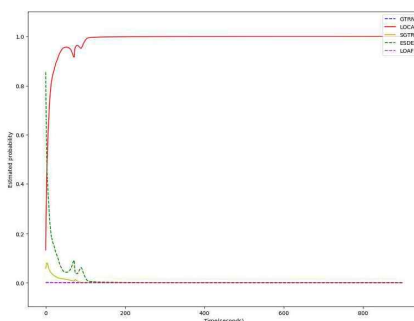


## III. Function Design

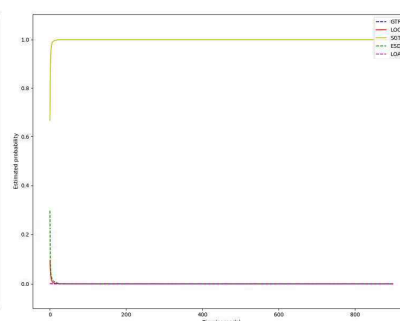
### Diagnosis Function

#### 1. Test Results

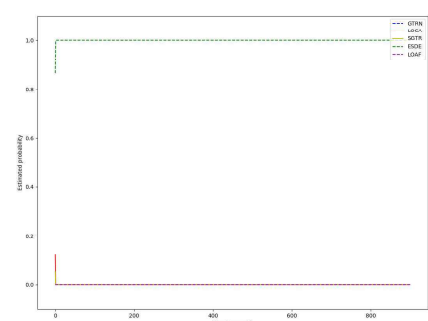
- 43 Tests success
- The bigger break size, the faster and more stable
- Initial prediction is unstable for small break size



LOCA\_CL , break size = 200



SGTR\_1 , break size = 100



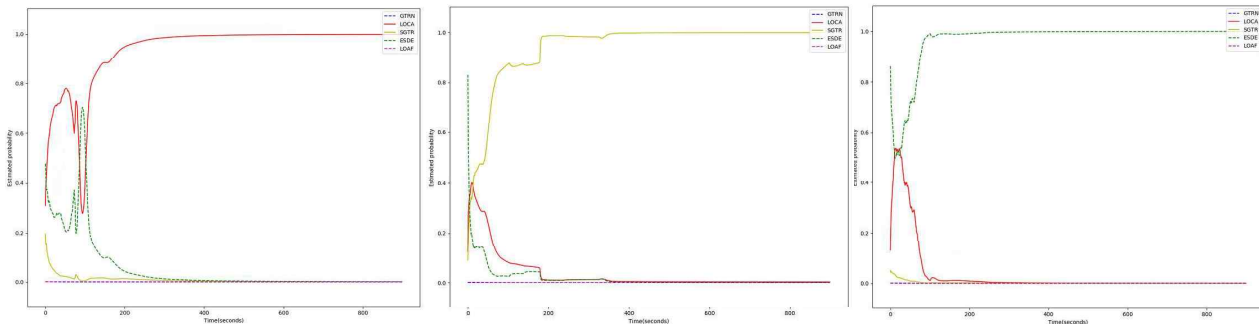
ESDE\_1 , break size = 2000

## III. Function Design

### Diagnosis Function

#### 1. Test Results

- 43 Tests success
- The bigger break size, the faster and more stable
- Initial prediction is unstable for small break size



LOCA\_CL , break size = 15

SGTR\_1 , break size = 6

ESDE\_1 , break size = 150

## III. Function Design

### Interface Function

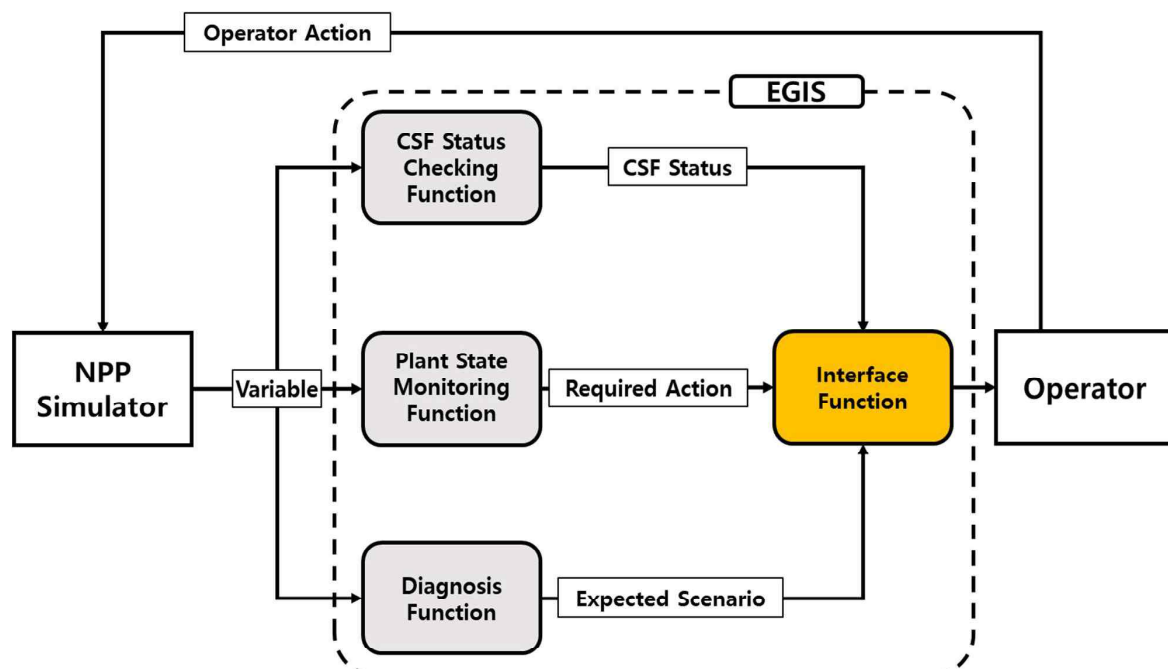
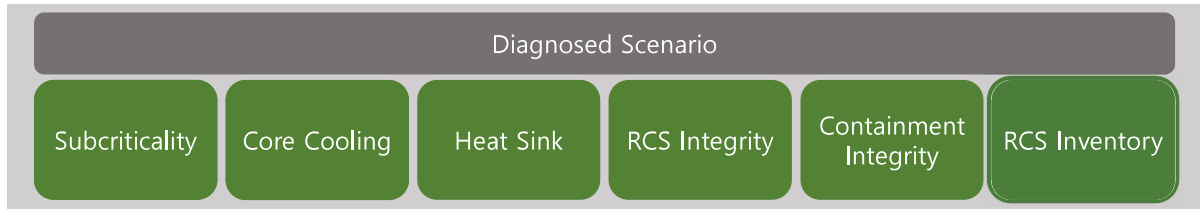


Fig 6. EGIS Framework

### III. Function Design

#### Interface Function

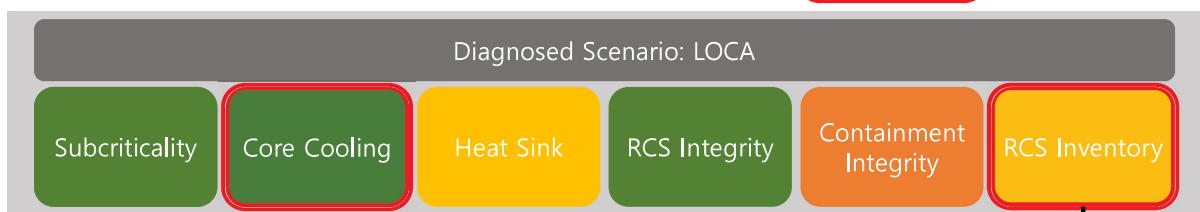


#### Purpose

- Receive data from 3 functions explained before.
- Provides CSF status with the color information.
- Provide each task and task number along with CSF, respectively.
- Recommends the expected ORP or FRP.

### III. Function Design

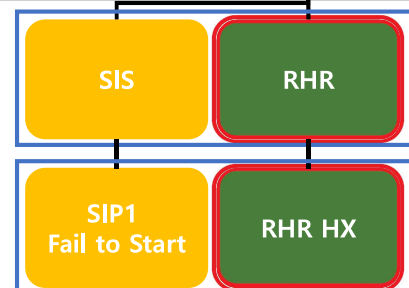
#### Interface Function



- LOCA Cold leg #1
- Break Size:  $77.5 \text{ inches}^2$  ( $500 \text{ cm}^2$ )
- SIP1 Fail to Start
- CCWP1 Fail to Start

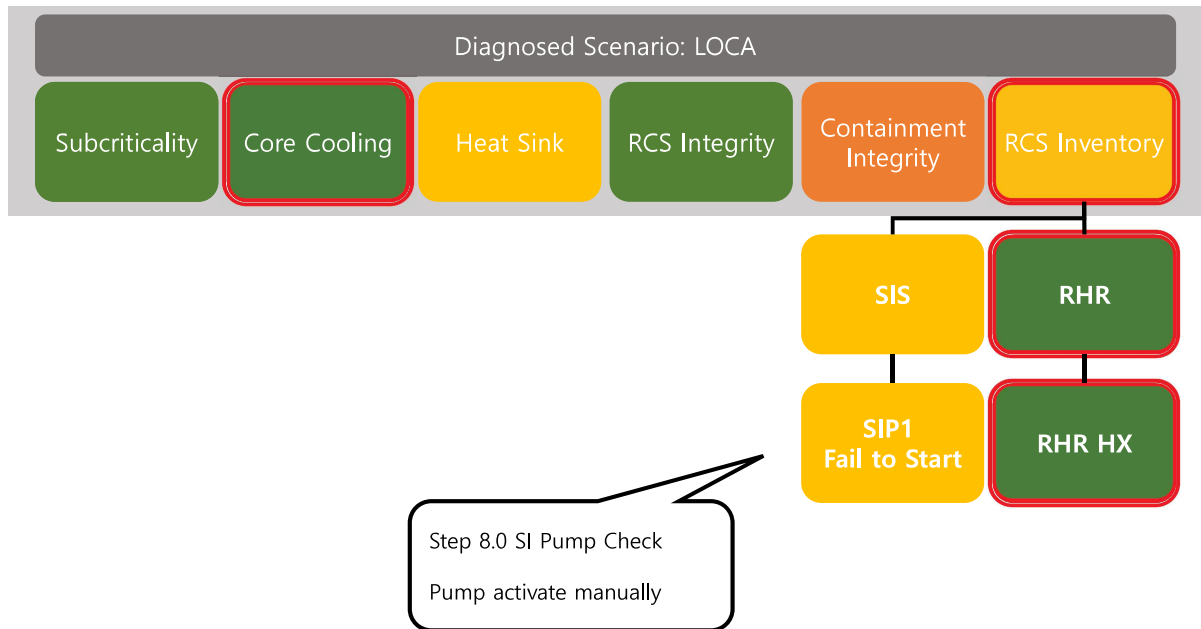
#### SYSTEM LEVEL

#### COMPONENT LEVEL



### III. Function Design

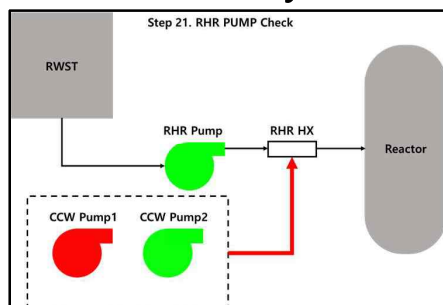
#### Interface Function



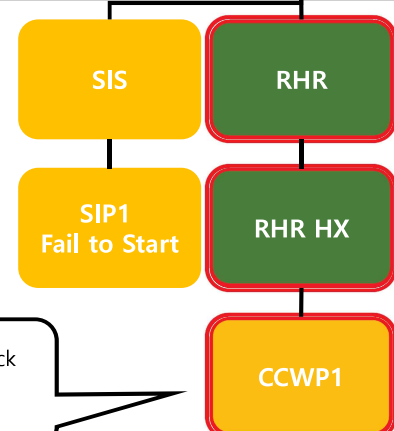
### III. Function Design

#### Interface Function

Fig 18. CCW Related System Window

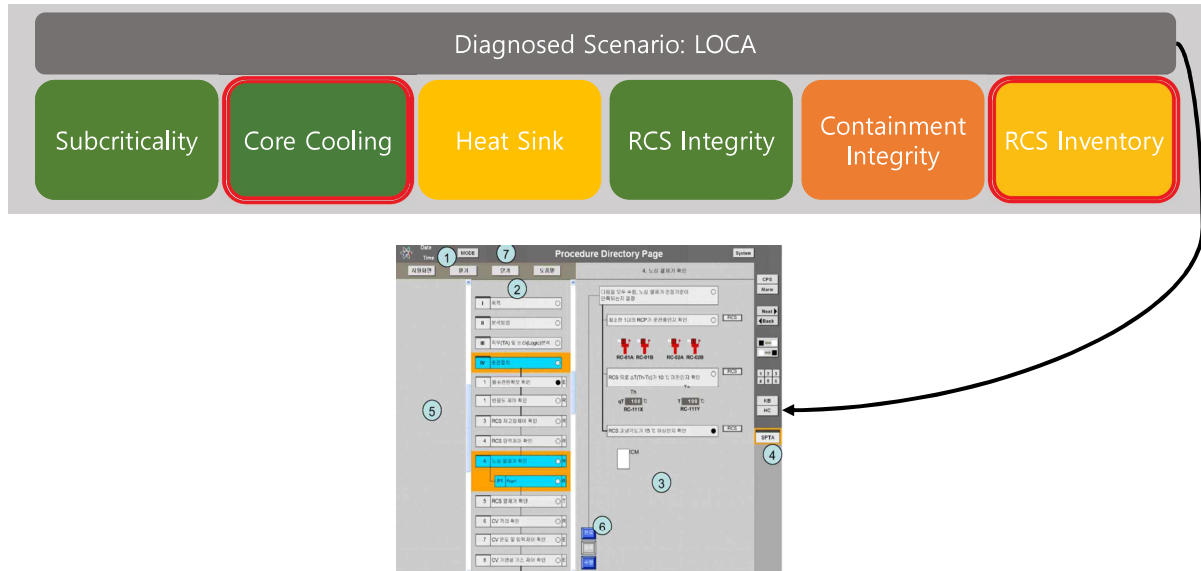


Step 9.0 CCW Pump Check  
Pump activate manually



## III. Function Design

### Interface Function



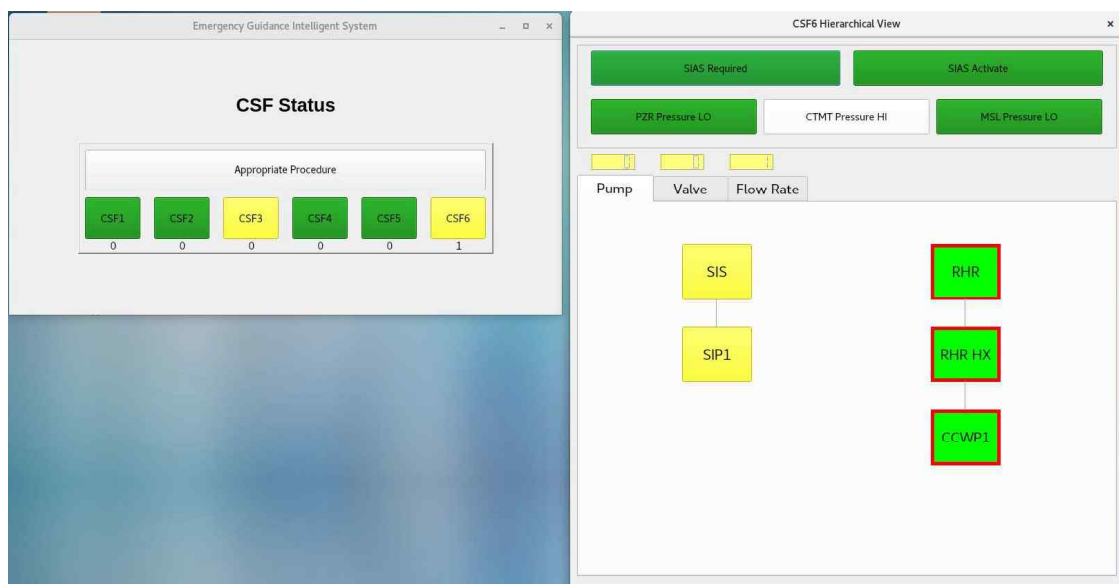
Screen for the Computerized Procedure System [3]

[3] Computerized procedure system for the APR1400 simulator

Jin-Hyuk Hong \*, Myeong-Soo Lee, Do-Hyun Hwang

## III. Function Design

### Demo



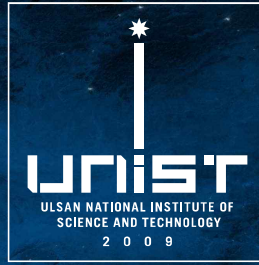
# Conclusion

## IV. Conclusion

- EGIS is designed for replacement SPTA and DA procedure
- Reduce operator's workload and time pressure
- EGIS provides more intuitive information for operators with color information and hierarchical tree.
- Support information which are not shown in SPTA is provided

### Future works

- Develop a sensor validation filter
- Build a diagnosis strategy when a sensor is unavailable
- Interface improvement



THANK YOU



NUCLEAR Safety Assessment and Plant HMI Evolution



---

# 원전 기동/정지 운전 자동화 규칙 설계

---

장인석

한국원자력연구원

# 원전 기동/정지 운전 자동화 규칙 설계

• • •

한국원자력연구원  
사고감시·대처연구실  
장 인 석

2020. 2.28.



## CONTENTS

• • •

01 개요

02 기동/정지 운전자동화 시스템

03 기동/정지 운전자동화 규칙설계

04 기동/정지 운전자동화 시스템 구현 계획

# 01개요

## 기동/정지 운전자동화시스템 개발 개요

### ● KINS OPIS 인적실수 비율

고장원인	20년간 (1997-2016)																				총발생건수
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	발생비율
인적실수	6	7	5	1	1	5	3	7	6	2	3	4	1	3	3	3	1	3	1	0	65
	22.22%	22.58%	19.23%	11.11%	4.55%	23.81%	13.04%	38.89%	28.57%	10.53%	13.64%	28.57%	9.09%	21.43%	25.00%	18.75%	12.50%	20.00%	16.67%	0.00%	18.16%
기계결함	6	14	7	1	7	5	7	4	4	4	7	2	1	2	3	2	1	3	0	9	89
	22.22%	45.16%	26.92%	11.11%	31.82%	23.81%	30.43%	22.22%	19.05%	21.05%	31.82%	14.29%	9.09%	14.29%	25.00%	12.50%	12.50%	20.00%	0.00%	39.13%	24.86%
전기 결함	3	4	5	2	3	7	5	2	7	5	6	1	8	2	4	2	3	1	2	2	74
	11.11%	12.90%	19.23%	22.22%	13.64%	33.33%	21.74%	11.11%	33.33%	26.32%	27.27%	7.14%	72.73%	14.29%	33.33%	12.50%	37.50%	6.67%	33.33%	8.70%	20.67%
계측 결함	5	6	9	3	5	1	3	5	4	6	4	5	1	5	2	9	3	6	1	4	87
	18.52%	19.35%	34.62%	33.33%	22.73%	4.76%	13.04%	27.78%	19.05%	31.58%	18.18%	35.71%	9.09%	35.71%	16.67%	56.25%	37.50%	40.00%	16.67%	17.39%	24.30%
외부 영향	7	0	0	2	6	3	5	0	0	2	2	2	0	2	0	0	0	2	2	8	43
	25.93%	0.00%	0.00%	22.22%	27.27%	14.29%	21.74%	0.00%	0.00%	10.53%	9.09%	14.29%	0.00%	14.29%	0.00%	0.00%	0.00%	13.33%	33.33%	34.78%	12.01%
합계	27	31	26	9	22	21	23	18	21	19	22	14	11	14	12	16	8	15	6	23	358

20년간 인적 실수로 인한 불시 정지 약 18% (총 65건)

# 01개요

## 기동/정지 운전자동화시스템 개발 개요

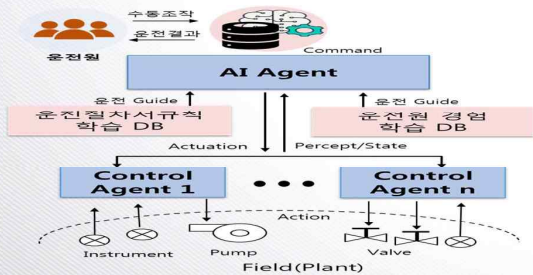
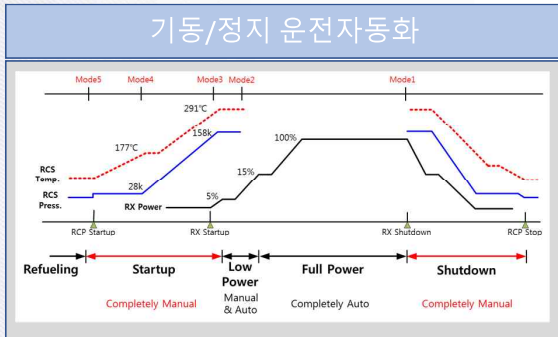
### ● 기동/정지 운전시 인적 실수 비율

	인적실수		기동 및 정지 운전시 인적실수 비율	
	년도	수	수	비율 (기동 및 정지 운전시 인적실수/총인적실수)
	1997	6	3	
20년간 (1997-2016)				
		65	33	50.77%

- 기동/정지 운전시 인적실수의 약 50%
- 33건 중 증기발생기 수위 계측 및 판단 오류 6건

# 01개요

## 기동/정지 운전자동화시스템 개발 개요



- 기동/정지 운전 구간은 전출력운전과 달리 운전원이 수동으로 운전
  - 수동계산, PID 자동제어 불가 구간, 운전횟수 vs. 사건&사고
- 운전절차서 및 운전원 지식을 분석하여 규칙기반 기동/정지 자동운전 및 자동제어 기술 개발
- APR1400 시뮬레이터에 통합하여 규칙기반 자동화 및 제어논리 성능검증
- APR1400 시뮬레이터 대상 독립시스템으로 개발하고, 과제 종료시 검증 후 현장 CPS/IPS 계통과의 통합 고려

# 02기동/정지 운전자동화시스템

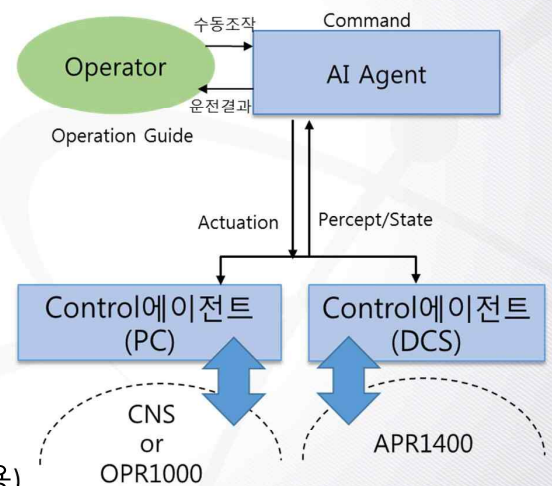
## 기동/정지 운전자동화시스템 구성

### AI 에이전트

- 기술지침서 및 절차서 주의/제한사항 상시 모니터링
- APR1400 운전절차서 규칙 및 운전원 경험지식 논리기반 절차서 자동수행
- 운전원 연계 및 Control 에이전트 연계 정보화면 관리

### Control 에이전트

- 기동/정지 운전절차서 중 제어대상 기기 자동화 제어
- 제어대상 기기 시뮬레이터 변수상태 감시 및 기기 제어
- 모사용 PC(CNS이용) / DCS 제어기(APR1400 시뮬레이터용)

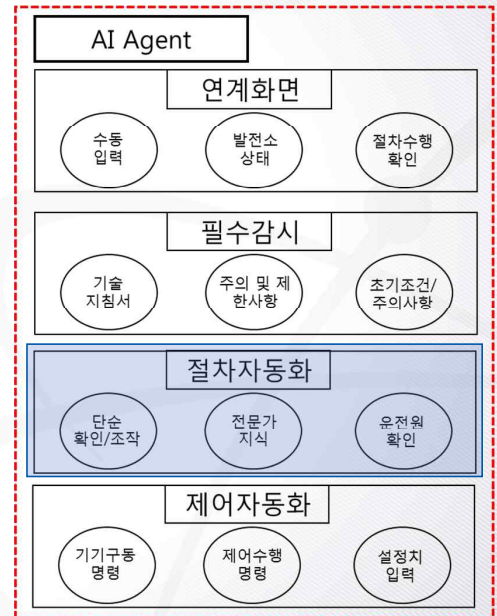




## 02기동/정지 운전자동화시스템

### 기동/정지 운전자동화시스템 – AI Agent 기능

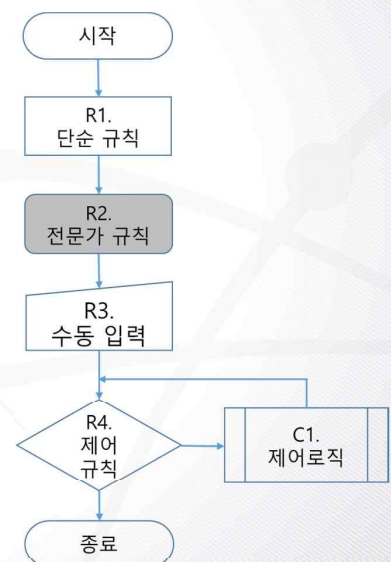
- **연계화면** 기능
  - 자동/수동 선택 및 운전원 수동입력 연계화면
  - 발전소 주요 조건 및 공정상태 변수 감시화면
  - 운전절차서 수행상태 및 상세규칙 확인화면
- **필수감시** 기능
  - 운영기술지침서 내 필수확인사항 감시
  - 운전절차서 3.0절 주의 및 제한사항 내 필수정보 감시
  - 운전절차서 4.0절 절차 내 필수 주의사항정보 감시
- **절차자동화** 기능
  - 운전절차서 4.0절 내 단순확인/조작 직무규칙 자동화
  - 운전절차서 4.0절 내 전문가 지식필요 직무규칙 자동화
  - 운전절차서 4.0절 내 운전원 수동입력 대기 직무규칙 자동화



## 03기동/정지 운전 자동화 규칙설계

### 직무별 규칙설계

- R1. 단순 규칙
  - 기동/정지 운전절차서 제공 **단순 확인/조작** 직무
- R2. 전문가 규칙
  - 기동/정지 운전절차서에 제공하지 않는 **운전원의 경험에 기반한 확인/조작** 직무
- R3. 수동 입력
  - 수동계산, 현장확인, 운전절차 불만족 사항에 대한 **운전원 수동 조치 및 확인 필요** 직무
- R4. 제어 규칙
  - 운전원의 지속적인 수동 조작으로 **공정상태를 유지하는 제어자동화 필요** 직무



# 03기동/정지 운전 자동화 규칙설계

## » 직무별 절차 예

### ● R1. 단순 규칙

가. 유출수 및 충전수 유량이 정상적으로 형성되고 있는지 확인한다.

구분	기기	정상유량
유출 유량	CV-FI-202 (CV-FY0202 -2-TRF, CV-FT0202N02-ACO)	151.4 ~ 530ℓ/min
충전 유량	CV-FI-212B CV-FR-212B	166.6 ~ 586.7ℓ/min

### ● R3. 수동 입력

다. 현장에서 유출수 수동격리밸브(CV-V396)를 연다.

### ● R2. 전문가 규칙

마. 정지냉각계통 한 계열이 운전되어 15,710~18,927 ℓ/min의 정지냉각유량을 형성하고 있고, 다른 계열은 운전 가능한 상태이다.

정지냉각계통 계열	펌프	유량계
A	PP01A	SI-FI-302A
B	PP01B	SI-FI-302A

### ● R4. 제어 규칙

1. 운전 중인 정지냉각계통 열교환기의 출구유량 제어밸브 및 우회밸브를 조절하여 RCS 가열률을 조절한다.

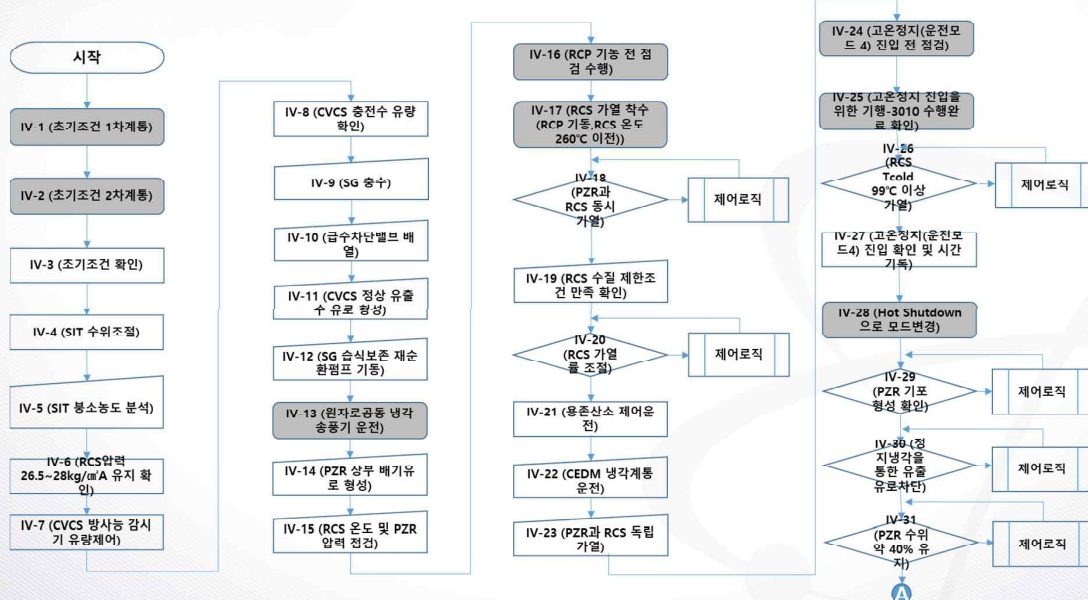
주) 정지냉각계통 열교환기 유량조절 시 유출수 유량 변화와 RCS 압력 변화에 주의해야 한다.

정지냉각계통	열교환기 출구유량 제어밸브	열교환기 우회유량 제어밸브
A 계열	SI-HS-310A01	SI-HS-312A01
B 계열	SI-HS-311B01	SI-HS-313B01

9

# 03기동/정지 운전 자동화 규칙설계

## » 기동운전절차서 순서도 (3001-IV-1 ~ 3001-VI-31)



# 03기동/정지 운전 자동화 규칙설계

## 단순 규칙설계

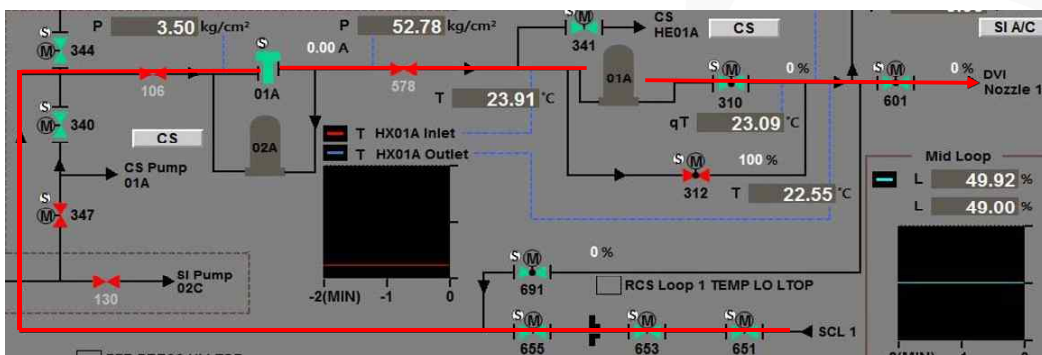
- 운전 절차 내 초기조건 확인 및 각 단계에서 단순확인이 필요한 직무에 대해서 다음과 같은 규칙을 기반으로 자동화 논리 개발

절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	ObjectPoint	단위	운전원 조치사항	관련계통 절차서
3001-IV-1-1-사	초기조건 1차계통	원자로정지차단기(RTSG)는 모두 개방된 상태이다.	IF 원자로정지차단기(RTSG) = 개방 THEN 절차 1-1-아 수행 ELSE IF 절차 1-1-사 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	원자로정지차단기 (TBD)	TBD	digit	원자로정지차단기 개방 확인 만족 원자로정지차단기 개방 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기화면	N/A
3001-IV-1-1-다	초기조건 1차계통	중합-3009(RCS 충수 및 배기)에 따라 RCS 충수 및 배기가 완료되어 PZR가 만수위를 유지하고 있으며, RCS 압력은 CV-V201Q에 의해 26.5~28kg/cm <sup>2</sup> A로 유지하고 있다.	IF PZR 수위 = 만수위 AND 26.5 < RCS 압력 < 30.9 kg/cm <sup>2</sup> THEN 절차 1-1-라 수행 ELSE IF 절차 1-1-다 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	PZR 수위 (Representative PZR Level (WR) L)	9_431_J_U_1113	%	PZR 만수위 유지 확인 만족 PZR 만수위 유지 확인 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기화면	중합-3009(RCS 충수 및 배기)
				RCS 압력 (RC-PI-0103A, RC-PI-0103B, RC-PI-0103C, RC-PI-0103D)	9_431_J_PI_0103A 9_431_J_PI_0104B 9_431_J_PI_0105C 9_431_J_PI_0106D	kg/cm <sup>2</sup>	RCS 압력 유지 확인 만족 RCS 압력 유지 확인 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기화면	N/A
3001-IV-11-1-가	CVCS 정상 유출수 유로 형성	유출수 및 충전수 유량이 정상적으로 형성되고 있는지 확인한다.	IF 151.4ℓ/min < 유출 유량 < 530ℓ/min A ND 166.6ℓ/min < 충전수 유량 < 586.7ℓ/min THEN 절차 11-1-나 수행 ELSE IF 절차 11-1-가 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	유출 유량 (CV-FI-202)	9_451_J_FI_0202	ℓ/min	유량 유량 형성 확인 만족 유량 유량 형성 확인 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기화면	N/A
				충전 유량 (CV-FI-212B)	9_451_J_FI_0212B	ℓ/min	충전수 유량 형성 확인 만족 충전수 유량 형성 확인 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기화면	N/A

# 03기동/정지 운전 자동화 규칙설계

## 전문가 규칙설계

- 운전절차서의 내용이 충분하지 않아 운전원의 지식/경험이 필요한 경우 APR1400 시뮬레이터를 활용하여 운전원의 구체적인 직무수행 방법을 전문가 규칙으로 설계 (1)
  - 예: 절차 3001-IV-1-1-마) “정지냉각계통 한 계열 운전 중, 정지냉각계통 다른 계열 운전가능”에 대한 전문가 규칙 설계
    - 절차서 내에는 정지냉각펌프 (SC 01A, SC 01B)에 대한 상태만 확인하지만 운전원은 관련 유로의 모든 기기를 확인







# 03기동/정지 운전 자동화 규칙설계

## 수동 입력설계

- 운전 절차 내 운전원이 계산해서 수동으로 계산 결과를 입력해야 되는 직무 또는 현장기술팀과의 협업 / 현장운전원의 조작이 필요한 직무에 대해서 일시적으로 대기할 수 있는 규칙을 기반으로 자동화 논리 개발

절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	ObjectPoint	단위	운전원 조치사항	관련계통 절차서
3001-IV-5-1	SIT 붕소농도 분석	SIT 붕소 농도를 분석하여 농도가 2300 ~ 4400ppm 범위 내에 있는지 확인하고, 필요한 경우 계통-3441-01(안전주입계통)에 따라 붕소 농도를 조절한다.	IF 2300ppm < SIT 붕소농도 분석치 (수동계산 입력 대기) < 4400ppm THEN 절차 6-1 수행 ELSE IF SIT 붕소농도 분석치 (수동계산 입력 대기) < 2300ppm OR SIT 붕소농도 분석치 > 4400ppm THEN 운전원 조치/확인 대기 (계통-3441-01 [안전주입 계통]에 따라 붕소농도 자동 제어) END IF	SIT 붕소농도 분석치 (수동계산 입력)	N/A	ppm	SIT 붕소농도 확인 만족 SIT 붕소농도 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기화면	계통-3441-01 (안전주입 계통)
절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	ObjectPoint	단위	운전원 조치사항	관련계통 절차서
3001-IV-11-1-다	CVCS 정상 유출수 유로 형성	현장에서 유출수 수동격리밸브 (CV-V396)를 연다.	DO 유출수 수동격리밸브 = OPEN (수동입력) IF 유출수 수동격리밸브 = OPEN THEN 절차 11-1-라 수행 ELSE IF 절차 11-1-다 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	유출수 수동격리밸브 (CV-V396)	N/A	digit	유출수 수동격리밸브 열림 확인 만족 유출수 수동격리밸브 열림 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기화면	N/A

# 03기동/정지 운전 자동화 규칙설계

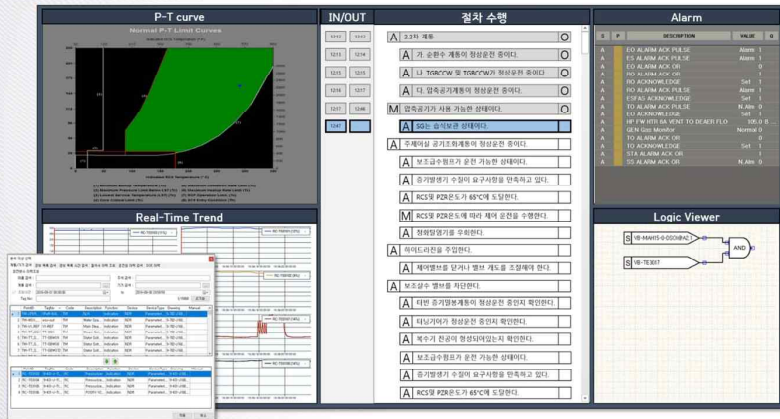
## 제어 규칙설계

- 제어 규칙이 필요한 직무는 Control 에이전트에 의해 수행되며, AI 에이전트는 Control 에이전트에 제어 명령을 입력하거나 제어 결과를 확인하여 절차의 만족여부를 확인하도록 설계 됨.
  - 가열률을 조절하기 위해 AI 에이전트는 현 절차에 도달하면 Control 에이전트에게 가열률 조절 명령을 전달하고, Control 에이전트는 가압기 압력 및 충전유량을 목표 범위로 유지하며 열교환기로 들어가는 밸브는 닫고, 열교환기 우회밸브를 열어 가열률을 상승시키는 제어를 수행함.

절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	ObjectPoint	단위	운전원 조치사항	관련계통 절차서
3001-IV-20-1	RCS 가열률 조절	운전 중인 정지냉각계통 열교환기의 출구유량 제어밸브 및 우회밸브를 조절하여 RCS 가열률을 조절한다.	DO PID RCS 가열률 자동제어 (열교환기 출구유량 제어밸브, 열교환기 우회유량 제어밸브 제어 가열률 증가) IF RCS 가열률 = 만족 THEN 절차 21-1 수행 ELSE IF 절차 20-1 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	열교환기 출구유량 제어밸브 (SC 310[SI-HS-310A01], SC 311[SI-HS-311B01])	9_441_V_0310 9_441_V_0311 9_441_V_0312 9_441_V_0313	%	N/A	N/A
			가열률 제어기 (설정치, 개도량, 모드, PID 세팅값)		TBD	-	N/A	N/A
			가열률 (TBD)		N/A	C/Hr	RCS 가열률 확인 만족 RCS 가열률 확인 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기화면	N/A

# 04기동/정지 운전자동화시스템 구현 계획

## » 기동/정지 운전자동화시스템 구현



<기동/정지 운전자동화시스템 메인화면>

- 원전 운전 중 절차가 복잡하며 인적 오류의 가능성이 높은 '원전의 기동/정지 운전 절차'를 인공지능 기술을 활용한 **AI 에이전트에 의한 자동운전 수행**
- 원전 절차서 및 운전원 지식을 기반으로 규칙기반 기동/정지 절차를 자동화 하여 운전을 수행하며 **주요 운전정보(PT-Curve, 절차수행, Alarm, 변수 Trend, 절차규칙 등) 제공**
- APR1400 시뮬레이터 및 CNS/OPR1000 시뮬레이터와 연계모듈을 통한 **통합 고려**

THANK YOU

---

SMART100 표준설계 인허가 획득을 위한  
설계기준초과사고 및 중대사고 관련  
인간공학 적용 방안

---

김사길

한국원자력연구원

# SMART100 표준설계 인허가 획득을 위한 설계기준초과사고 및 중대사고 관련 인간공학 적용방안

김사길, SMART 기술개발부

2020. 2. 28.



SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

## CONTENTS

01 배경

02 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

03 결론 및 토의



# 01 배경

## 01 배경

SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 국내 관계 법령

#### ● 원자력안전법 제20조(운영허가) 제2항

“제1항의 허가를 받으려는 자는 허가신청서에 발전용원자로 및 관계시설에 관한 운영기술지침서, 최종안전성분석보고서, **사고관리계획서(중대사고관리계획을 포함한다)**, 운전에 관한 품질보증계획서, 방사선환경영향평가서, 액체 및 기체 상태의 방사성물질등의 배출계획서 및 총리령으로 정하는 서류를 첨부하여 위원회에 제출해야 한다”.

(2015년 6월 22일자 개정 및 공포된 법안)

# 01 배경

SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

## » 국내 관계 법령

- 원안위 기타 제24호 (원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙)  
제85조의21(사고관리전략 및 이행체계)

“사고관리를 위해 유지복구되어야 하는 필수안전기능을 정의하고, **인적요소를 고려한  
제반 조치사항을 포함할 것**”.

# 01 배경

SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

## » 국내 관계 법령

- 원안위 고시 제2017-35호 (사고관리계획서 작성방법에 관한 규정)

- 제1조(목적)
- 제2조(적용범위)
- 제3조(사고관리의 개요)
- 제4조(사고관리능력의 평가)
- 제5조(비상운전절차서 작성계획)
- 제6조(사고관리의 개요)
- 제7조(사고관리 전략)
- 제8조(사고관리 이행체계)
- 제9조(사고관리능력의 평가)
- 제10조(비상운전절차서 작성 시 적용할  
기술적 근거 및 검증방법에 대한 설명서)
- 제11조(극한재해 완화지침서 작성에 관한  
설명서)
- 제12조(중대사고 관리지침서 작성에 관한  
설명서)
- 제13조(사고관리 교육훈련계획)
- 제14조(재검토기한)



# 01 배경

SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

## » KINS 규제지침

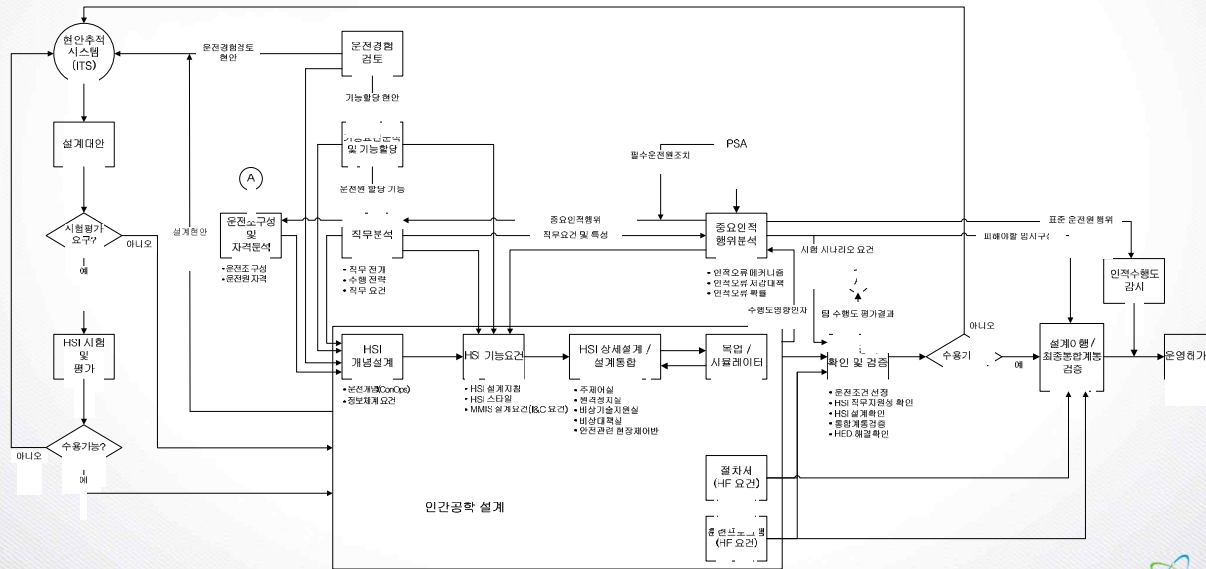
### ● KINS/RG-N15.06 (설계기준초과사고 및 중대사고 관련 인간공학 적용)

- 2017년 12월 발행, 2018년 2월 1일자 시행
- 규제입장: 신규 건설원전의 설계공정에서 설계기준초과사고 및 중대사고 조건을 체계적으로 다루기 위해 인간공학 프로그램 12개 이행요소 각각에 대한 세부요건을 제시
- 설계기준초과사고는 다중고장에 의한 사고와 설계기준을 초과하는 극한재해로, 설계기준으로 고려한 외적 요인을 초과하는 자연재해 및 인위적 재해를 의미함.
- 중대사고는 설계기준초과사고 및 설계기준을 초과하여 노심의 현저한 손상을 초래하는 사고를 의미함.

## 02 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### SMART100 인간공학 프로그램 계획(HFEPP)



SMART기술개발부

KAERI 한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

9

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### SMART100 HFEPP 적용 규제 기준 및 지침

- KINS/RS-N15.00, 인간공학, Rev. 2 (2016.06.)
- KINS/RG-N15.01, 인간공학 계획, Rev. 2 (2016.06.)
- KINS/RG-N15.02, 인간공학 분석, Rev. 2 (2016.06.)
- KINS/RG-N15.03, 인간공학 설계, Rev. 2 (2016.06.)
- KINS/RG-N15.04, 인간공학 확인 및 검증, Rev. 2 (2016.06.)
- KINS/RG-N15.05, 설계이행 및 인적수행도 감시, Rev. 2 (2016.06.)
- KINS/RG-N15.06, 설계기준초과사고 및 중대사고 관련 인간공학 적용, Rev. 0 (2017.12.)
- NUREG-0800 Chapter 18, Human Factors Engineering, Rev. 3 (2016, 12.)

SMART기술개발부

KAERI 한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

10

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 인간공학 프로그램 계획

- **적용 상황:** 사고관리계획서에서 고려하는 모든 사고 범위(설계기준사고, 다중고장에 의한 사고, 설계기준초과 극한재해, 중대사고)로 확대 적용
- **적용 종사자:** 주제어실 운전원, 현장 운전원, 사고관리 요원(ERF 요원)으로 확대 적용
- **절차서 및 지침서:** 정상/비정상/비상운전절차서, 중대사고관리지침서, 광역손상완화지침서 등을 포함
- **인간-시스템연계 및 설비:** 고정형 혹은 이동형설비(MACST 설비)의 설계, 구매 및 운영을 포함  
※ MACST: Multi-barrier Accident Coping STrategy
- **사고관리계획서 개발 활동과의 통합:** 사고관리계획서 개발 활동에 인간공학 설계조직의 역할과 책임을 정의

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 운전경험검토

- **검토 대상 :** 다음의 검토대상을 확대 적용
  - 후쿠시마 후속조치
  - 가압경수로 혹은 가압중수로 등 유사 노형 원전의 스트레스테스트에서 규명된 인간공학 현안
  - 건설원전의 인간공학 확인 및 검증에서 BDBA 및 SA 조건에 대한 평가 결과



## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 기능요건분석 및 기능할당

- **분석 범위** : 다음의 사고범위를 포함하여 안전기능의 정의, 요건분석, 기능할당 수행
  - 설계기준사고
  - 다중고장에 의한 사고
  - 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 제13조에 따라 설계기준으로 고려한 외적요인을 초과하는 자연재해 및 인위적 재해
  - 설계기준을 초과하여 노심의 현저한 손상이 발생한 사고
- **추가 분석 대상** : 소내 고정형 혹은 이동형 MACST 설비를 포함

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 직무 분석(1)

- **분석 범위** : BDBA 및 SA 조건 하에서 사고관리 전략을 이행하기 위한 사고관리 요원의 직무(중요인적행위관리에서 규명된 직무)를 포함, 다음의 직무요건을 추가분석
  - 정보의 가용성
  - 설비의 설계특성
  - 직무 수행 시간(가용시간 및 요구시간)
  - 인원수준
  - 직무 수행의 위치(원격 혹은 현장 수동조치, 방사능 등 환경조건, 조명, 소음, 통신 가능여부 등)
- **분석 방법** : 사고관리 직무의 경우, 절차서 기반이 아닌, 해당 사고의 조건 및 예상 경위에 근거한 사고시나리오를 기반으로 직무분석 방법을 수행

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 직무 분석(2)

- **확인 직무** : PSA/HRA에서 사고 과정 중의 인적행위가 항상 실패라고 가정되는 다음 직무의 HRA 결과의 적합성 확인
  - 운전원 행위를 수행하기 위해 진단시간이 너무 짧아서 행위를 수행할 수 없을 경우
  - 설계기준을 초과한 자연재해가 발생하여, 운전원의 이동경로가 확보되지 않아 해당 운전원 행위를 수행할 수 없을 경우

※ 출처: KINS R&D Report 1403004, 설계기준초과사고를 반영한 인간공학 규제기술 개발 최종보고서, 2017
- **수동조치시간 분석** : 중요인적행위관리에서 규명된 사고관리요원 중요인적행위의 신뢰성 및 가용성과 관련하여, 가용시간(time available) 및 요구시간(time required)의 적합성을 확인

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 운전조 구성 및 자격

- **분석 대상** : 주제어실 운전원, 현장 운전원, TSC 요원, OSC 요원, EOF 요원 등 사고관리에 참여하는 모든 종사자로 확대
- **분석 방법**
  - 사고관리 직무에 투입되는 모든 종사자의 구성 및 자격이 적합한지 여부를 사고시나리오(직무분석에서 Fidelity가 확보된)를 기반으로 분석
  - 사고초기단계(initial phase), 전환단계(transition phase), 종료단계(final phase) 혹은 비상단계(contingency phase)에 따른 차별적인 요원의 구성 및 자격을 분석

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 중요 인적행위 관리

- **관리 대상** : BDBA 및 SA 조건에서의 PSA/HRA 및 결정론적 사고해석 결과를 반영한 사고시나리오에서 규명된 중요 인적행위를 포함
- **인간공학 활동 연계**
  - 규명된 중요 인적행위를 기능할당, 직무분석 등에 반영
  - 규명된 중요 인적행위를 인간공학 확인 및 검증을 통해 적절성을 확인

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 인간-시스템연계 설계

- **설계 대상** : 다음의 인간-시스템연계 설비에 대한 설계를 포함
  - 주제어실, 원격정지실, TSC, OSC, EOF(BDBA 및 SA 조건하에서 운전가능성을 보장, 발전소 상황에 대한 정확하고 신뢰성 있는 정보를 제공)
  - 사고관리 이행에 필요한 설비, 기기, 도구(BDBA 및 SA 조건하에서 운전가능성을 보장)
  - 통신 및 조명 설비(BDBA 및 SA 조건하에서 운전가능성을 보장)
- **설계문서 개정**
  - 주제어실, 원격정지실 설계요건에 BDBA 및 SA 조건을 고려
  - TSC, OSC, EOF는 건설단계에서 사업자 요건을 반영하여 상세설계
  - SPDS는 건설단계에서 사업자 요건을 반영하여 상세설계



## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 절차서 개발

- **개발 범위** : 다음의 절차서 및 지침서를 개발 범위에 포함
  - 비상운전절차서(EOP)
  - 중대사고관리지침서(SAMG)
  - 광역손상완화지침서(EDMG)
  - 극한재해대응전략지원지침서(FSG) 등
- **인간공학 검토**
  - 절차서 및 지침서 개발을 위한 인간공학 검토 지침(작성자 지침 등) 개발
  - 절차서 및 지침서의 확인 및 검증시 인간공학 적합성을 확인

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 훈련프로그램 개발

- **개발 범위** : 다음의 사항을 개발 범위에 포함
  - 사고관리 요원의 범주
  - BDBA 및 SA 조건 하에서 필요한 절차서 및 지침서
  - 사고관리 직무
  - 사고관리 이해에 필요한 설비, 기기, 도구
  - 직무 수행 위치(원격 수동조치 혹은 현장 수동조치 등)
- **훈련프로그램의 내용** : 훈련 방법, 훈련 참여요원(사고관리 요원 등), 훈련 설비(시뮬레이터, MACST 설비 등), 훈련 주기, 평가방법 등을 규명



## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 인간공학 확인 및 검증(1)

- **확인 및 검증 범위** : BDBA 및 SA 조건을 포함하여 다음의 사항을 고려
  - 사고관리 요원의 범주
  - BDBA 및 SA 조건 하에서 필요한 절차서 및 지침서
  - 사고관리 직무
  - 사고관리 이해에 필요한 설비, 기기, 도구
  - 직무 수행 시간
  - 직무 수행 위치(원격 수동조치 혹은 현장 수동조치, 방사능 등 환경조건, 조명, 소음, 통신 가능여부 등)

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 인간공학 확인 및 검증(2)

- **확인 및 검증 방법** : BDBA 및 SA 조건에 대한 대표성 있는 사고시나리오 기반 확인 및 검증
- **통합시스템검증(ISV)** : BDBA 및 SA 조건에 대한 대표성 있는 사고시나리오를 모사할 수 있는 고충실도 시뮬레이터 및 실제 MACST 설비를 활용

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 설계이행

- **최종발전소확인(FPV)** : 주제어실 운전원, 현장 운전원, TSC/OSC/EOF 등의 사고관리 요원이 BDBA 및 SA 조건 하에서 가용한 설비 및 기기를 이용하여 가용한 시간 이내에서 사고관리 직무를 성공적으로 수행하는지를 확인

## 02 SMART100 BDBA 및 SA 관련 인간공학 적용방안

### » 인적수행도 감시

- **인적수행도 감시 프로그램** : 다음의 사항을 포함
  - 운영단계에서 사고관리 수단과 관련한 설계 및 조직 변경 시에 인적수행도에 미치는 부정적 영향이 없는지를 확인할 수 있는 지침을 개발
  - 운영단계에서 사고관리 요원의 수행도가 적합하게 유지되고 있음을 보장할 수 있도록 인간공학 지침을 개발(향후 사업자가 인적수행도 감시 프로그램을 개발 및 운영)

---

# 온톨로지 기반 운영기술지침 검색 및 감시 체계 개발

---

성노규

한국수력원자력 중앙연구원

# 온톨로지 기법을 활용한 T/S 검색 및 감시시스템 개발 방향

2020. 02.

한국수력원자력 중앙연구원  
성노규 선임  
nokyuseong@khnp.co.kr



## CONTENTS

- Introduction
- Problem Statement
  - Human Errors
  - Ambiguities
- Methodology
  - Data Mining
  - Ontology
- Summary & Further Works
- Reference



## Introduction

- A Technical Specification(T/S) establishes requirements for items such as safety limits, limiting safety system settings, limiting control settings, limiting conditions for operation, surveillance requirements, design features, and administrative controls [1].
- T/S is one chapter of final safety analysis report(FSAR) and includes limiting condition for operation (LCO) applicability.
- Events related to T/S have been occurring continuously and repeatedly, and the recent event of control rod withdrawal of Hanbit #1 is also related to T/S [2].
- The total number of events related to T/S is 22 from 2000 in Korea, the main causes are listed in the following table [2].

Causes	Number
Mechanical Failure	7
Instrumentation Failure	4
Human errors	4
External Influences	4
Power Failure	3

3



## Introduction

- In 2019, prior studies were conducted to effectively monitor the applicability of LCO.
  - Lee and Kim ‘A computerized Operator Support System to Monitor the Technical Specification’[3]
  - Kim and Jeong ‘Development of a Technical Specification Monitoring System Using Real-time Operating Parameters in OPR1000’[4]
- Lee and Kim, developed Technical Specification Monitoring System(TSMS) using rule-based system and Support Vector Machine(SVM) algorithm. And Kim and Jeong also developed TSMS by using the plant’s real-time operating parameters and logic diagrams similar to rule-based system [3,4].
- However, the above TSMS does not fully reflect user requirements such as difficulties to determine LCO applicability. As a result of interviewing domestic operators(main control room and maintenance department), the difficulties to determine LCO applicability and necessary functions to develop are described in the following slides.



## Problem Statement

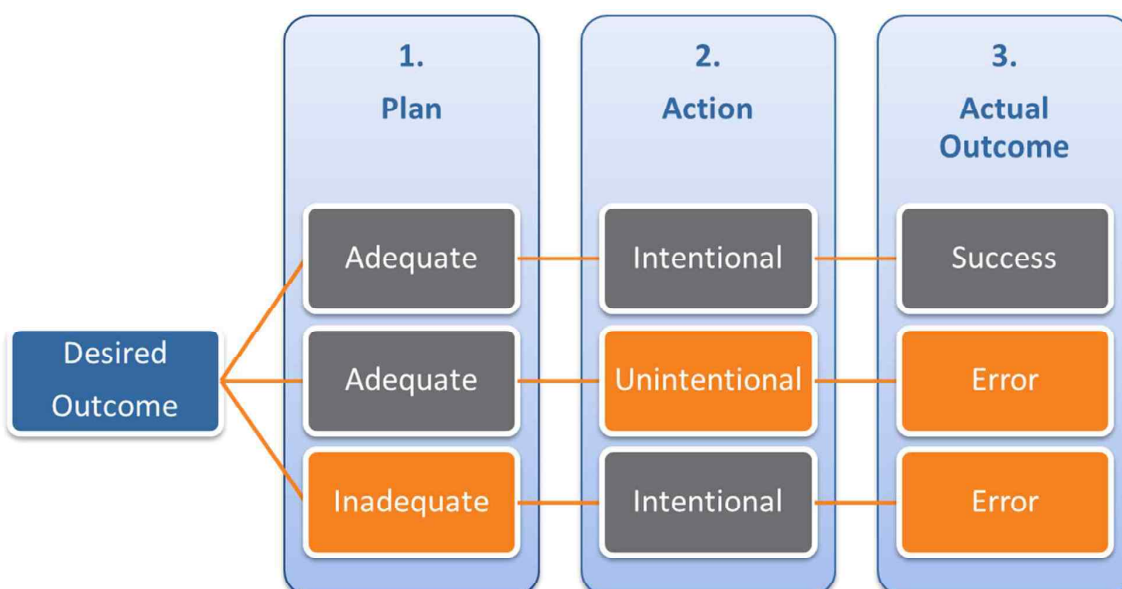
- In January, various interviews were conducted with plant operators such as worked in main control room, worked in maintenance department, worked in administrative department.
- In order to obtain various opinions, interviews were conducted at various nuclear power plants.
  - Hanbit 1,2,3 & 4 units(Westinghouse and OPR1000)
  - Shin-Kori 1&2 units(OPR1000)
  - Shin-Kori 3&4 units(APR1400)
  - Kori 3&4 units(Westinghouse)
- The results obtained from the operator interviews are as follows:
  - **Functions development to reduce Human Errors**
  - **Elimination of ambiguities to clearly interpret LCO**

5



## Problem Statement

- Human error – failures in planning and execution[5]

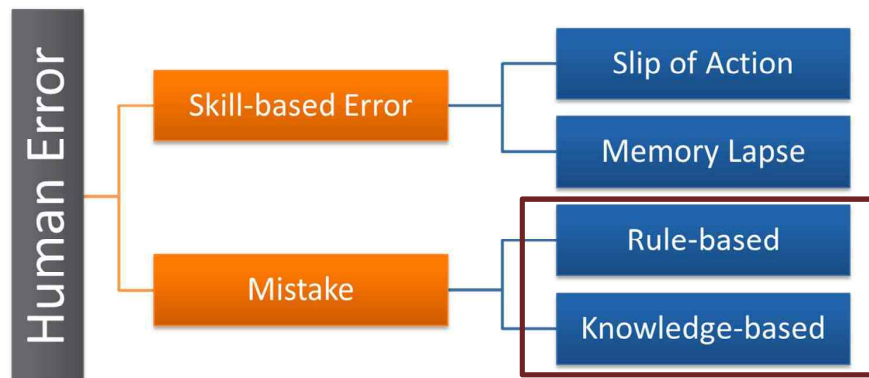




## Problem Statement

### ■ Human error typology [5]

- Failures of action, or unintentional actions, are classified as **skill-based errors**.  
→ This error type is categorized into **slips of action** and **lapses of memory**.
- Failures in planning are referred to as **mistakes**.  
→ These are categorized as **rule-based mistakes** and **knowledge-based mistakes**.



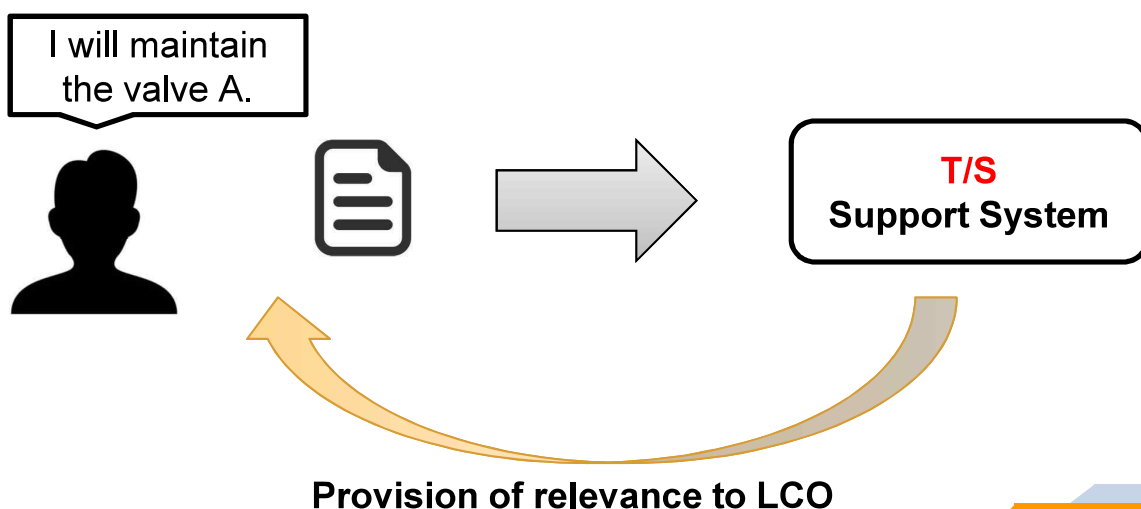
7



## Problem Statement & Solution

### ■ Knowledge-based mistakes

- Knowledge-based mistakes result from 'trial and error'. In these cases, insufficient knowledge about how to perform a task results in the development of a solution that is incorrectly expected to work.
- T/S monitoring system analyzes the notice and provides the relevance to LCO



8

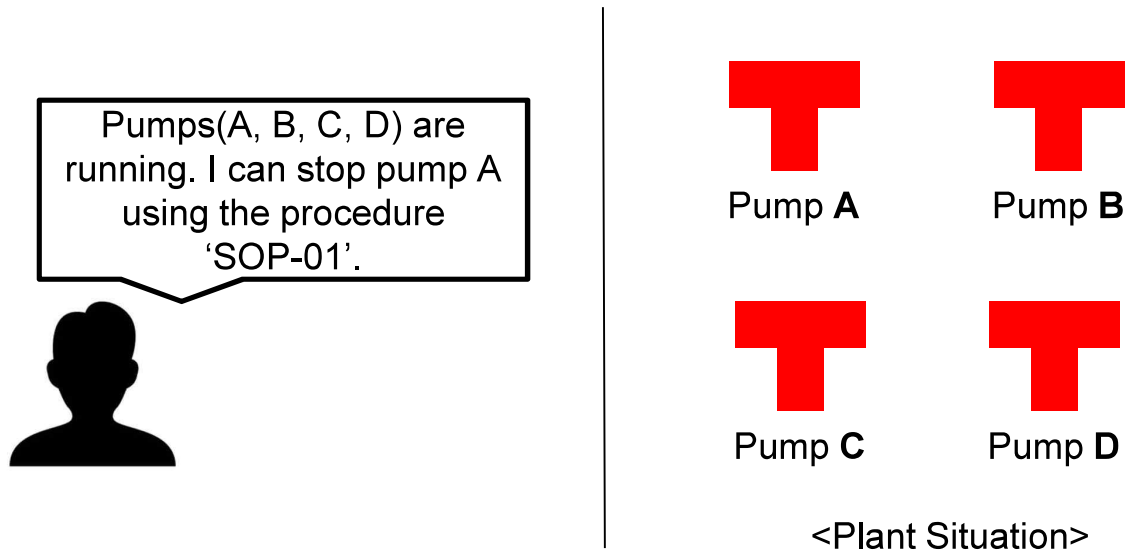




## Problem Statement

### ■ Rule-based mistakes

- Rule-based mistakes refer to situations where the use or disregard of a particular rule or set of rules results in an undesired outcome.



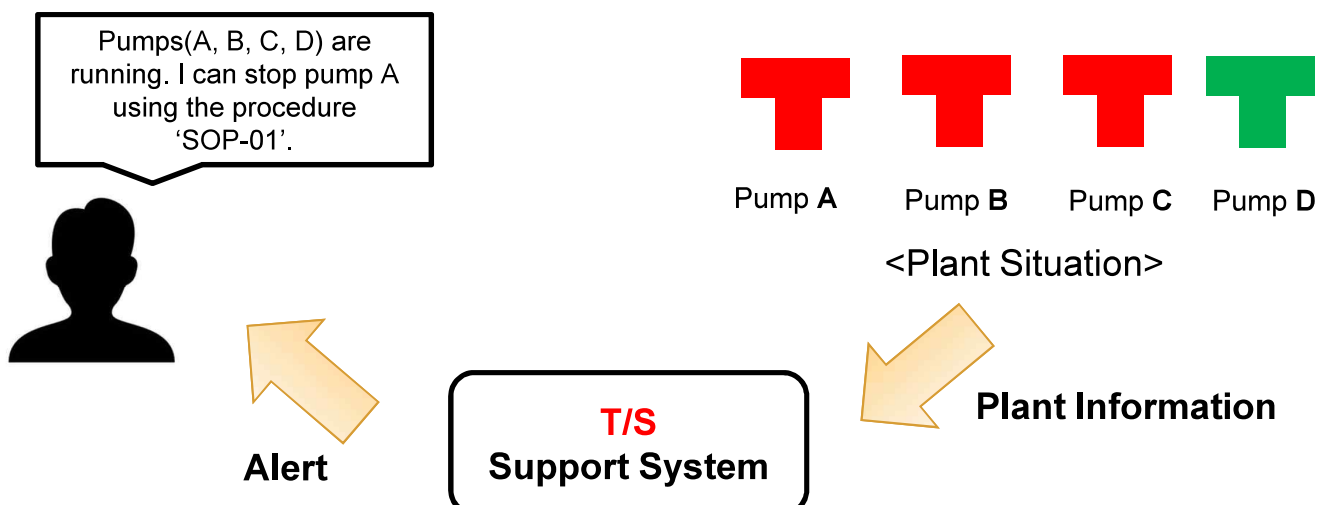
9



## Problem Statement & Solution

### ■ Rule-based mistakes

- Rule-based mistakes refer to situations where the use or disregard of a particular rule or set of rules results in an undesired outcome.
- T/S monitoring system monitors LCO applicability using plant status.





## Ambiguities(1)

- In interviewing the plant operators,
  - [Problem 1] –System Level
    - Let's think there is a Limiting Condition for Operation(LCO) related to EDG power source

*“ If the operability of EDG is normal, a plant operator try to repair the one of the sub-component of HVAC system in EDG room.”*

➔ This action is related to applicability of T/S or not ?
    - Operators have difficulties to decide the applicability of T/S.
      - The operability of EDG ensure 8 hours to operate.
      - The HVAC system can influence the performance of EDG.

➔ This action is related to applicability of T/S or not ?

11



## Ambiguities(2)

- In interviewing the plant operators,
  - [Problem 2] – Component Level
    - Let's think there is a Limiting Condition for Operation(LCO) related to MSIV.

*“The state of MSIV displays ‘inoperable’ because the close limit switch is true.”*

➔ This is related to applicability of T/S or not ?
    - The goal of MSIV is the isolation of line of main steam.
    - Although the ‘inoperable’ status is displayed, if the ‘Close’ signal is generated then MSIV closes successfully.
    - Therefore, this is not related to applicability of T/S.



## Ambiguities(3)

- In interviewing the plant operators,

- [Problem 3]

- Let's think there is a Limiting Condition for Operation(LCO) related to instrumentation to reactor power.

*"There are four sensors to instrument the reactor power for power operation.*

*If one of four sensors displays different value,"*

Sensors	Value
A	101.3
B	101.5
C	101.7
D	102.1

This is related to applicability of T/S or not ?

13



## Methodology(Ontology)

- What is an Ontology?[6]

- Philosophical discipline, namely the branch of philosophy which deals with the nature and structure of "reality." Aristotle dealt with this subject in his *Metaphysics* and defined **Ontology** as the science of "being qua being,"
  - Computational ontologies are a means to formally model the structure of a system, i.e., the relevant entities and relations that emerge from its observation, and which are useful to our purpose.
  - In 1993, Gruber originally defined the notion of an ontology as an "explicit specification of a conceptualization"
  - In 1997, Borst defined an ontology as a "formal specification of a shared conceptualization"
  - In 1998, Studer et al. merged these two definitions stating that:

**"An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization"**

[6] Guarino, N., Oberle, D. & Staab, S., 2009. What is an Ontology? In Handbook on ontologies. Springer, pp. 1–17.



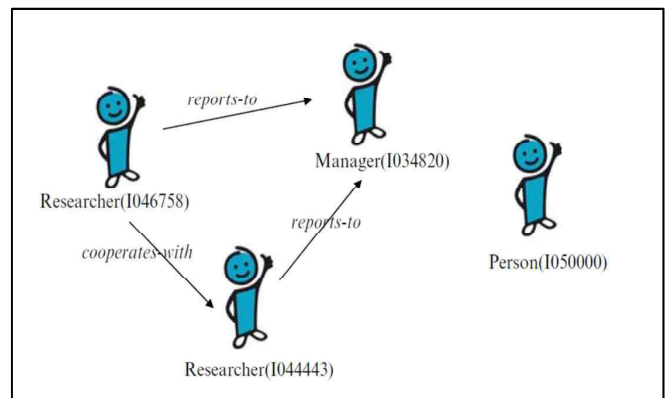
# Methodology(Ontology)

- What is a Conceptualization?
  - A conceptualization is an abstract, simplified view of the world that we wish to represent for some purpose [7].

## Extensional relational structure

- An extensional relational structure is a tuple  $(D, R)$  where
  - $D$  is a set called the universe of discourse
  - $R$  is a set of relations on  $D$

- $Person = D$
- $Manager = \{..., 1034820, ...\}$
- $Researcher = \{..., 104443, 1046758, ...\}$
- $reports-to = \{..., (1046758, 1034820), ...\}$
- $cooperates-with = \{..., (1046758, 104443), ...\}$



[7] M. R. Genesereth and N. J. Nilsson. Logical Foundations of Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1987.

15



# Methodology(Ontology)

- What is a Conceptualization?
  - A conceptualization is an abstract, simplified view of the world that we wish to represent for some purpose [7].

## Intensional relational structure

- An intensional relational structure is a triple  $C = (D, W, R)$  with
  - $D$  a universe of discourse
  - $W$  a set of possible worlds
  - $R$  a set of conceptual relations on the domain space  $\langle D, W \rangle$

- For all worlds  $w$  in  $W$  :  $Person(w) = D$
- For all worlds  $w$  in  $W$  :  $Manager(w) = \{..., 1034820, ...\}$
- For all worlds  $w$  in  $W$  :  $Researcher(w) = \{..., 104443, ..., 1046758, ...\}$
- $Reports-to(w1) = \{..., (1046758, 1034820), ...\}$
- $Reports-to(w2) = \{..., (1034820, 1050000), ...\}$
- $Cooperates-with(w1) = \{..., (1046758, 104443), ...\}$
- $Cooperates-with(w2) = ...$

### Cooperate

- (1) Both declare to have the same goal
- (2) Both do something to achieve this goal.

[7] M. R. Genesereth and N. J. Nilsson. Logical Foundations of Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1987.



# Methodology(Ontology)

- What is a Proper Formal, Explicit Specification ?
    - An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization
    - Method to specify explicitly a conceptualization in two ways:
      - *extensionally* : listing the extensions of every relation for all possible worlds. → Impossible and Impractical
      - *Intensionally* : to fix a language we want to use to talk of it, and to constrain the interpretations of such a language in an intensional way, by means of suitable axioms (called meaning postulates [8]).
- For example, reports to(asymmetric and intransitive), cooperates-with(symmetric, irreflexive, and intransitive)*

[8] R. Carnap. Meaning and Necessity — A Study in Semantics and Modal Logic.  
The University of Chicago Press, second edition, 1956.

17



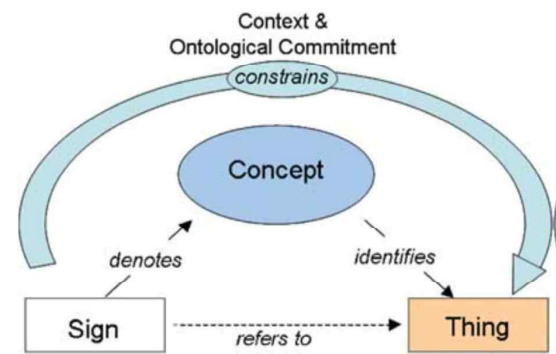
# Methodology(Ontology)

- What is a Proper Formal, Explicit Specification ?
  - The axioms for intensionally and explicitly specifying the conceptualization can be given in an informal or formal language  $L$ .
  - The explicit specification must be formal and 'Formal' refers to the fact that the expressions must be **machine readable**, hence natural language is excluded.
  - Ontology Example,
    - $O1 = \{ \text{Researcher}(x) \rightarrow \text{Person}(x), \text{Manager}(x) \rightarrow \text{Person}(x) \}$
    - $O2 = O1 \cup \{ \text{cooperates-with}(x, y) \rightarrow \text{Person}(x) \wedge \text{Person}(y), \text{reports-to}(x, y) \rightarrow \text{Person}(x) \wedge \text{Person}(y) \}$
    - $O3 = O2 \cup \{ \text{cooperates-with}(x, y) \leftrightarrow \text{cooperates-with}(y, x) \}$
    - $O4 = O3 \cup \{ \text{reports-to}(x, z) \leftarrow \text{reports-to}(x, y) \wedge \text{reports-to}(y, z) \}$
    - $O5 = O4 \cup \{ \text{Manager}(x) \rightarrow \neg \text{Researcher}(x) \}$



# Methodology(Ontology)

- What is *Shared* of Importance ?
  - The reason is that an ontology formally specifies a domain structure under the limitation that its stakeholder understand the primitive terms in the appropriate way.
  - In other words, the ontology may turn out useless if it is used in a way that runs counter to the shared ontological commitment.
  - For those ontologies intended to support large-scale interoperability, to be well-founded, in the sense that the basic primitives they are built on are sufficiently well-chosen and axiomatized to be generally understood.



Semiotic triangle

19



# Summary & Further Works

- **Summary**
  - This study presents development of TSMS to determine LCO Applicability.
  - Through interviewing the plant operators, two main user requirements are obtained.
    - Functions development to reduce Human Errors
    - Elimination of ambiguities to clearly interpret LCO
  - Ontology-Based T/S is presented as a methodology to satisfy user requirements.
- **Further Works**
  - Construction of Ontology of LCO
  - Development of Searching and Monitoring of LCO of TS





# Thank you

21



## REFERENCE

- [1] <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/technical-specifications.html>
- [2] <http://opis.kins.re.kr/>
- [3] Subong Lee, Jonghyun KIM. A Computerized Operator Support System to Monitor the Technical Specification, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 23-24, 2019
- [4] Yong-Won Kim, Jae Jun Jeong. Development of a Technical Specification Monitoring System Using Real-time Operating Parameters in OPR1000. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Goyang, Korea, October 24-25, 2019
- [5] <https://www.nopsema.gov.au/resources/human-factors/human-error/>
- [6] Guarino, N., Oberle, D. & Staab, S., 2009. What is an Ontology? In Handbook on ontologies. Springer, pp. 1–17.
- [7] M. R. Genesereth and N. J. Nilsson. Logical Foundations of Artificial Intelligence. Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1987.
- [8] R. Carnap. Meaning and Necessity – A Study in Semantics and Modal Logic. The University of Chicago Press, second edition, 1956.
- [9] R. Studer, R. Benjamins, and D. Fensel. Knowledge engineering: Principles and methods. Data & Knowledge Engineering, 25(1–2):161–198, 1998.