


인공지능 기반 원전 비정상판단 기술개발 - 4차산업 기술 적용 검토



2021.10.20

CONTENTS



연구과제 개요

- 인공지능 기반 비정상 판단기술 개발



4차산업 기술 적용 검토






연구과제 개요

- 인공지능 기반 비정상 판단기술 개발

인공지능 기반 원전 기동 및 정지 운전지원 기술개발

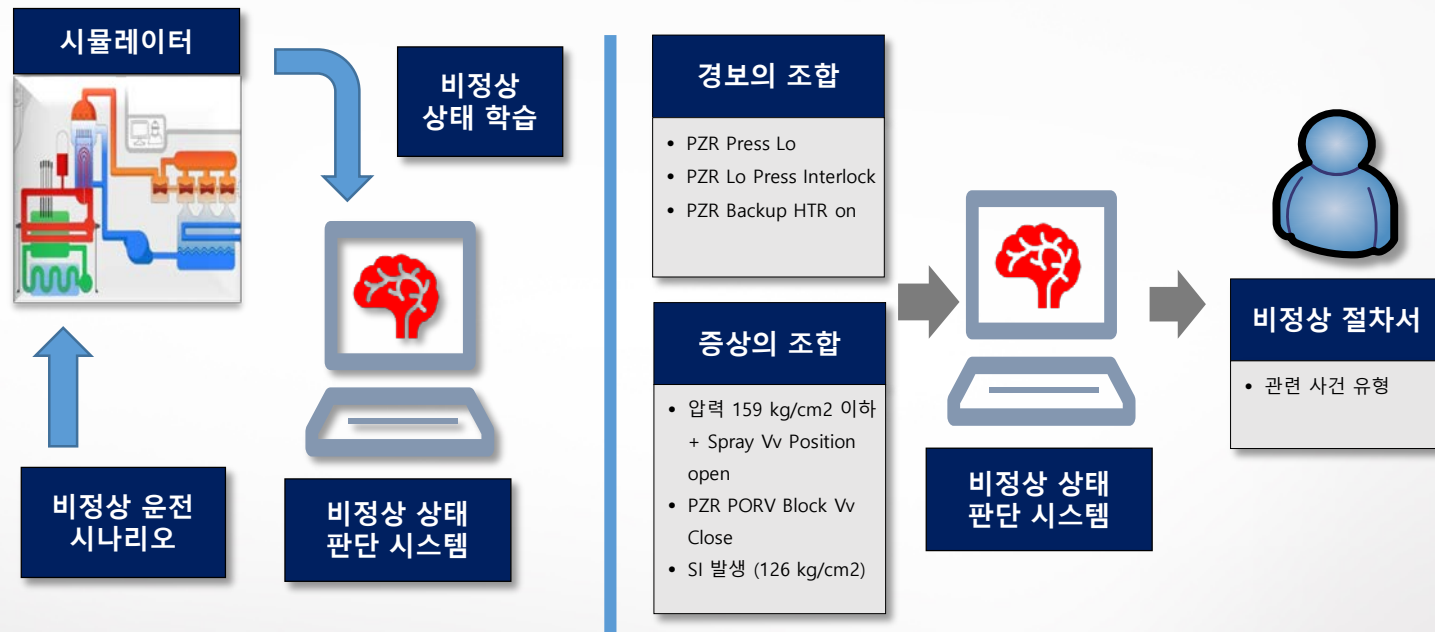
○ 최종 목표

- ① 인공지능을 이용한 발전소 기동 정지 운전 상태 감시 기술 개발
- ② 인공지능을 이용한 발전소 기동 정지 운전 자동화 기반 기술 개발

적용위치	개발시스템	필요기반기술
발전소 주제어실 	운전지원 (한수원) <ul style="list-style-type: none"> ○ 기동/정지 운전 지원 ○ 비정상 운전 진입 상태 판단 	인공지능 모델 (UNIST) <ul style="list-style-type: none"> ○ 운전 지원 / 운전 자동화를 위한 인공지능 모델 개발
I&C 시스템 	운전자동화 (KAERI) <ul style="list-style-type: none"> ○ 계측 제어 시스템에 설치되어 기동/정지 운전 자동화 	
원전 종합상황실 	운전 상태 감시 (엠앤디) <ul style="list-style-type: none"> ○ 본사 종합상황실에 설치되어 기동/정지 운전 상태감시 	

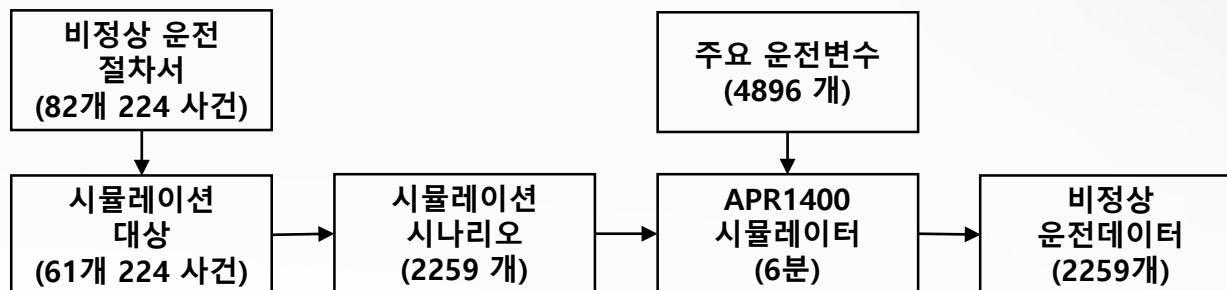
비정상 운전지원 기술 개발 필요성

- 발전소 비정상 상태 발생시 어떤 비정상 절차를 수행해야 하는지 판단하여 알려주는 시스템
 - ✓ 신고리3호기에는 비정상 운전 절차서 82개가 개발되어 사용되고 있음
- 비정상 운전 절차서 및 운전 시나리오 분석 (판단 논리 개발 및 운전자료 생성 시나리오 개발)
- APR1400 시뮬레이터 모델을 활용한 비정상 운전 자료 생성 (운전 자료 생성 시스템 개발)
- (규칙기반 + 인공지능모델) 을 활용한 비정상 상태 판단 시스템 개발
- 중앙연구원 APR1400 시뮬레이터에 통합하여 시스템 성능 검증 시험 수행 및 개선 방안 도출



비정상 운전 이력 생성

- 실제 운영중인 발전소에는 비정상 발생 운전 이력이 충분하지 않음
- APR1400 시뮬레이터를 활용하여 비정상 운전 이력을 생성하여 인공지능 모델을 훈련함
- 시뮬레이션 데이터와 발전소 운전데이터를 공동으로 활용하는 방안 필요함

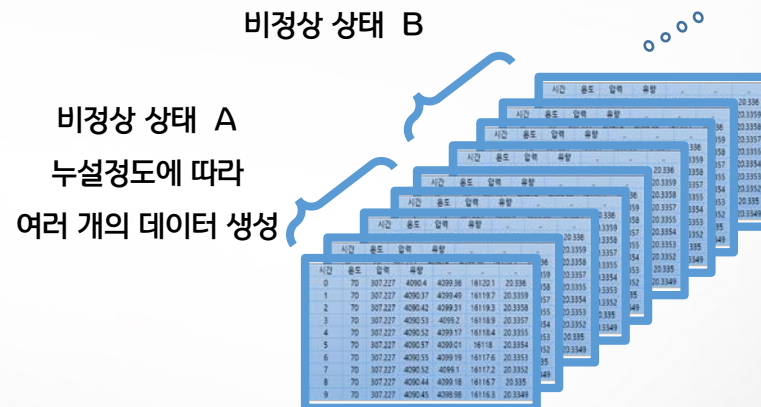


4896개

120개

시간	온도	압력	유량
0	70	307.227	4090.4	4099.36	16120.1	20.336
1	70	307.227	4090.37	4099.49	16119.7	20.3359
2	70	307.227	4090.42	4099.31	16119.3	20.3358
3	70	307.227	4090.53	4099.2	16118.9	20.3357
4	70	307.227	4090.52	4099.17	16118.4	20.3355
5	70	307.227	4090.57	4099.01	16118	20.3354
6	70	307.227	4090.55	4099.19	16117.6	20.3353
7	70	307.227	4090.52	4099.1	16117.2	20.3352
8	70	307.227	4090.44	4099.18	16116.7	20.335
9	70	307.227	4090.45	4098.98	16116.3	20.3349

비정상 운전데이터
1개 Data set 구성



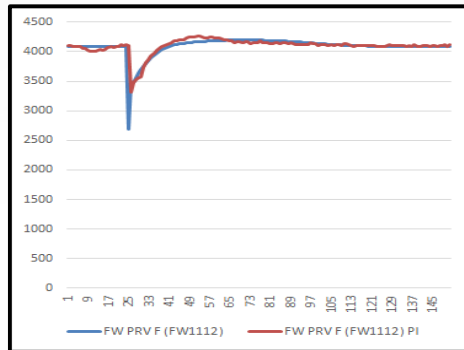
2259개 Data set

전체 Dataset 생성에 약 16일 소요됨

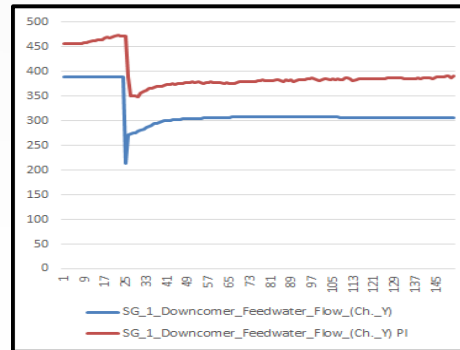
시뮬레이션 데이터와 실제 발전소 데이터 비교

- 시뮬레이션 성능 확인 - 주급수 펌프 정지
 - ✓ 2017.2.11에 신고리 3호기 발생한 발전소 데이터와 시뮬레이션 결과 비교
- 운전범위는 다를 수 있으나 비정상 현상에 대한 동적 특성은 유사함
- 발전소 데이터와 시뮬레이션 데이터를 혼합하여 훈련하는 방안 수립 필요 (2단계)

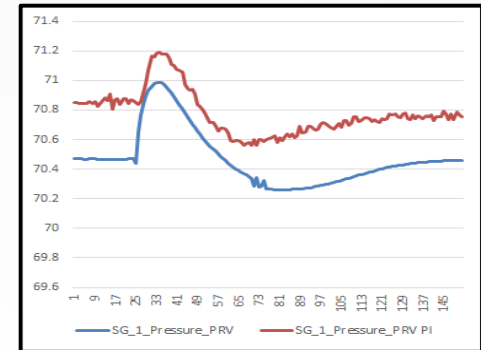
주급수 총 유량



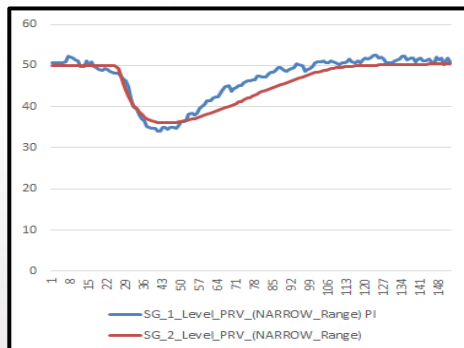
SG Downcomer 유량



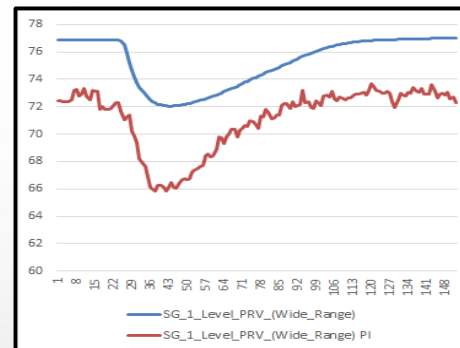
SG 압력



SG 수위 협역



SG 수위 광역



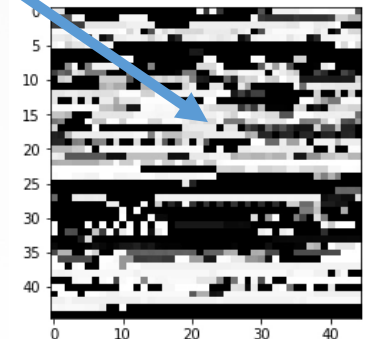
— 시뮬레이터
— 신고리3호기

비정상 운전 상태 판단 시스템

- 비정상 운전 상태 시각화 하여 인공지능 모델에 학습함
- 데이터의 유형에 맞게 디지털데이터의 처리 및 아날로그 데이터의 Normalization 수행
- 합성곱 신경망 (Convolutional Neural Network)가 이미지 분석에 높은 정확도를 보임

고장에 의한 1차 영향

시간	온도	압력	유량
0	70	307.227	4090.4	4099.36	16120.1	20.336
1	70	307.227	4090.37	4099.49	16119.7	20.3359
2	70	307.227	4090.42	4099.31	16118.2	20.3358
3	70	307.227	4090.53	4099.2	16118.9	20.3357
4	70	307.227	4090.52	4099.17	16118.4	20.3355
5	70	307.227	4090.57	4099.01	16118	20.3354
6	70	307.227	4090.55	4099.19	16117.6	20.3353
7	70	307.227	4090.52	4099.1	16117.2	20.3352
8	70	307.227	4090.44	4099.18	16116.7	20.335
9	70	307.227	4090.45	4098.98	16116.3	20.3349

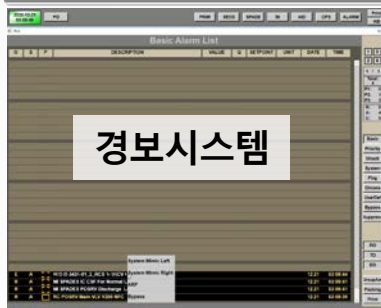


reshape (n,n),
normalization

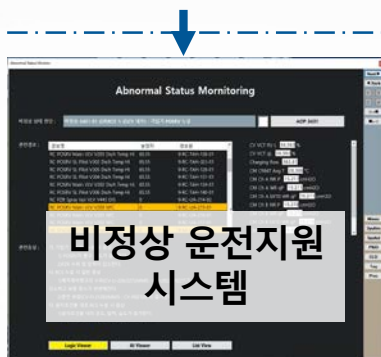
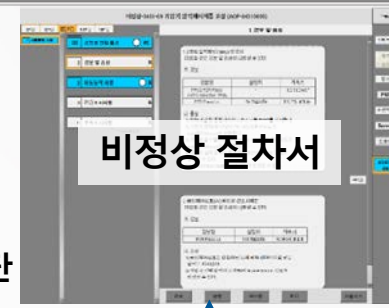
- 발전소의 현재 상태를 시각화
- 비정상에 따라 시각화 이미지를 학습하고 판단
- 판단결과에 기여도가 큰 운전변수 제시

비정상 운전지원 시스템 구성 및 연계 방안

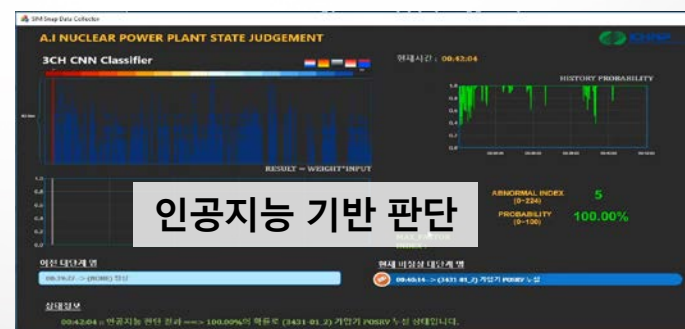
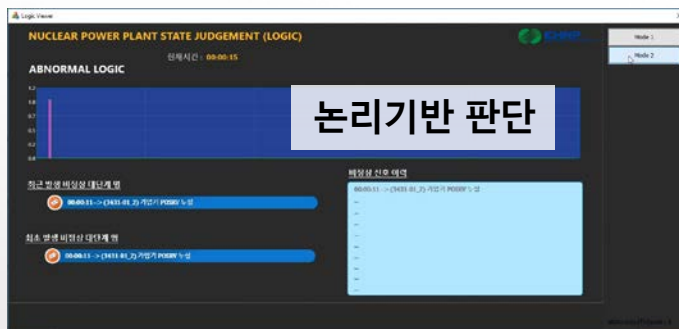
- APR1400 MMIS 기반 비정상 운전상태 판단 시스템 적용 방안
- 기존 MMIS의 설계 개념을 사용하여 경보로 비정상 상태를 제시하고 운전원이 절차서 진입을 결정함



운전원이 판단
(기존시스템)



운전지원시스템이
해당 비정상 절차를 제시함





4차산업 기술 적용 검토

1. 인공지능 시스템과 안전기능간 우선순위
2. 인공지능 시스템의 전산부하
3. 설명가능한 인공지능 활용

II.

4차산업 기술 적용 검토

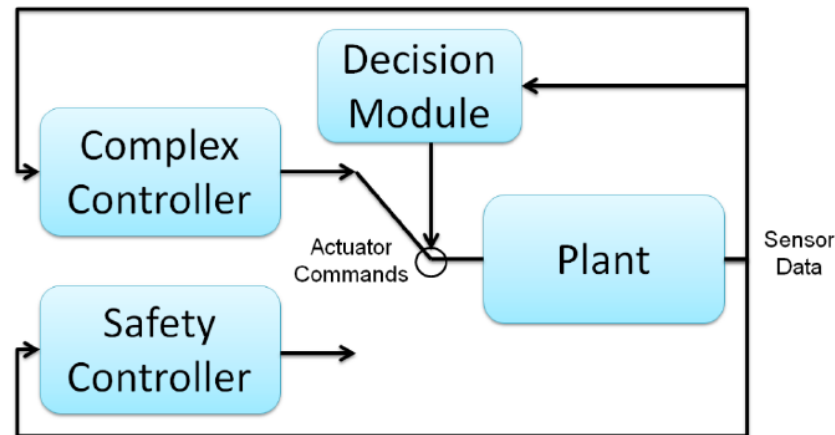
1. 인공지능 시스템 우선순위

항공분야 비안전 계통과 안전계통 설계 검토 (1)

Safe design using Simplex



- Under the **Simplex architecture**, the control system is divided into a high-assurance-control subsystem and a high-performance-control subsystem.



6

- Satanley Bak, et al, "Real-time reachability for verified simplex design", IEEE Real-Time Systems Symposium, p138, 2014
- IAEA Technical Meeting on Safety Aspects of Using Smart Digital Devices in Nuclear Systems

II.

4차산업 기술 적용 검토

1. 인공지능 시스템 우선순위

항공분야 비안전 계통과 안전계통 설계 검토 (2)

An Example: Boeing 777



- Boeing 777 flight control system uses triple-triple redundancy for hardware reliability.
- At the **application-software level**, the system uses two controllers
 - The **normal controller** is the sophisticated software developed specifically for the Boeing 777 (optimized flight control)
 - The **secondary controller** is based on the Boeing 747's control laws. (simple, reliable, and well understood; it has been used for over 25 years)
- For reliability, a Boeing 777 uses the normal controller, but it flies within its secondary controller's stability envelope.

This is an example of using **forward recovery** to guard against potential faults in complex software systems.

7

- Satanley Bak, et al, "Real-time reachability for verified simplex design", IEEE Real-Time Systems Symposium, p138, 2014
- IAEA Technical Meeting on Safety Aspects of Using Smart Digital Devices in Nuclear Systems

II.

4차산업 기술 적용 검토

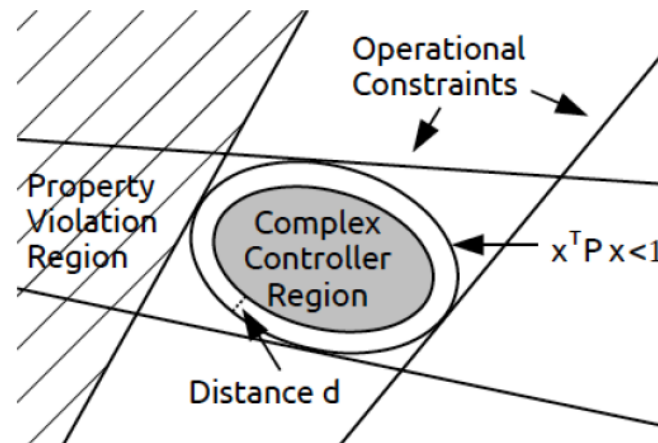
1. 인공지능 시스템 우선순위

항공분야 비안전 계통과 안전계통 설계 검토 (3)

Safe design using Simplex



- Recoverable region of state space
- **Operation constraints** represent the devices' physical limitations and the safety, environmental, and other operational requirements.
- We can represent the operation constraints as a normalized polytope



8

- Satanley Bak, et al, "Real-time reachability for verified simplex design", IEEE Real-Time Systems Symposium, p138, 2014
- IAEA Technical Meeting on Safety Aspects of Using Smart Digital Devices in Nuclear Systems, Marco Caccamo

II.

4차산업 기술 적용 검토

1. 인공지능 시스템 우선순위

비안전 계통의 공통원인 고장 분석 방법 및 결과

	Safety-Related	Not Safety-Related
Safety Significant	[Rev8 Draft] A1 Diversity and defense in depth assessment [Rev8] high safety significance	[Rev8 Draft] B1 Qualitative assessment [Rev8] lower safety significance
Not Safety Significant	[Rev8 Draft] A2 Qualitative assessment [Rev8] lower safety significance	[Rev8 Draft] B2 Qualitative assessment [Rev8] lowest safety significance

범주	구분	예시
H (높음)	높은 안전중요도를 가지는 계통·기기	- 발전소의 안전성에 주요한 기여를 하는 안전 등급 계통·기기(예: 원자로보호계통, 공학적안전설비작동계통)
M (중간)	낮은 안전중요도를 가지는 계통·기기	- 발전소의 안전성에 주요한 기여를 하지 않는 안전 등급 계통·기기 (예: 연계시험프로세서, 보수시험반 등) - 또는, 원자로의 반응도나 출력에 직접적인 영향을 미치거나 또는 안전 방벽의 건전성에 영향을 미치는 비안전계통·기기(예: 원자로출력제어계통, 가압기압력제어계통 등)
L (낮음)		- M설비에 포함되지 않는 비안전계통(예: 핵증기공급계통 건전성감시시스템 등)

가. H 계통·기기의 경우, 신청자는 II.3절에 따라 D3 평가를 수행한다.

나. M 계통·기기의 경우, 신청자는 가상의 CCF에 대해 II.4절에 따라 정성적 분석을 수행한다.

II.

4차산업 기술 적용 검토

1. 인공지능 시스템 우선순위

비안전 계통의 공통원인 고장 분석 방법 및 결과

The applicant provides four groupings and associated acceptance criteria for its evaluation of control system CCF (CSCCF).⁴

Table 7.7-5: Failure Groupings and Acceptance Criteria for CCF Evaluation⁴

Failures ⁴	Failure Scope ⁴	Acceptance Criteria for Evaluation ⁴
Type 1 ⁴	Multiple function failures due to a single failure of a shared signal ⁴	AOOs as evaluated in FSAR Chapter 15 Safety Analysis ⁴
Type 2 ⁴	Multiple failures of a single control group due to CSCCF ⁴	AOOs as evaluated in FSAR Chapter 15 Safety Analysis ⁴
Type 3 ⁴	Multiple failures of more than one control group due to CSCCF ⁴	PAs as evaluated in FSAR Chapter 15 Safety Analysis ⁴
Type 4 ⁴	Multiple failures of IFPD control commands due to CSCCF ⁴	PAs as evaluated in FSAR Chapter 15 Safety Analysis ⁴

Failure Type 3: Multiple Failures of More than One Control Group⁴

This evaluation addresses multiple spurious outputs resulting from failures of multiple control groups as an initiating event. Section 5.3.2 of the CSCCF TeR states that best estimate analysis methods are used to perform the analyses, including the use of nominal initial conditions as listed in Table 5.3-3. ⁴

In accordance with the guidelines provided in SRP BTP 7-19, CCFs are considered beyond design basis and may be evaluated using best-estimate methods. SRP BTP 7-19 further defines best-estimate to be “realistic assumptions,” including normal plant conditions. Therefore, the staff finds the use of the nominal values listed in Table 5.3-3 acceptable as it conforms to the use of realistic assumptions per SRP BTP 7-19. ⁴

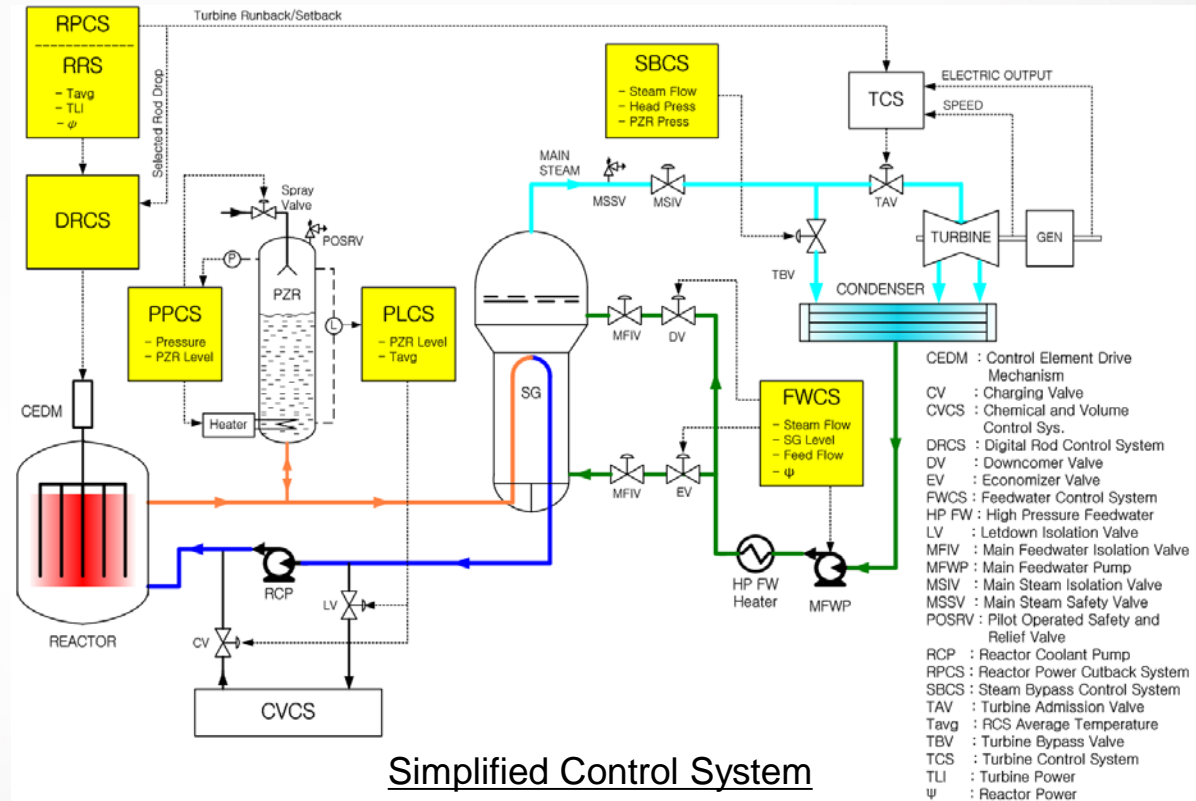
II.

4차산업 기술 적용 검토

1. 인공지능 시스템 우선순위

비안전 계통의 공통원인 고장 분석 방법 및 결과

- 비안전 Control System의 Multiple Failure가 Worst Case로 발생함을 가정하여 안전성을 평가함



II.

4차산업 기술 적용 검토

1. 인공지능 시스템 우선순위

비안전 계통의 공통원인 고장 분석 방법 및 결과

The applicant provides four groupings and associated acceptance criteria for its evaluation of control system CCF (CSCCF).⁴

Table 7.7-5: Failure Groupings and Acceptance Criteria for CCF Evaluation⁴

Failures ⁴	Failure Scope ⁴	Acceptance Criteria for Evaluation ⁴
Type 1 ⁴	Multiple function failures due to a single failure of a shared signal ⁴	AOOs as evaluated in FSAR Chapter 15 Safety Analysis ⁴
Type 2 ⁴	Multiple failures of a single control group due to CSCCF ⁴	AOOs as evaluated in FSAR Chapter 15 Safety Analysis ⁴
Type 3 ⁴	Multiple failures of more than one control group due to CSCCF ⁴	PAs as evaluated in FSAR Chapter 15 Safety Analysis ⁴
Type 4 ⁴	Multiple failures of IFPD control commands due to CSCCF ⁴	PAs as evaluated in FSAR Chapter 15 Safety Analysis ⁴

Broadcast Storms on IFPD/ESCM Ethernet Networks

In addition to the information provided in Table 07.07-4, above, the applicant also stated in its response to RAI 68-7892, Question 07.07-6, that the worst case non-safety I&C equipment failure due to excessive network traffic is bounded within Failure Type 3, analyzed in Section 5.3 of the CSCCF TeR

From : APR1400 NRC DC FSER Ch 7

➡ 안전기능이 건전한 경우 비안전 계통의 고장에 의해 발전소에 위험한 상태가 발생하지 않음

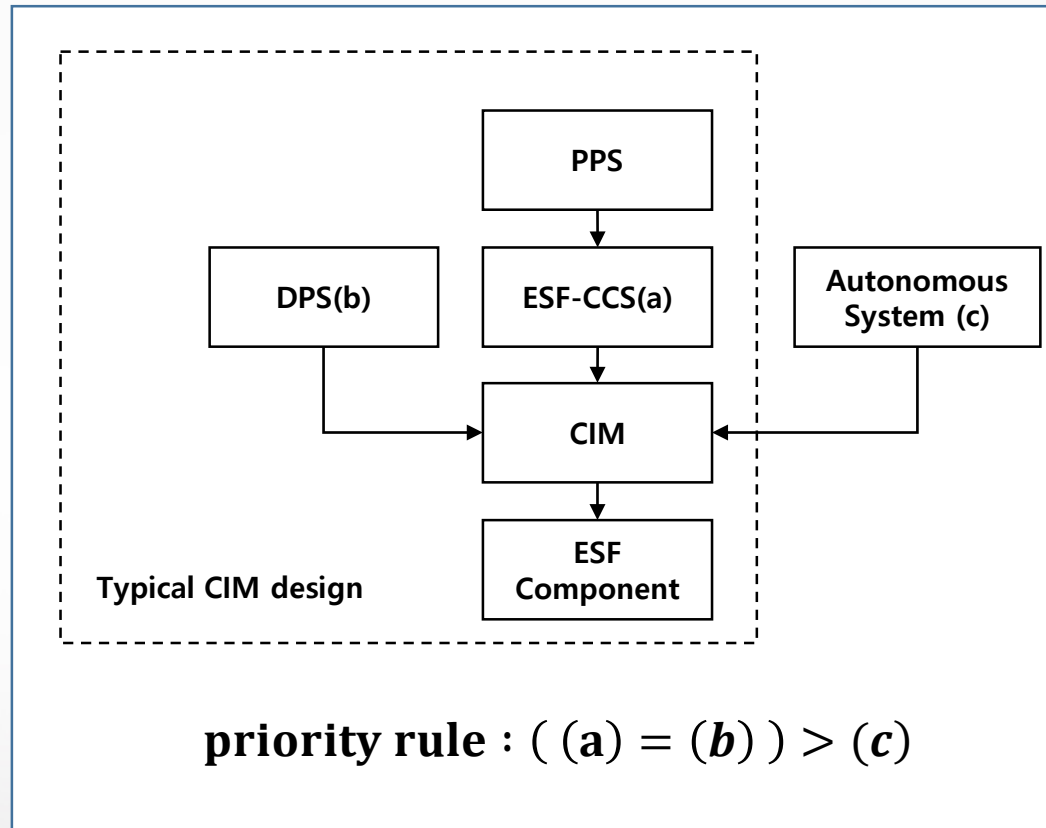
II.

4차산업 기술 적용 검토

1. 인공지능 시스템 우선순위

비안전 등급의 운전자동화 시스템의 안전등급 기기 조작

- APR1400 CIM (Component Interface Module) 에 운전자동화 시스템의 안전등급 기기 조작을 연계하여 우선순위를 적용하는 방안
- 운전자동화 시스템의 우선순위를 최 하위로 선정함



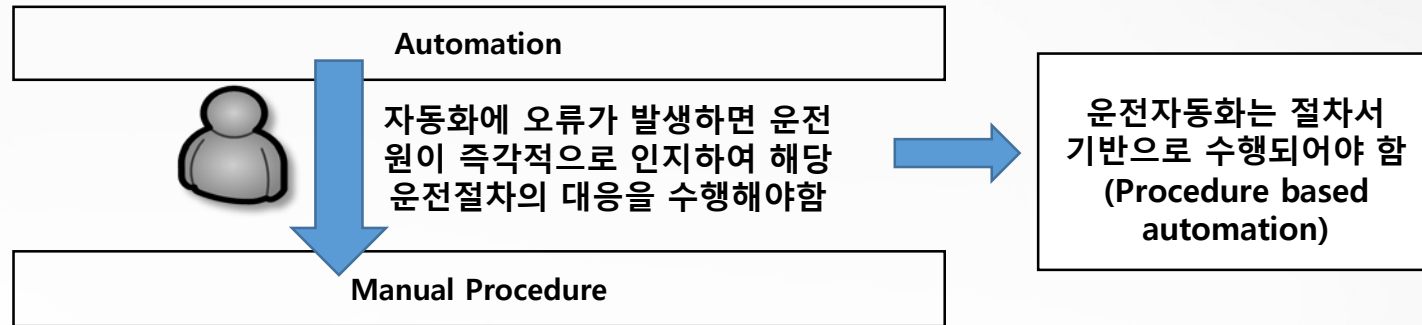
II.

4차산업 기술 적용 검토

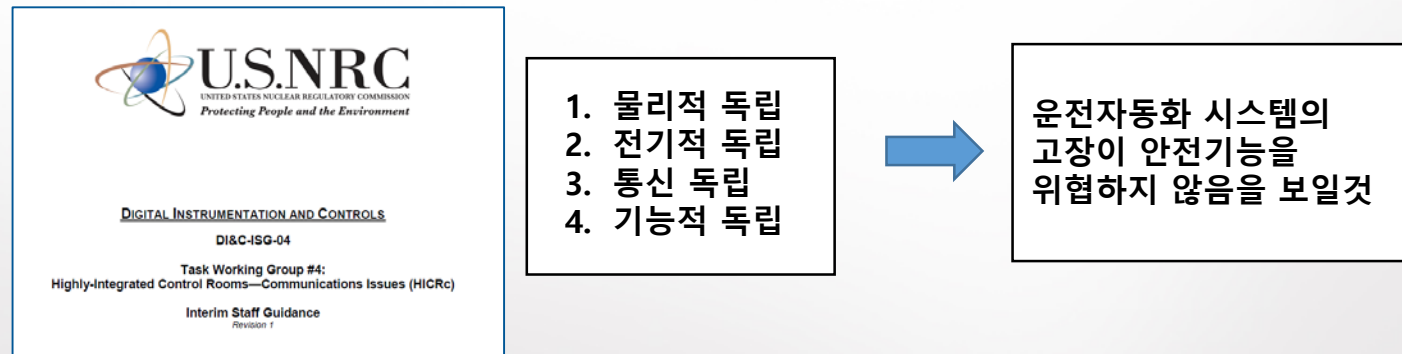
1. 인공지능 시스템 우선순위

비안전 등급의 운전자동화 시스템의 안전등급 기기 조작

- 원자력 발전소의 설계특성인 안전등급 기기와 비안전 등급 기기의 독립성에 대한 인허가 검토 필요
- 미국 규제요건 전문가의 자문 수행
 - ✓ 운전자동화 시스템에 대한 19개 설계 요건 제시



- 안전등급 기기와 비안전등급 제어시스템간 독립 요건에 대해 ISG-04 (고집적 주제어실 통신 요건) 을 고려하여 설계할 것을 권고함
 - ✓ 필요시 비안전급 제어기기 공통원인 고장 분석과 유사한 방법으로 입증 필요



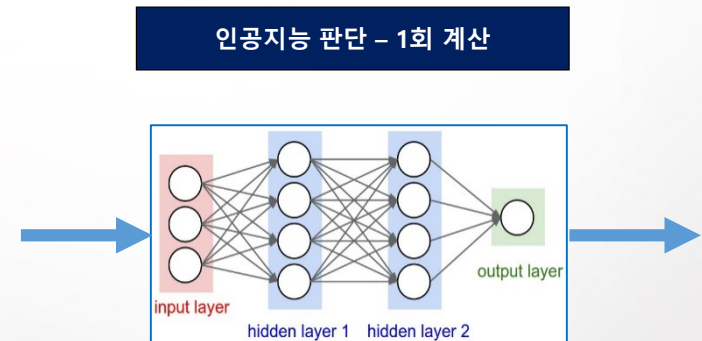
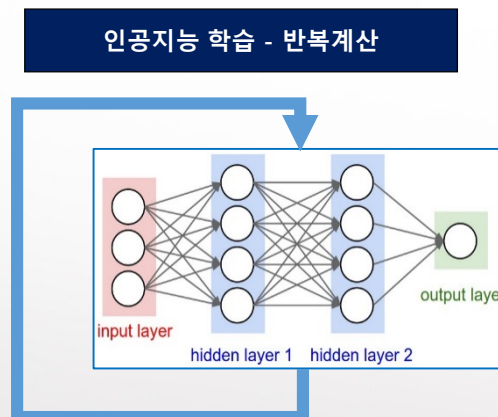
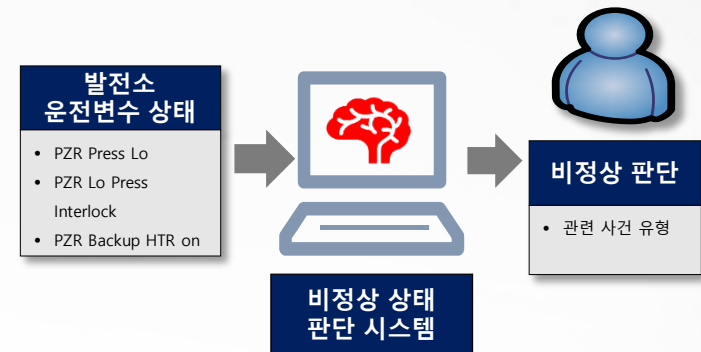
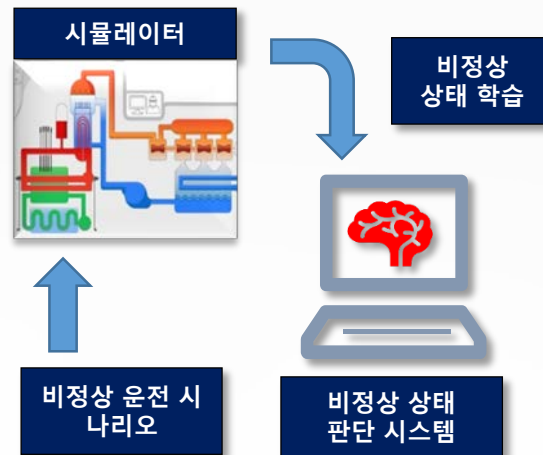
II.

4차산업 기술 적용 검토

2. 인공지능 시스템 전산부하

인공지능 모델의 적용

- 인공지능 모델의 학습에는 강력한 전산시스템과 복잡한 반복계산이 필요하나
- 개발된 모델을 적용시는 계산과정을 일반 전산 시스템에 적용할 수 있음

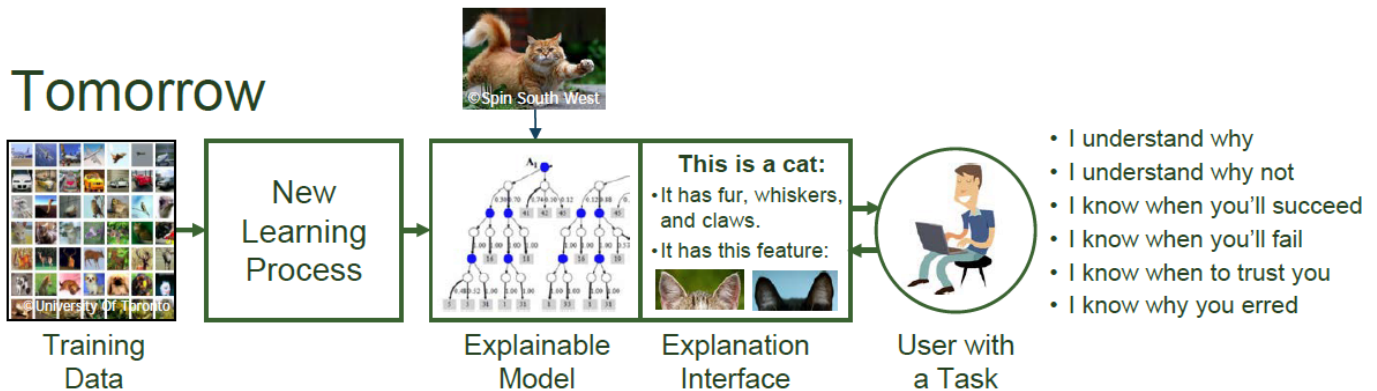
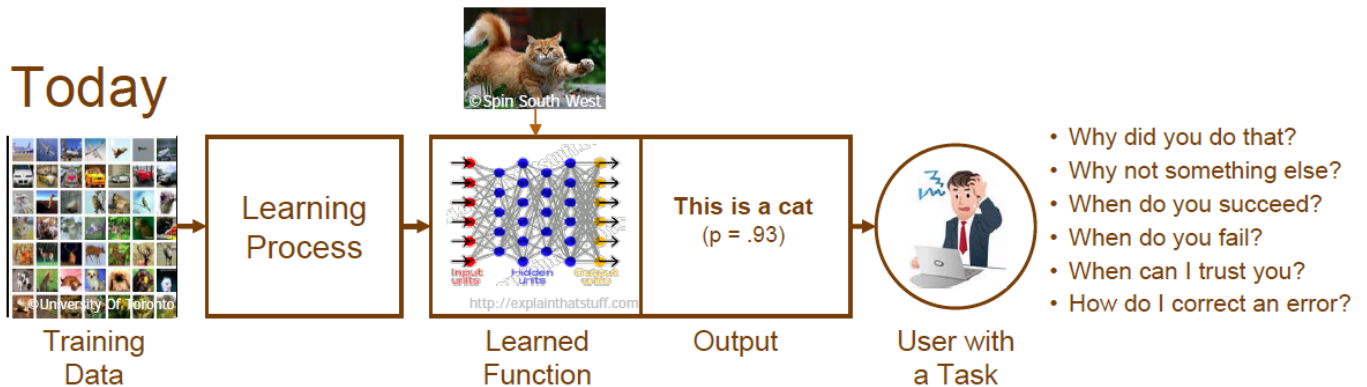


II.

4차산업 기술 적용 검토

3. 설명가능한 인공지능

설명 가능한 인공지능



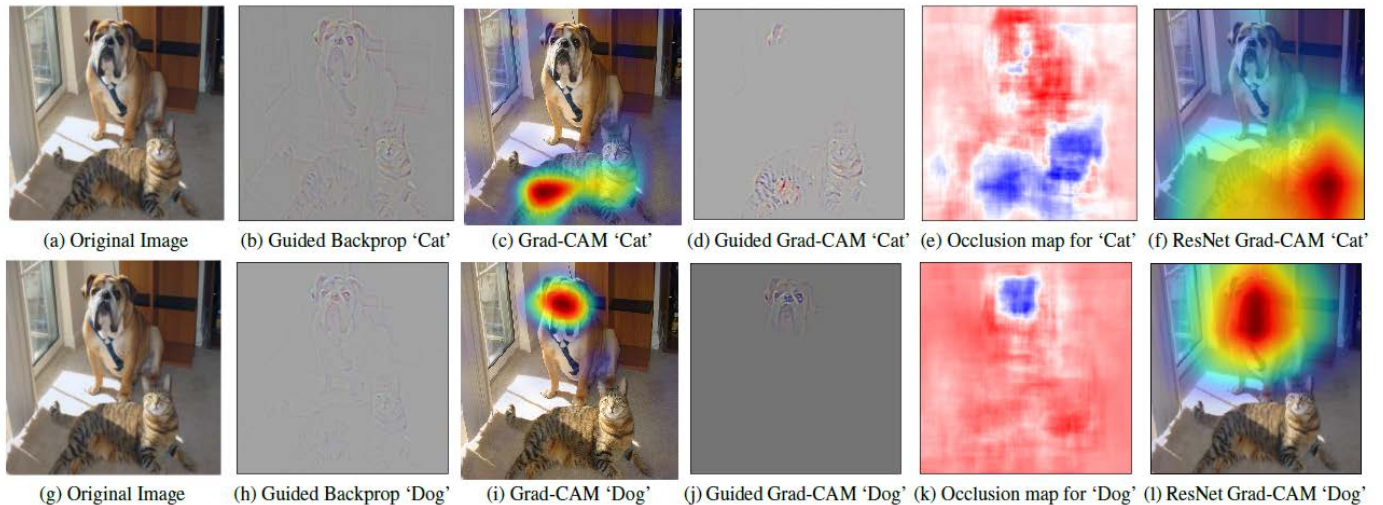
II.

4차산업 기술 적용 검토

3. 설명가능한 인공지능

설명 가능한 인공지능

- Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization (2017) 등
다수의 기법에 대해 연구가 진행되고 있음



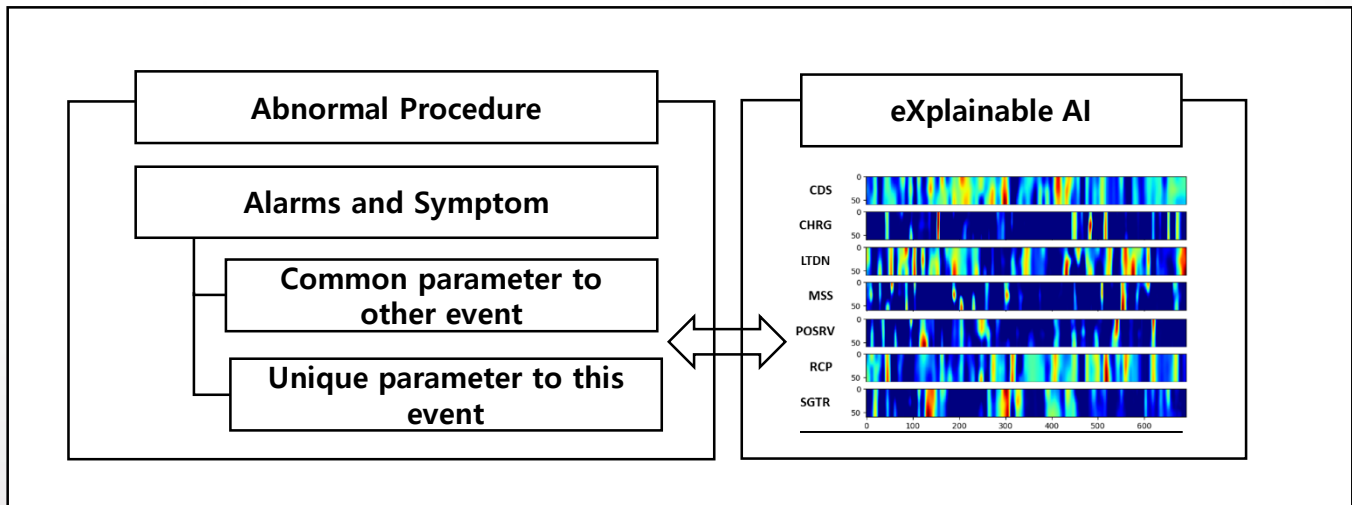
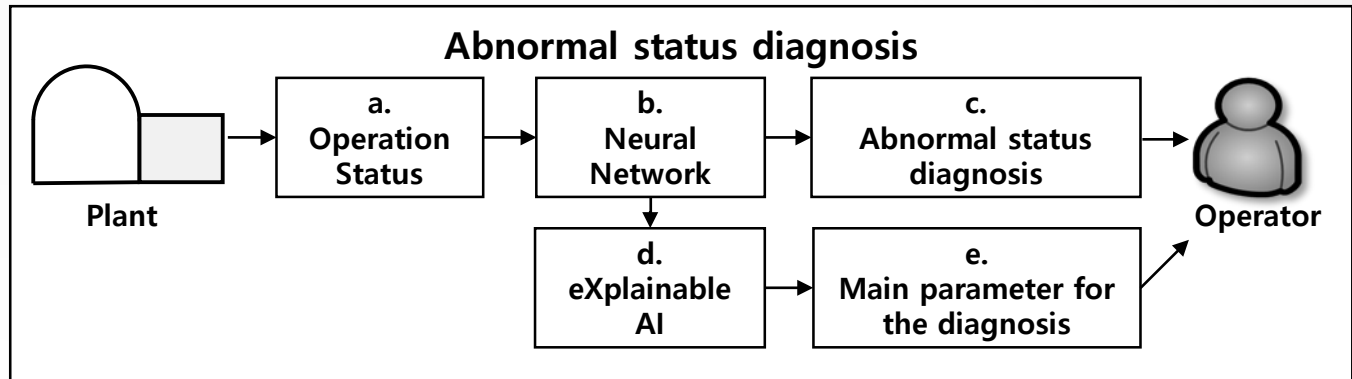
II.

4차산업 기술 적용 검토

3. 설명가능한 인공지능

설명 가능한 인공지능 활용 방안 개발

- 판단의 근거를 운전원에게 설명해줄 수 있는 인공지능 (Explainable AI) 개발
- 논리기반 비정상 판단 검증 (논리에 선택된 정보의 유효성)
- 비정상 절차서 검증 (해당 비정상 상태 발생시 의미있게 변화하는 운전변수 선정 검토)





**THANK
YOU**