



인공지능을 이용한 동적 비상운전절차서 개발

Seung Jun LEE

Department of Nuclear Engineering
UNIST
2022.05.18



Compact Operator Console

Soft Control

Integrated Graphic Display

Large Display Panel



Automation

Computerized Operator Support System

Computerized Procedure System

Advanced Alarm System

Critical Function Monitoring System

Levels of Automation



LOA 1: No support and automation

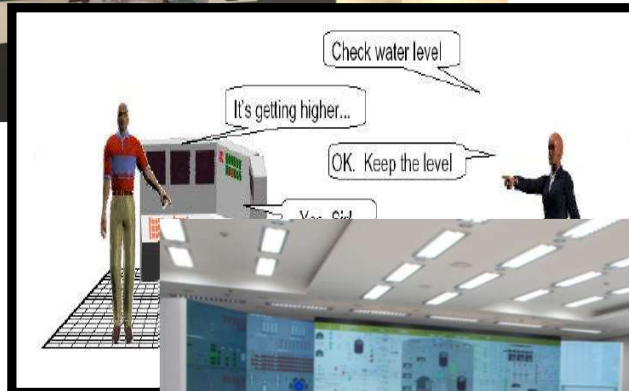


LOA 2: Independent support systems



LOA 3: Integrated support systems

- Computerized procedure system
- Advanced alarm system
- Safety critical function monitoring system



LOA 4: Human-initiated automatic operations

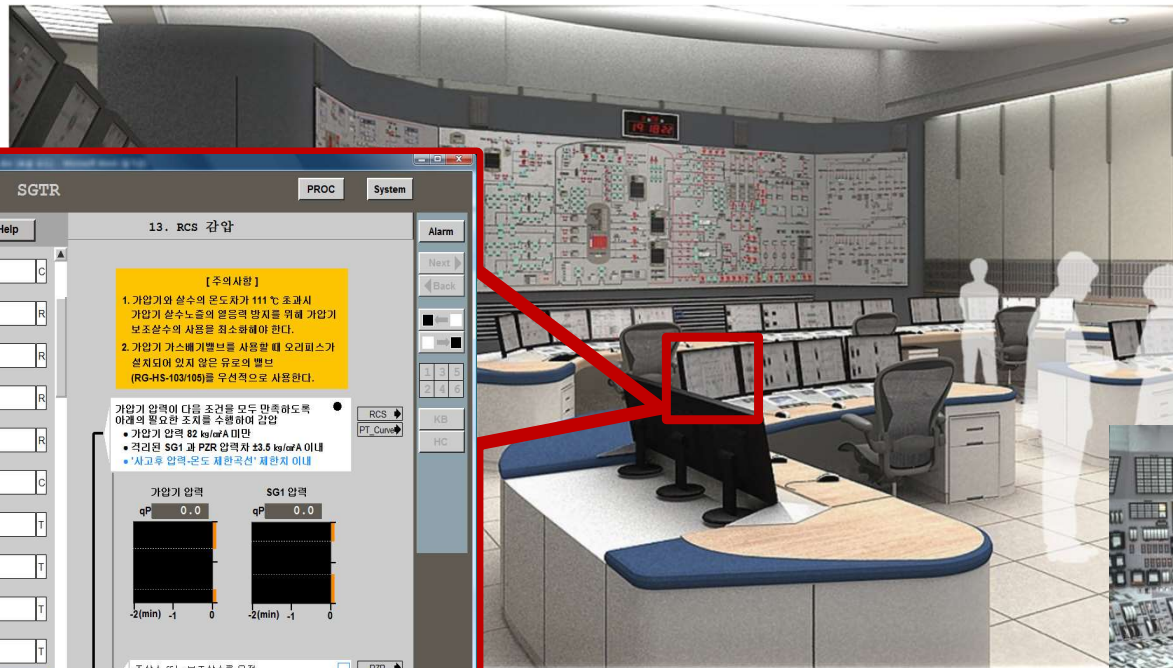
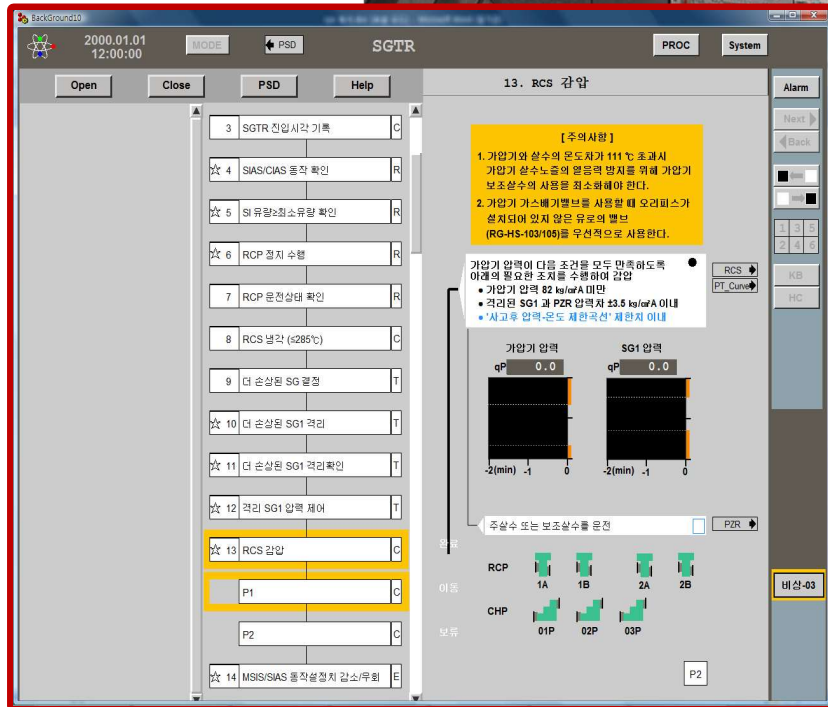
- Virtual collaborator



LOA 5: System-initiated automatic operations

- Operator as supervisor

Computerized Procedure System



| | | |
|-------------------|------------------|-----------|
| 절차서 번호 비상 - 03 | 제목 : 증기발생기 튜브 파열 | 개정번호 : 05 |
| 개정일자 : 20... | | |

| | | |
|----|-------------|-----------|
| 단계 | 예상변동 및 조치사항 | 불만측시 조치사항 |
|----|-------------|-----------|

주 의 사 항

- 가압기와 살수의 온도차가 111℃ 초과시 가압기 살수노출의 열충격 방지를 위해 가압기 보조살수의 사용을 최소화해야 한다.
- 가압기 가스배기밸브를 사용할 때 오리피스가 설치되어 있지 않은 유로의 밸브(RG-HS-103/105)를 우선적으로 사용한다.

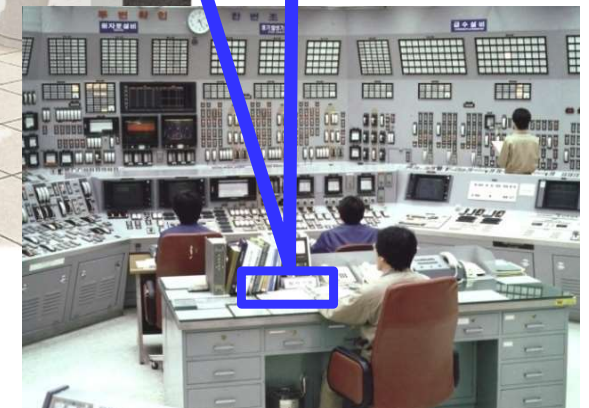
13. 가압기 압력이 다음 조건을 모두 만족하도록 아래의 필요한 조치를 수행하여 감압한다:

- 가압기 압력 82 kg/cm²A 미만 ☐
- 격리된 SG/G 압력과 가압기 압력 차이 < 3.5 kg/cm²A 이내 ☐
- 붙임 5.2 "사고후 압력-온도 제한 곡선" 제한치 이내 ☐
- 강제순환시 영역 A+B 또는 영역 B
- 자연순환시 영역 A+B+C 또는 영역 B+C

13.1 주살수 또는 보조살수를 운전한다. ☐

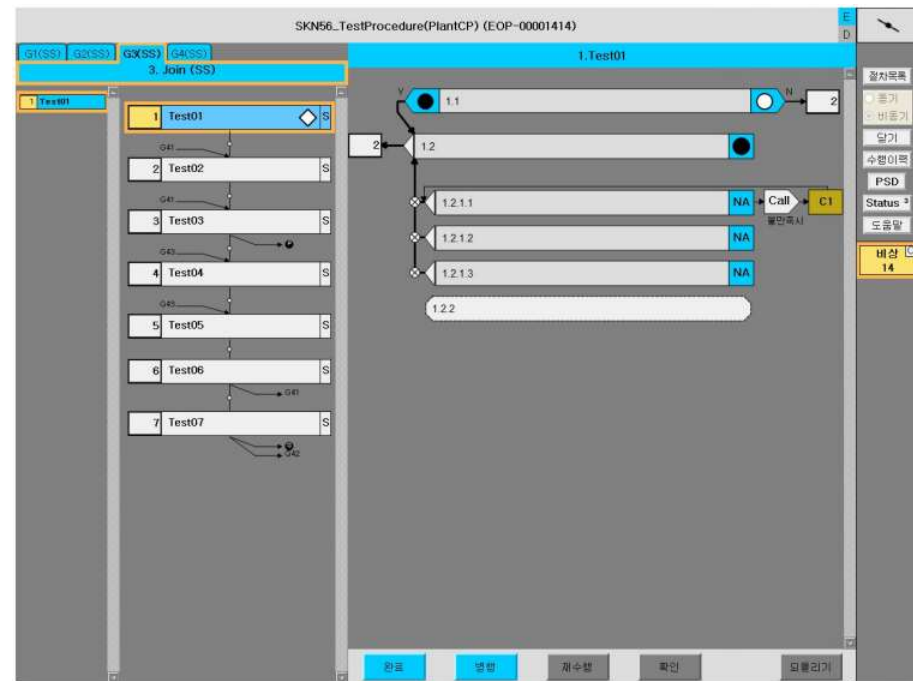
"이 단계는 다음 페이지에 계속됨"

- 계속 수행 또는 비순차적 단계
- 필수 확인 단계



CPS

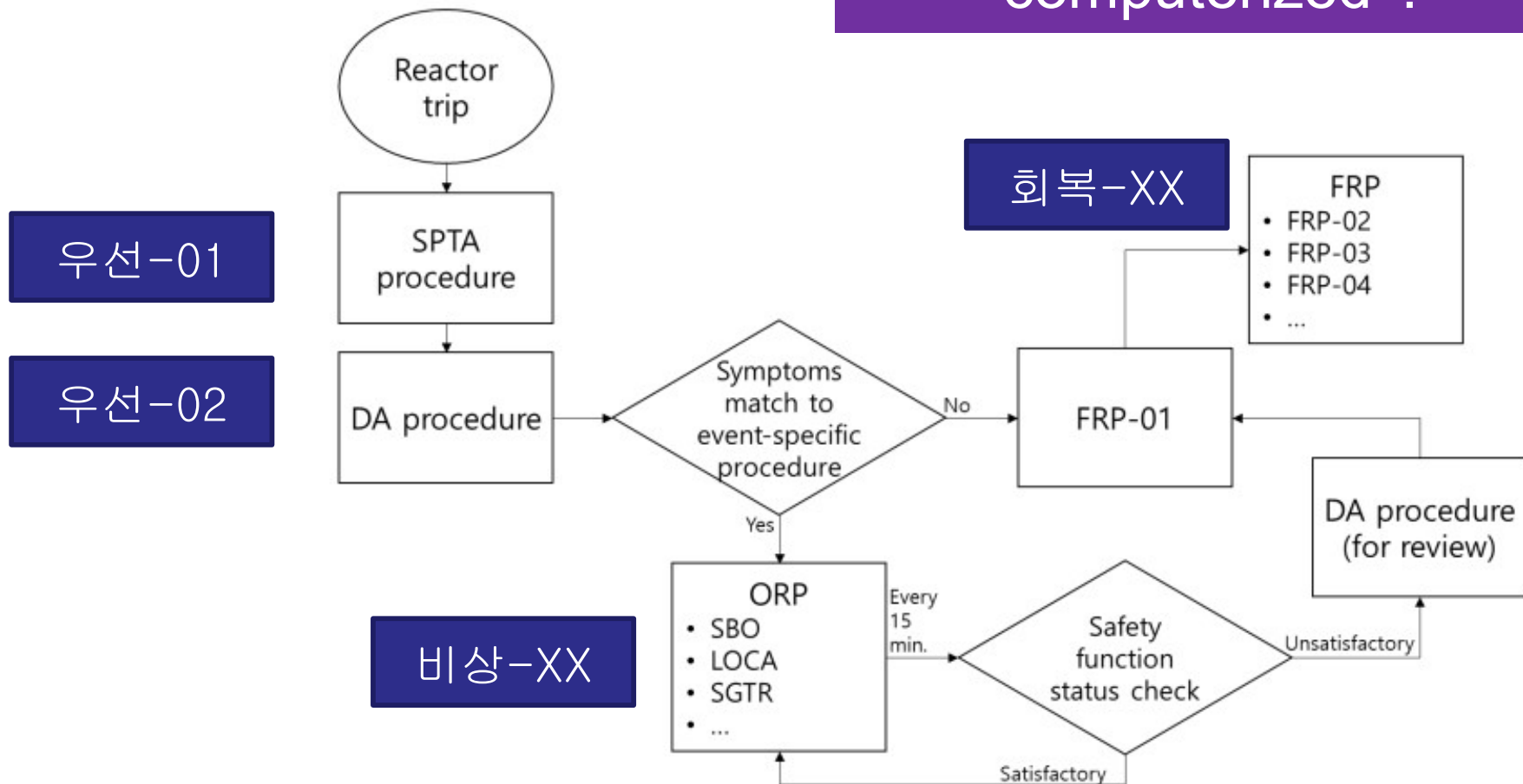
- Functions of APR1400 CPS
 - “완료” 후 다음 단계 진행
 - DCS link button
 - EOP 진입 알림
 - 관련 기기상태, 변수 제공
 - 자동논리
 - Etc.



“Computerized”?

“Computerized form”

Unique features of
“computerized”?



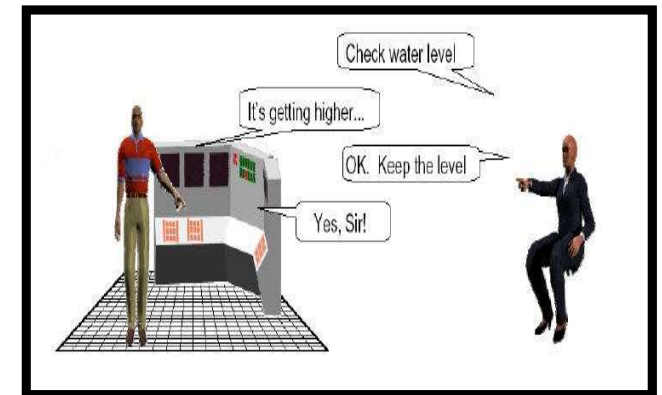
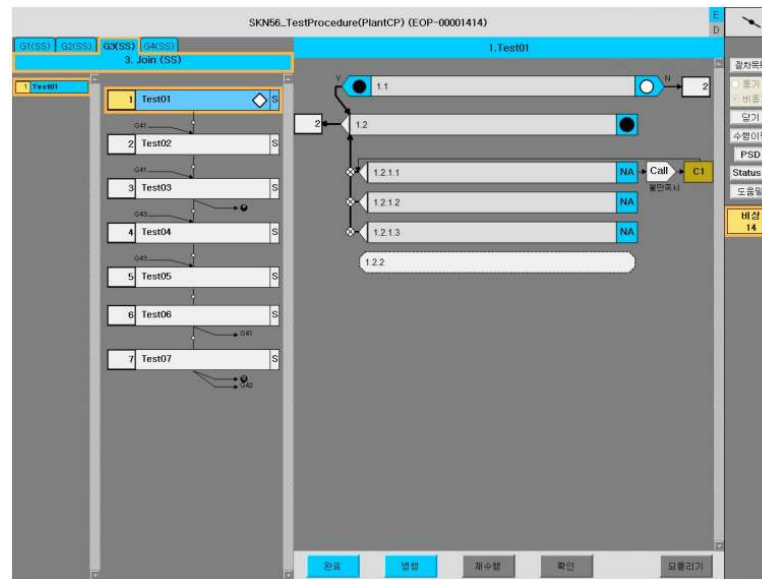
PBP

Computerized form

Intelligent Computerized?

| | | |
|-------------------|------------------|----------------------------|
| 결차서 번호 비상 - 03 | 제목 : 증기발생기 튜브 파열 | 개정번호 : 05 개정일자 : 20 . . |
|-------------------|------------------|----------------------------|

| 단계 | 예상반응 및 조치사항 | 불만족시 조치사항 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| | <p>주의 사항</p> <p>1. 가압기와 살수의 온도차가 111℃ 초과시 가압기 살수노즐의 열충격 방지를 위해 가압기 보조살수의 사용을 최소화해야 한다.</p> <p>2. 가압기 가스배기밸브를 사용할 때 오리피스가 설치되어 있지 않은 유로의 밸브(RG-HS-103/105)를 우선적으로 사용한다.</p> | |
| 13. | <p>가압기 압력이 다음 조건을 모두 만족하도록 아래의 필요한 조치를 수행하여 감압한다:</p> <ul style="list-style-type: none"> 가압기 압력 82 kg/cmA 미만 <input type="checkbox"/> 격리된 S/G 압력과 가압기 압력 차이 ± 3.5 kg/cmA 이내 <input type="checkbox"/> 불임 5.2 "사고후 압력-온도 제한 곡선" 제한치 이내 <input type="checkbox"/> -강제순환시 영역 A+B 또는 영역 B. -자연순환시 영역 A+B+C 또는 영역 B+C. <p>13.1 주살수 또는 보조살수를 운전한다. <input type="checkbox"/></p> | |
| <p>"이 단계는 다음 페이지에 계속됨"</p> <ul style="list-style-type: none"> 계속 수행 또는 비순차적 단계 필수 확인 단계 | | |

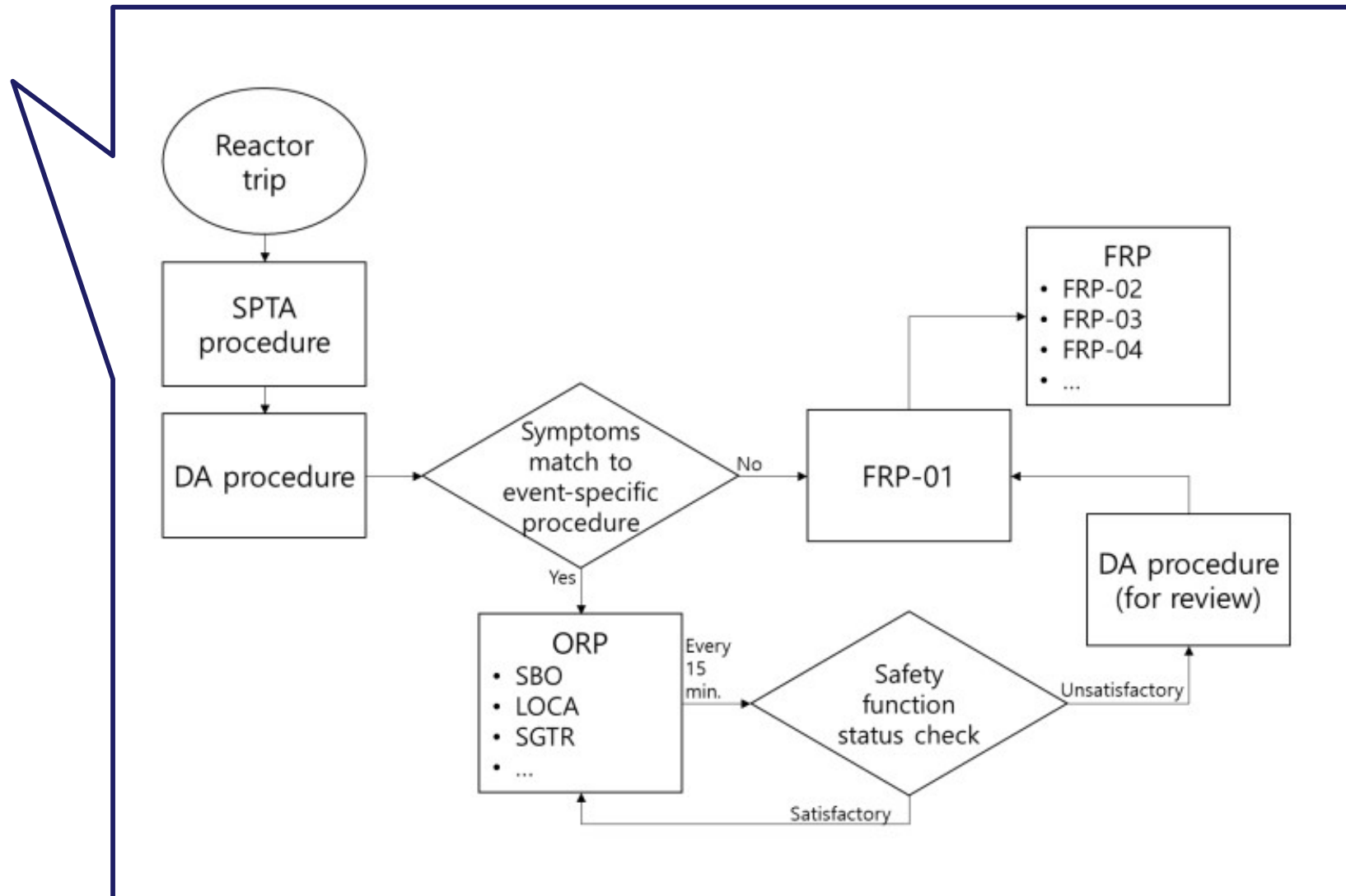


Based on PBP??

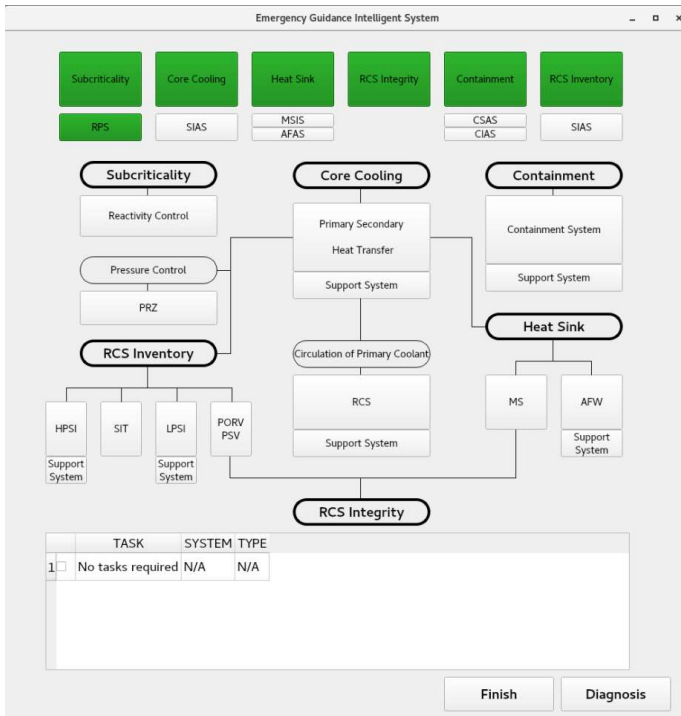
Dynamic EOP

- Purpose (zero-based)
 - Guideline for NPP operations
 - Reduction of human error due to decision burden and high workload
- Functions
 - Situation assessment
 - Diagnosis
 - Response planning/implementation
 - Required actions corresponding the situation
 - Operator support functions
 - Workload reduction
 - Helpful information for decision making
 - Operation validation

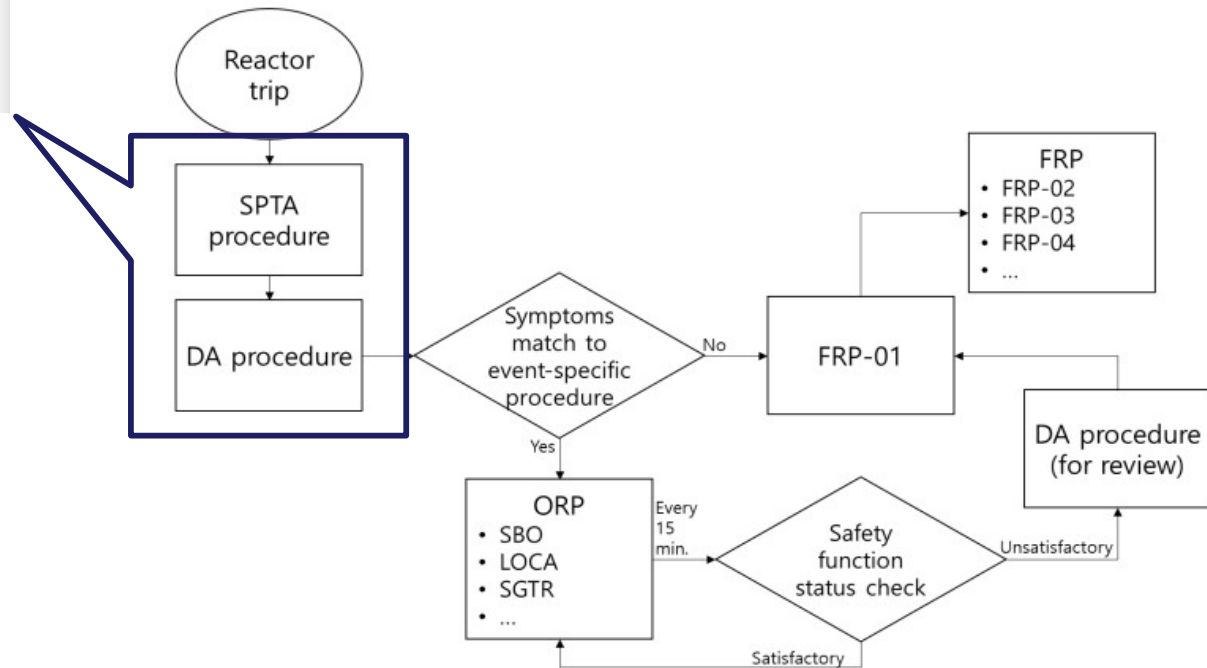
- GOP
- SOP
- ARP
- AOP
- EOP



EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)



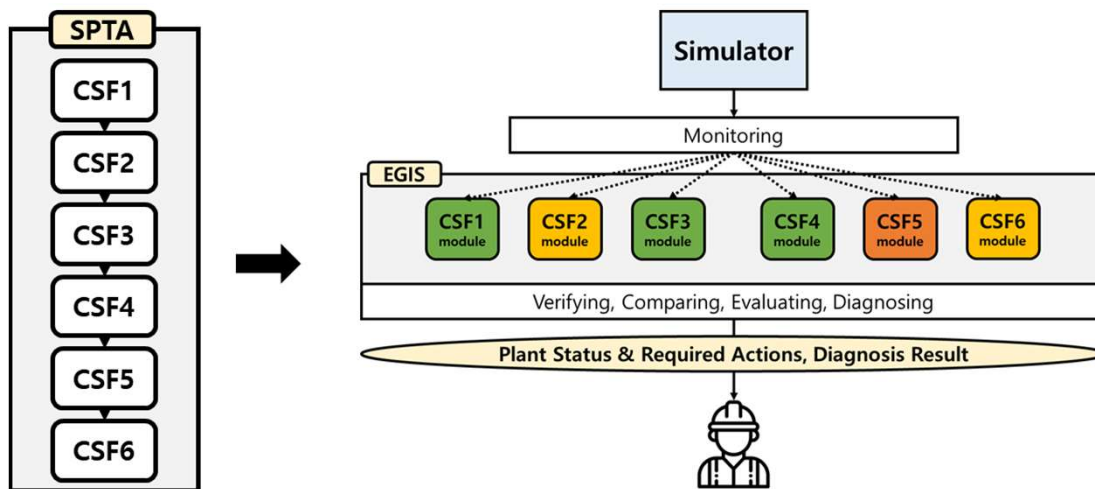
- 원전 비상 초기 운전 절차서 시스템
 - 비상초기운전 절차서 SPTA(Standard Post Trip Action), DA(Diagnosis Action) 대체



EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

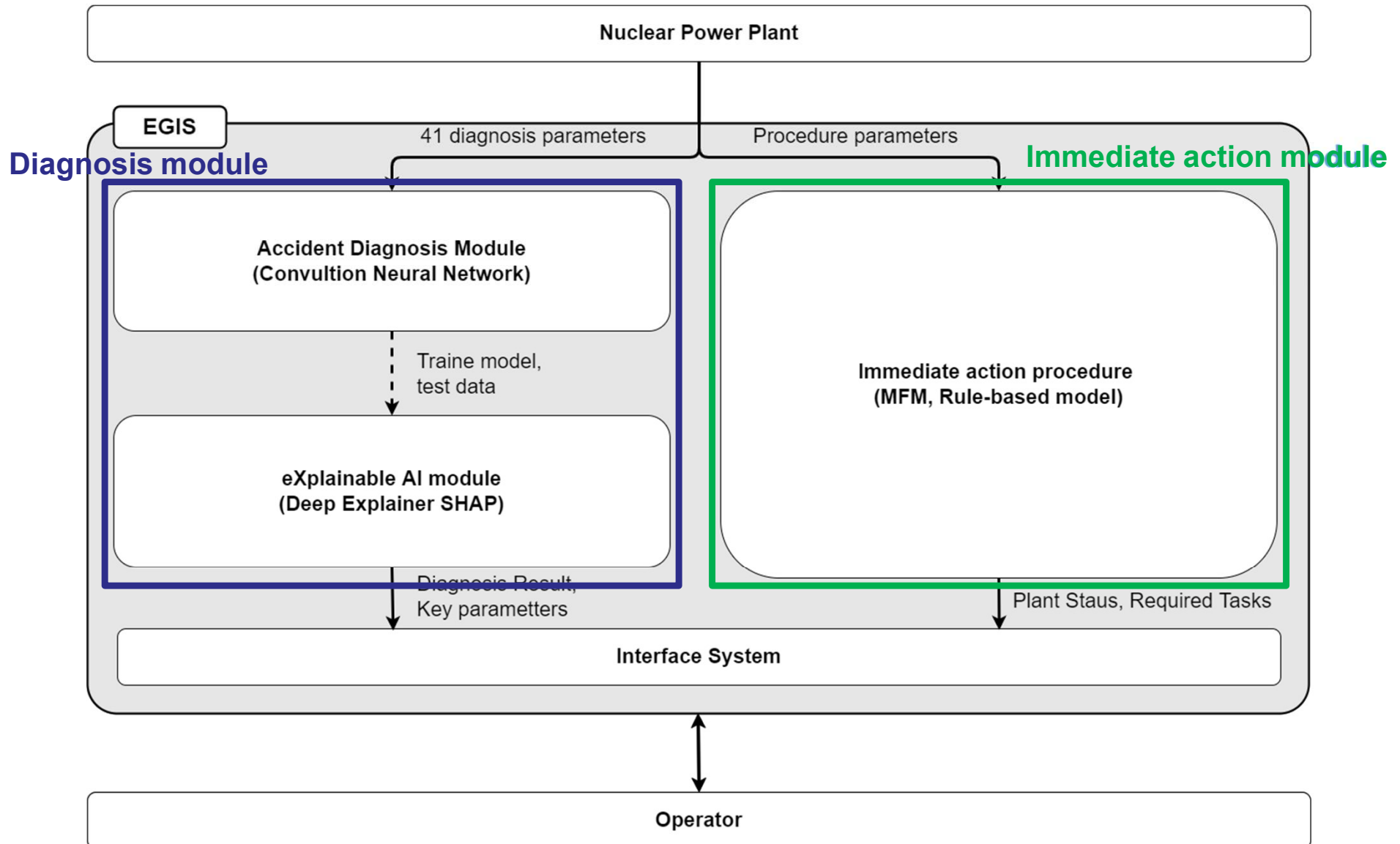
• 원전 비상 초기 운전 절차서 시스템

- 비상초기운전 절차서 SPTA(Standard Post Trip Action), DA(Diagnosis Action) 대체
- 필수안전기능 모듈의 병렬 수행으로 비상 초기 대응 시간 절약
- 감시 및 진단 직무 자동화를 통한 업무부하 감소
- 기능-시스템-기기 구조의 계층적 구조와 우선순위에 따른 색상정보로 직관적 정보제공
- 잠재적인 위험 요소들(ex. 기기냉각계통 이상) 영향분석 및 정보제공



| 색상 | 상태 |
|-------|---------------------------------------------|
| 적 색 | 필수안전기능이 극도로 위반됨 - 즉각적인 운전원의 조치가 필요한 상태 |
| 주 황 색 | 필수안전기능이 상당히 위반됨 - 신속한 운전원의 조치가 필요한 상태 |
| 노 란 색 | 필수 안전기능이 정상을 벗어남 - 부분적으로 운전원의 조치가 필요한 상태 |
| 초 록 색 | 필수안전기능이 만족됨 - 운전원의 조치가 필요 없음 |
| 점 열 | 해당 CSF에 운전원의 조치가 필요한 상태 |

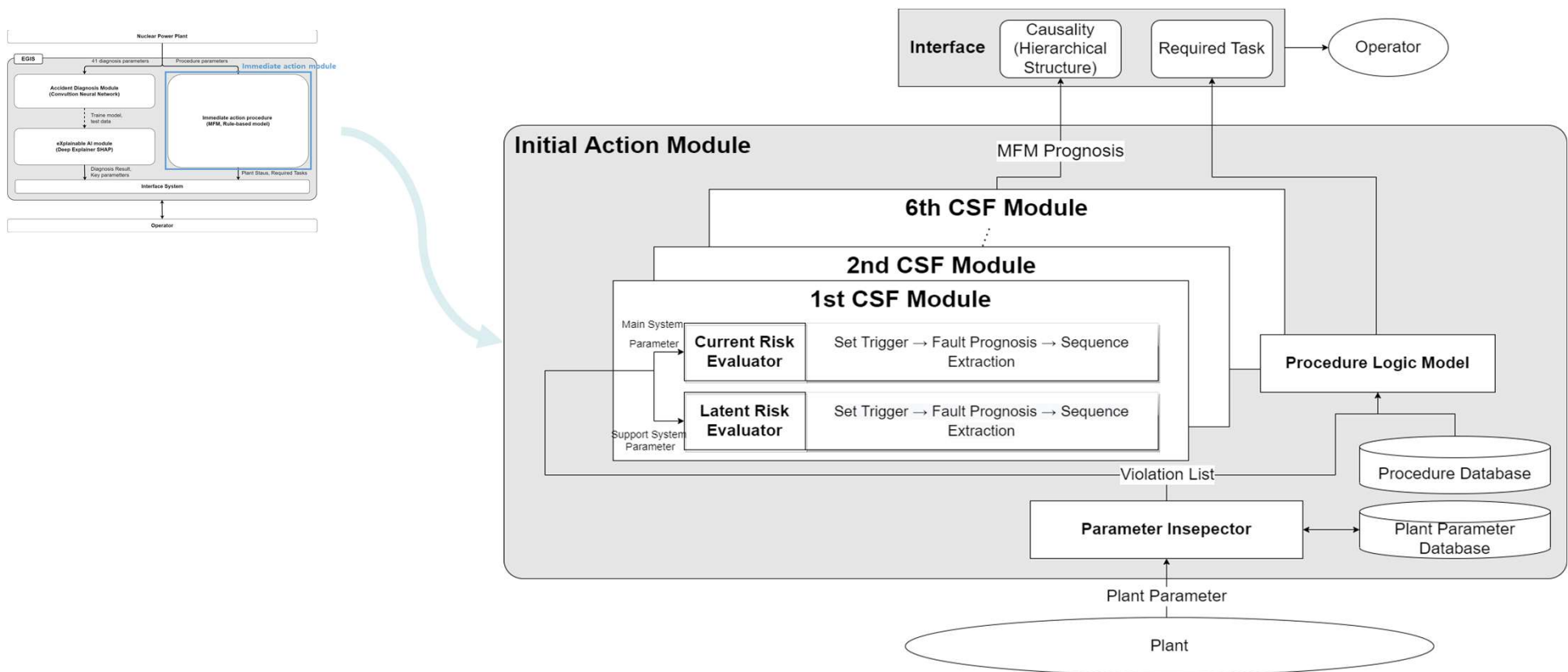
EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)



EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

- Immediate Action Module Framework

- **Parameter Inspector:** Rule-based model (procedure-based), Violated parameters monitoring
- **Procedure Logic Model:** Rule-based model (procedure-based), Checking the required tasks from the violation list
- **Risk Evaluator:** Multilevel Flow Model (MFM)
Causality Analysis



EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

- CSF Color Function

- 기존 필수 안전 기능 진단 자동화

- CSF1: Subcriticality
 - CSF2: Core Cooling
 - CSF3: Heat Sink
 - CSF4: RCS Integrity
 - CSF5: Containment Integrity
 - CSF6: RCS Inventory

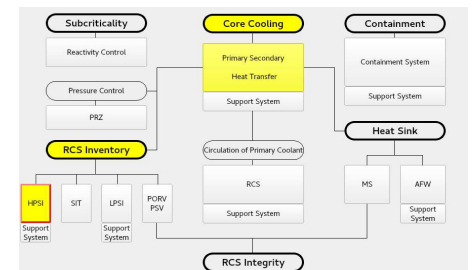
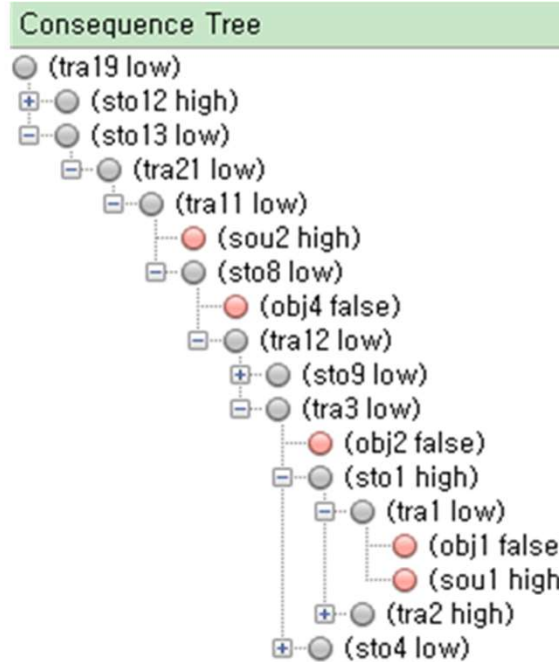
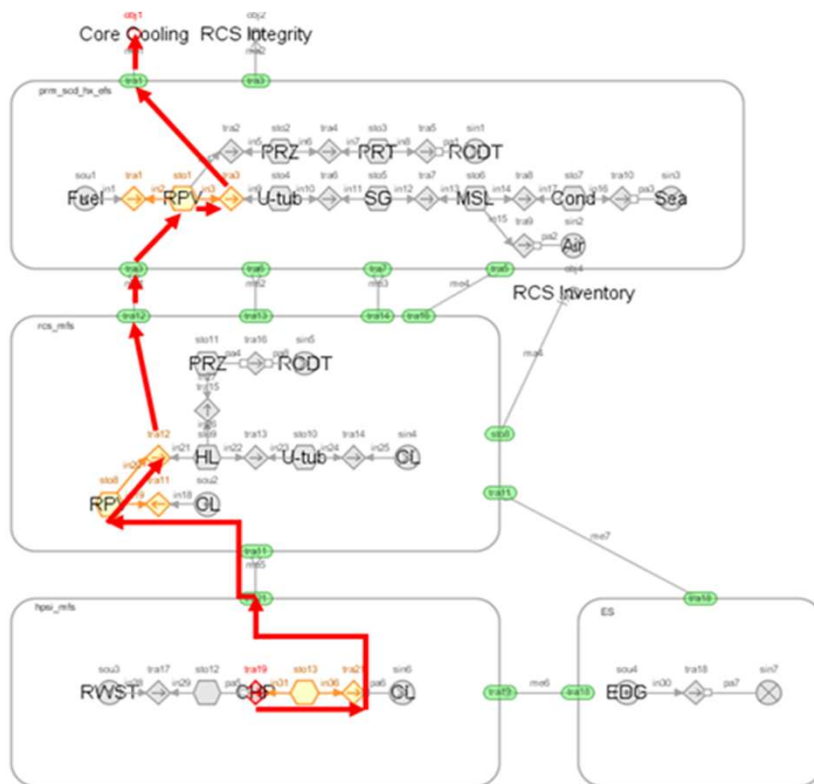
- 실시간으로 상태 판단하여 색상 정보 제공

- 조치 필요 직무 존재할 경우 점멸

| 색상 | 상태 |
|-------|---------------------------------------------|
| 적 색 | 필수안전기능이 극도로 위반됨 - 즉각적인 운전원의 조치가 필요한 상태 |
| 주 황 색 | 필수안전기능이 상당히 위반됨 - 신속한 운전원의 조치가 필요한 상태 |
| 노 란 색 | 필수 안전기능이 정상을 벗어남 - 부분적으로 운전원의 조치가 필요한 상태 |
| 초 록 색 | 필수안전기능이 만족됨 - 운전원의 조치가 필요 없음 |
| 점 멸 | 해당 CSF에 운전원의 조치가 필요한 상태 |

EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

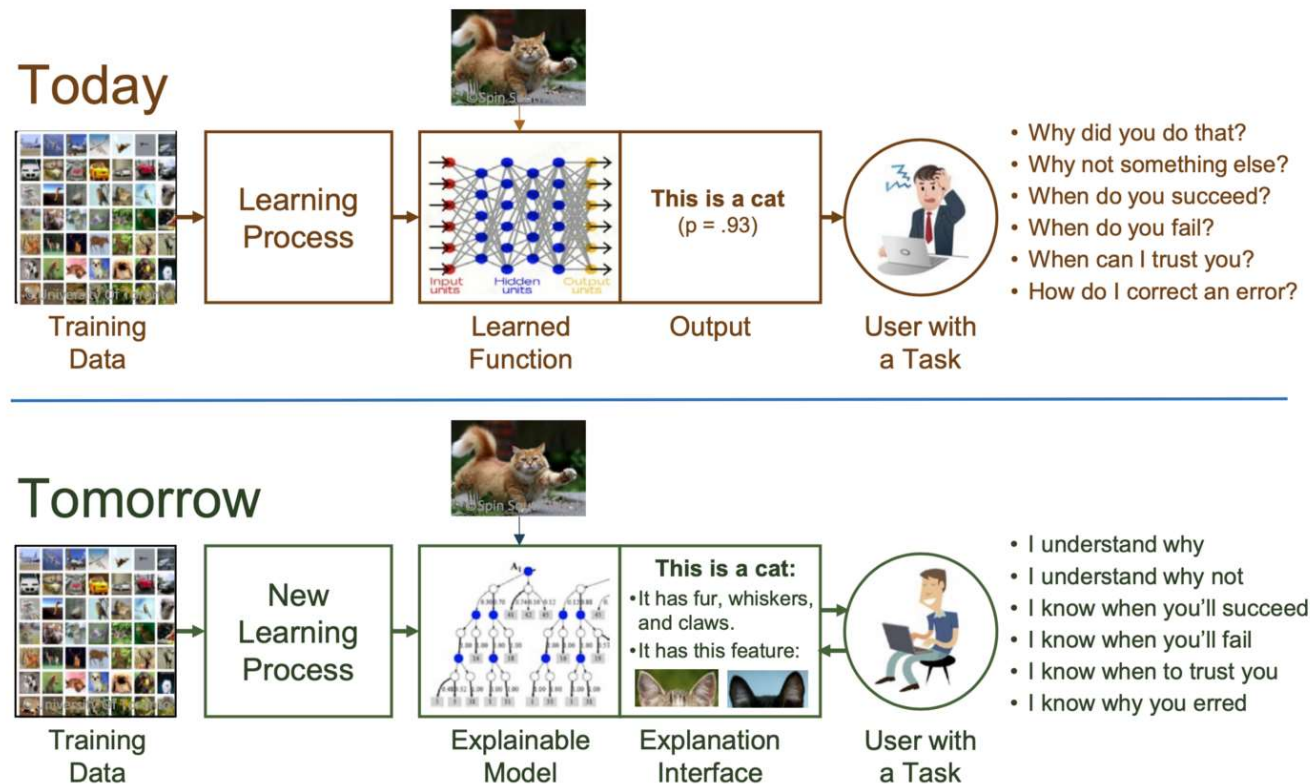
- Immediate Action Module Framework
 - **Risk Evaluator:** Current risk evaluator/Latent risk evaluator
 - Failure causality analysis
 - Multilevel Flow Modelling Analysis
 - High priority – Safety system - Urgent tasks – Current risk evaluator
 - Low priority – Non-safety system – Not urgent tasks – Latent risk evaluator



CHP#1 Failure scenario MFM prognosis

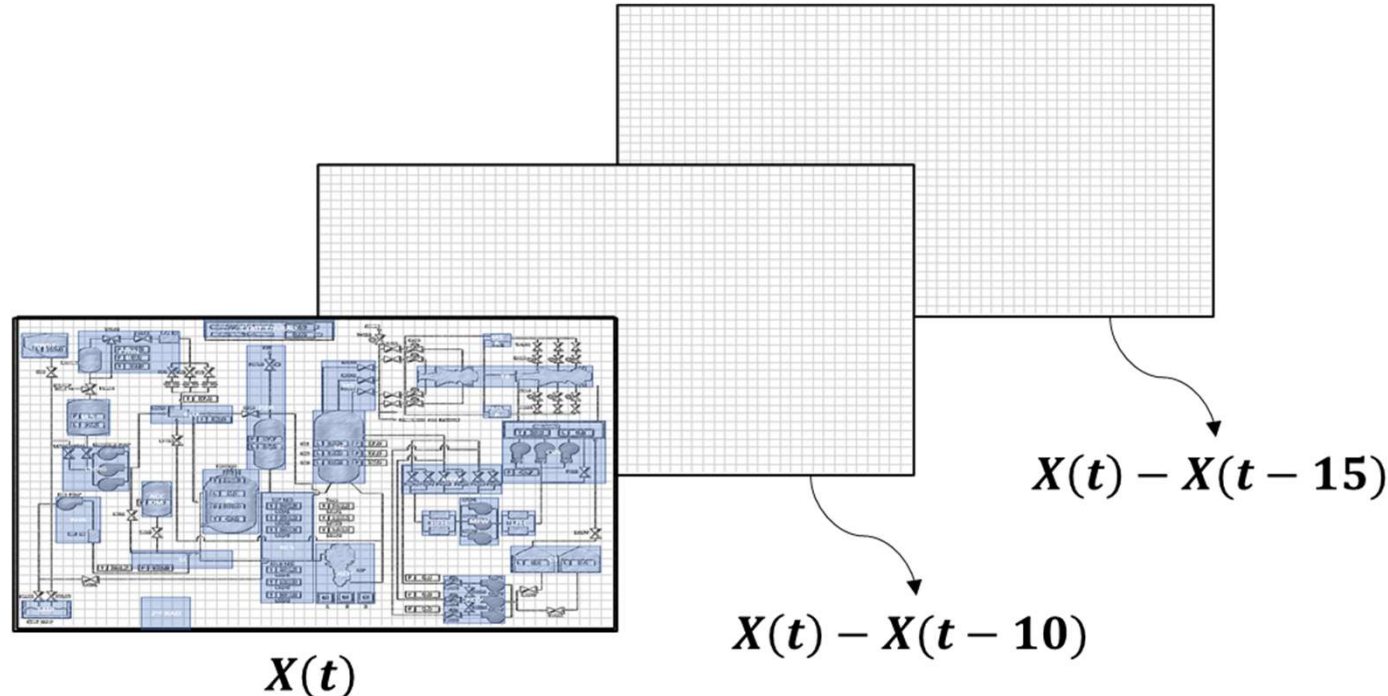
EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

- Accident Diagnosis Module with XAI
 - Diagnose the current situation
 - Provide the reasons of decision making



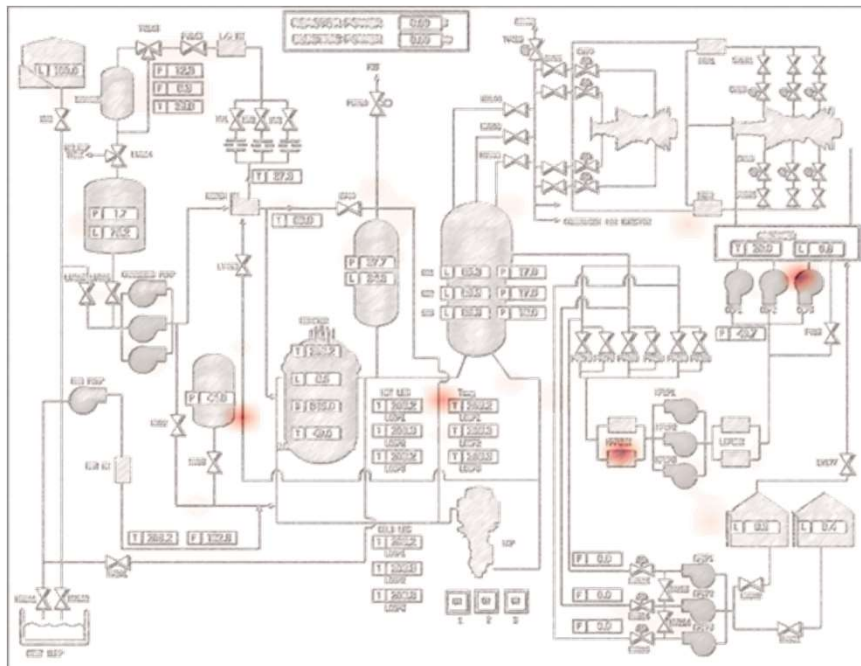
EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

- Accident Diagnosis Module
 - Model
 - Two **Conv2D** layers (16 filters with 2*2 size)
 - Input shape
 - **Mapping 466 parameters point on LDP (38*39) of CNS simulator**
 - 2-dimensional data stacking with 3-channel structure
 - Current status + change information



EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

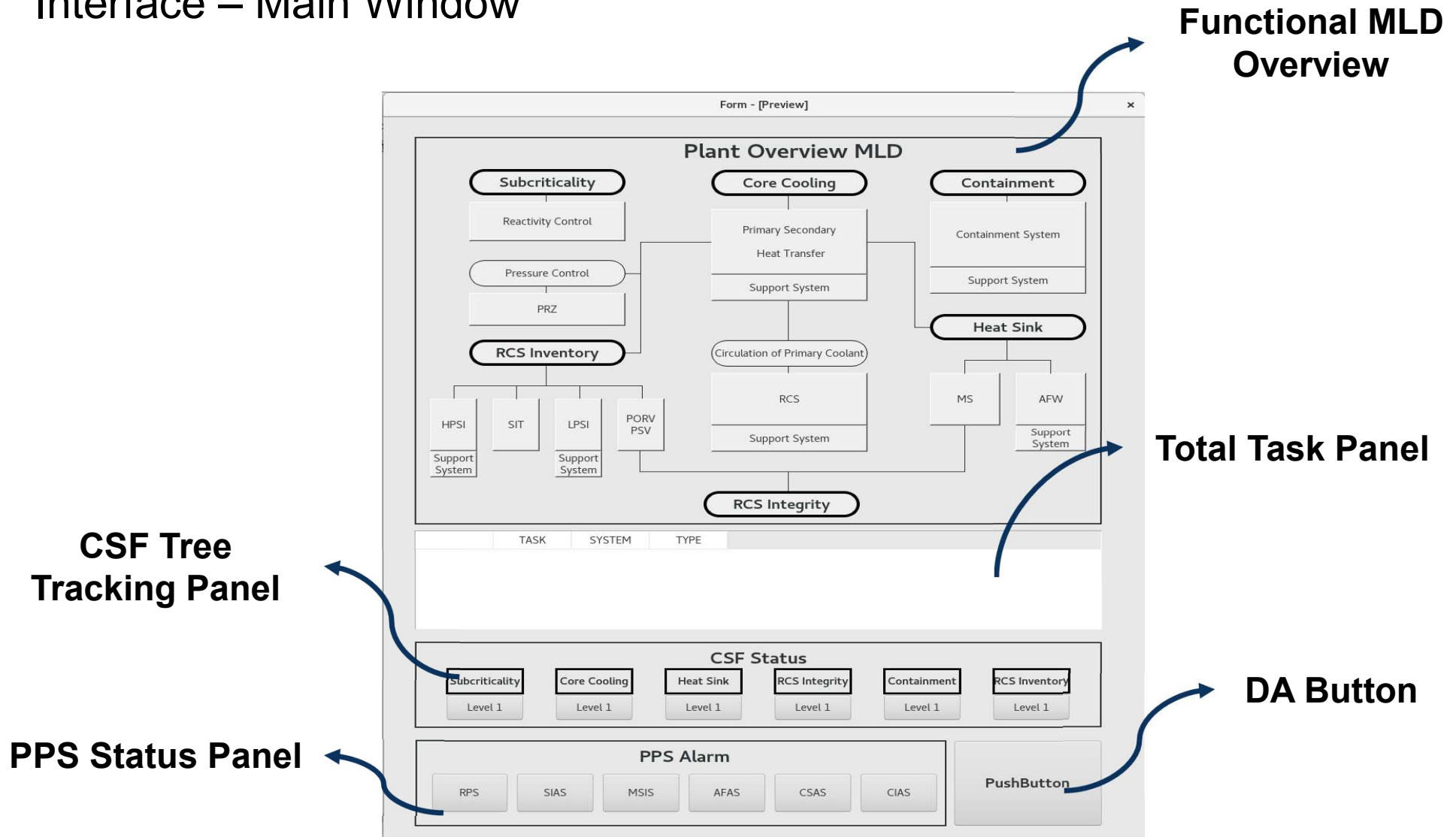
- **eXplainable AI Module**
 - Guided Grad-CAM
 - Guided Backpropagation + Grad-CAM
 - One of the explanation technique for **only convolutional neural networks**
 - Reflect existence of parameter change
 - (*Relevance score* \times *Change score while 15 s*)
 - Example causative systems of LOAF-pump case



Main feedwater system
Condensate system
Reactor coolant system

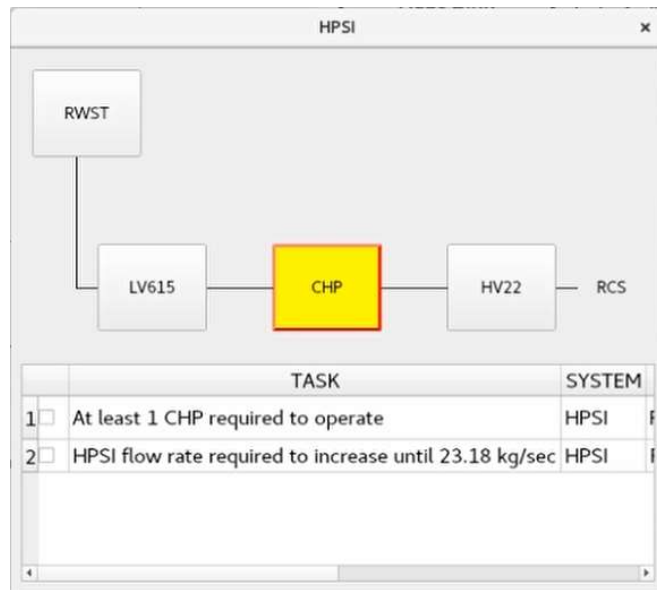
EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

- Interface – Main Window

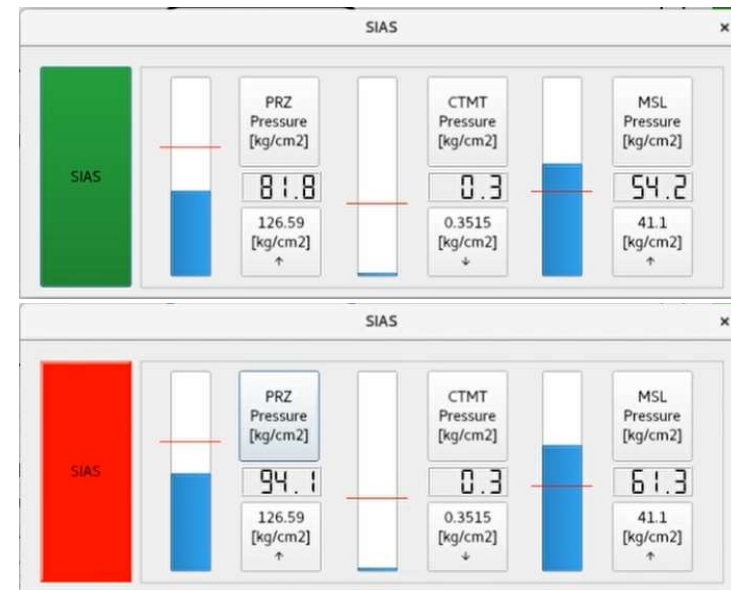


EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

- Interface – Sub Windows



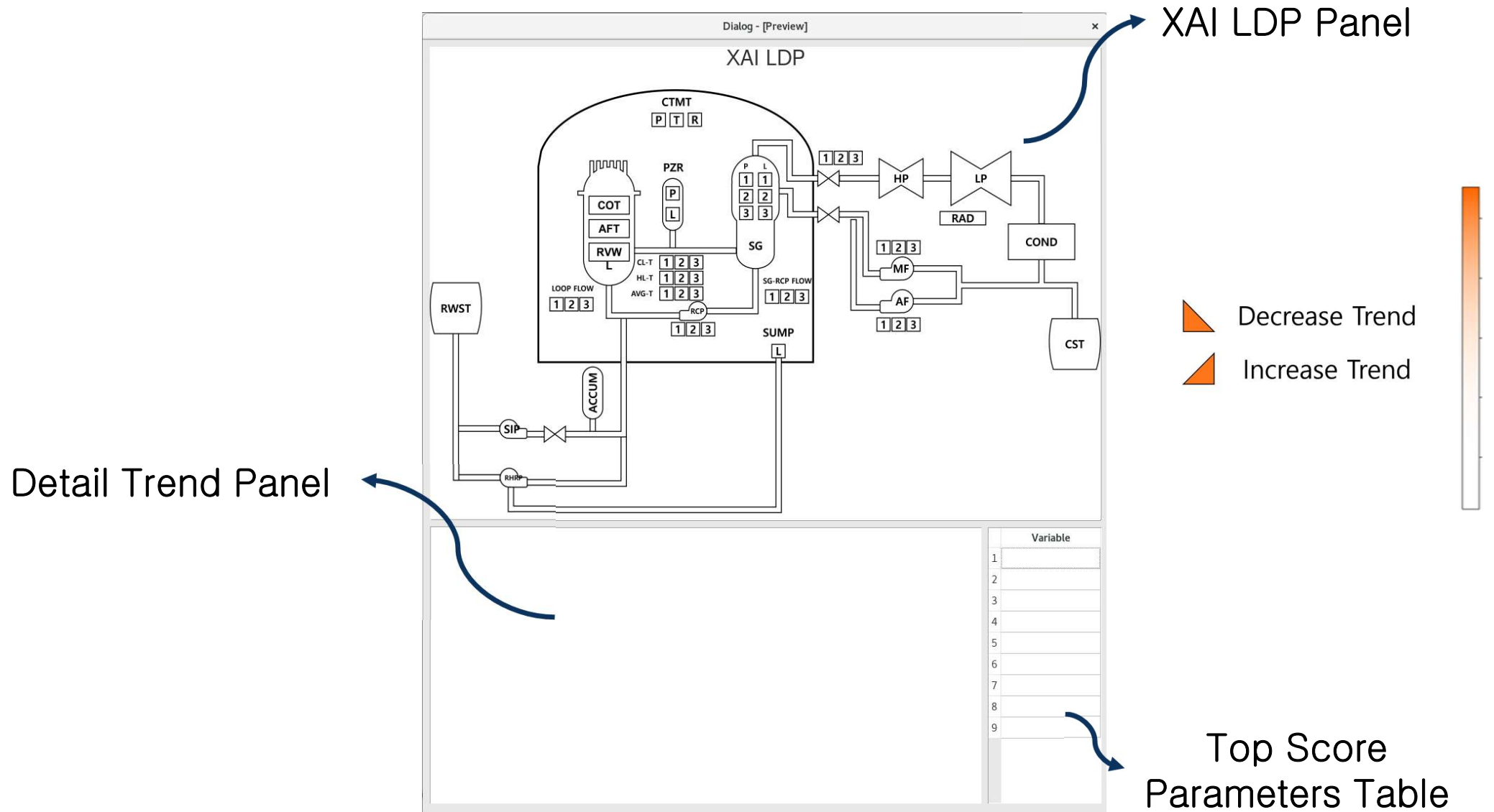
**Detail System +
Detail Task Window**



Detail PPS Status Window

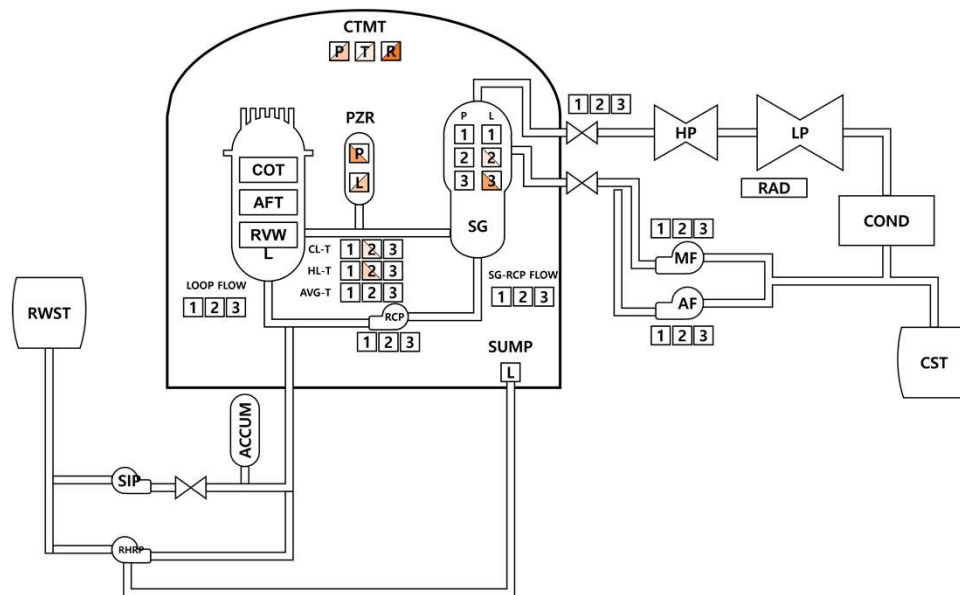
EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

- Interface – DA Window

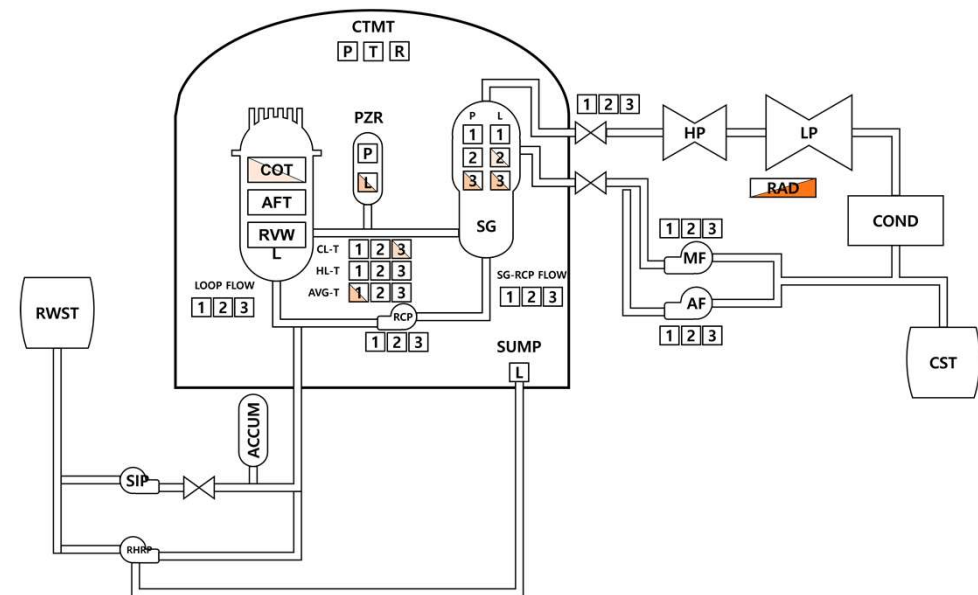


EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

- Interface – DA Window



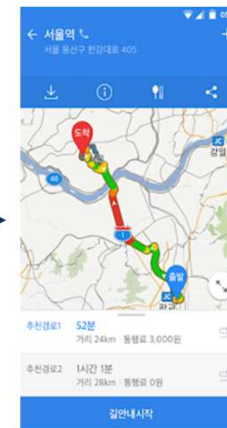
LOCA



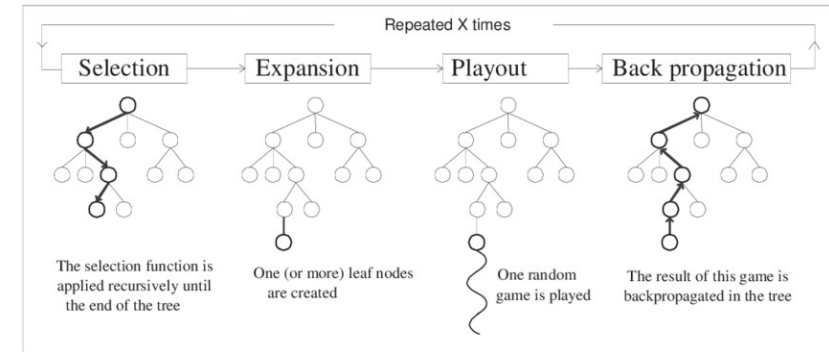
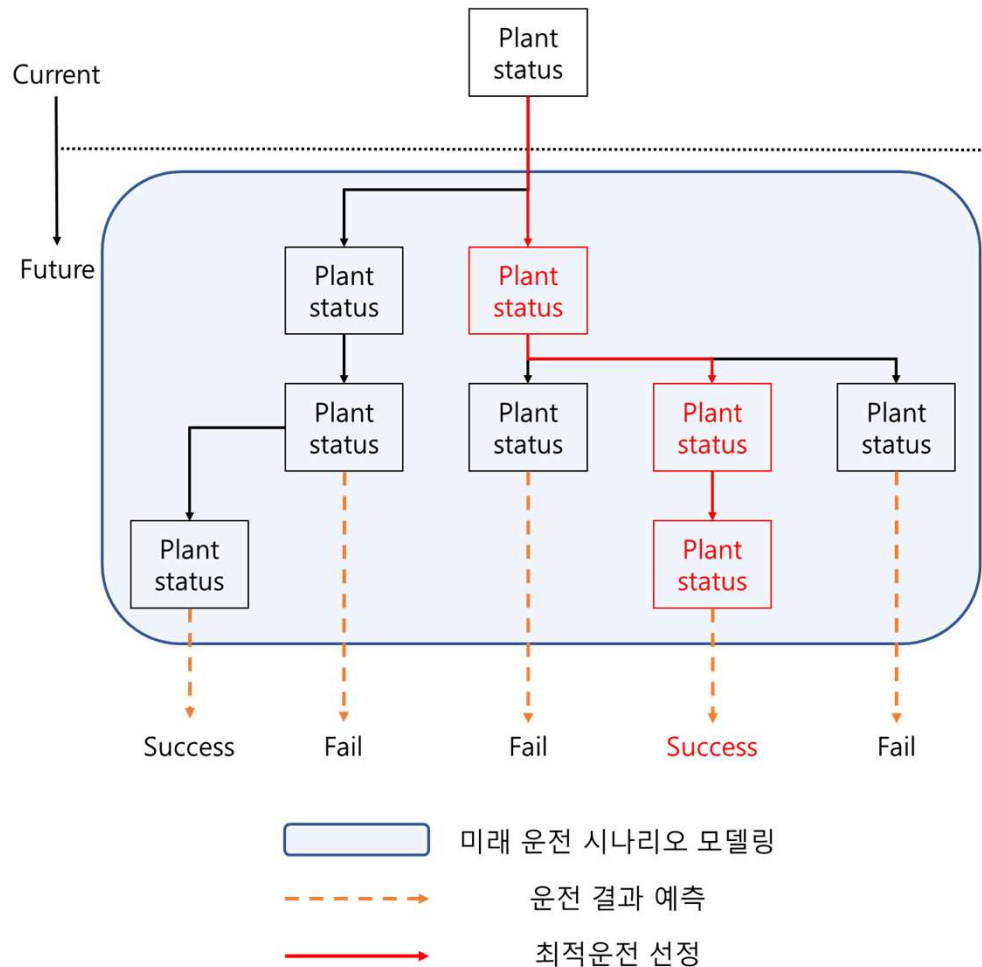
SGTR

EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)

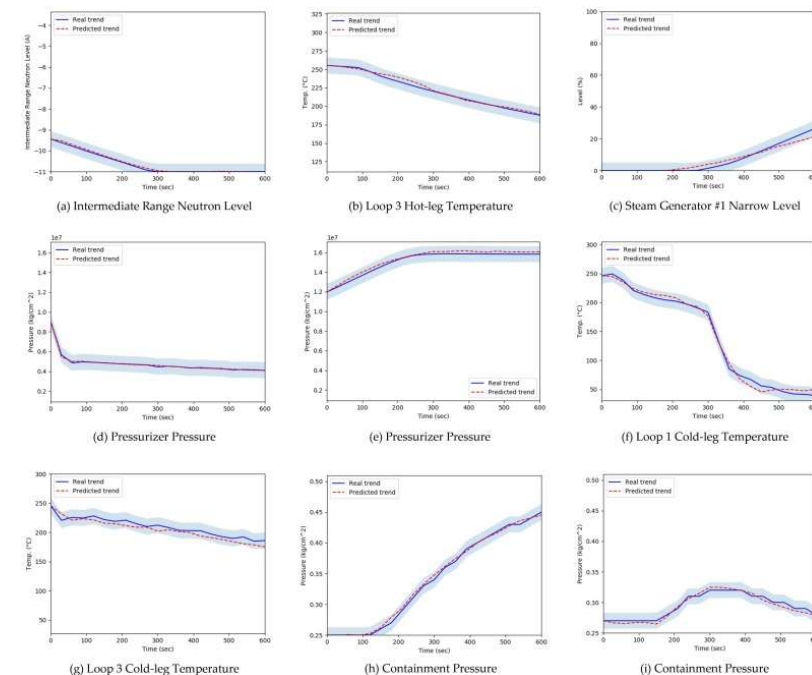
- Optimized Operating Procedures
 - 가능한 모든 시나리오에 따른 미래 원전 상태를 예측하여 최적운전을 선정 및 제안
 - 발전소 미래 운전 시나리오 모델링
 - 발전소 운전 결과 예측
 - 원전 상태 예측 결과 기반 최적운전 선정



EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)



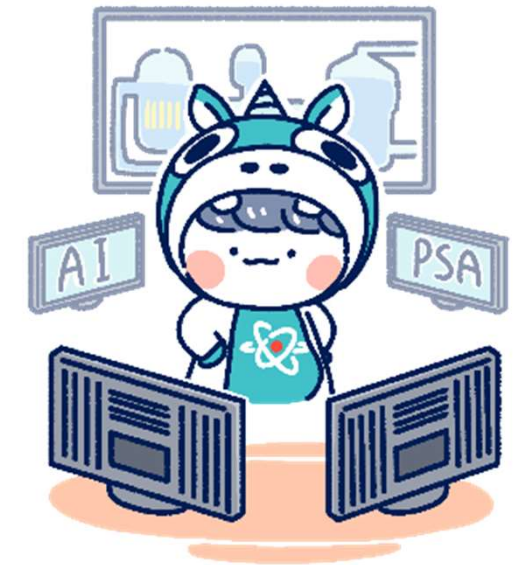
Prediction using deep learning based Surrogate model



Summary

- Dynamic Emergency Operating Procedure was proposed.
- EGIS (Emergency Guidance Intelligent System)
 - Immediate Action Module for STPA
 - Parameter Inspector
 - Procedure Logic Model
 - Risk Evaluator
 - AI Diagnosis Module for DA
 - Accident Diagnosis
 - Reason analysis using XAI
 - Optimized Operating Procedure
 - Real time plant risk evaluation
 - Optimized Operation suggestion based on the future prediction





Thank You for your attention.

Q&A