

# 원자로제어계통 및 디지털 I&C 손상진단 기반기술 개발



2022. 5. 18.

김 창 회

한국원자력연구원

# 필요성

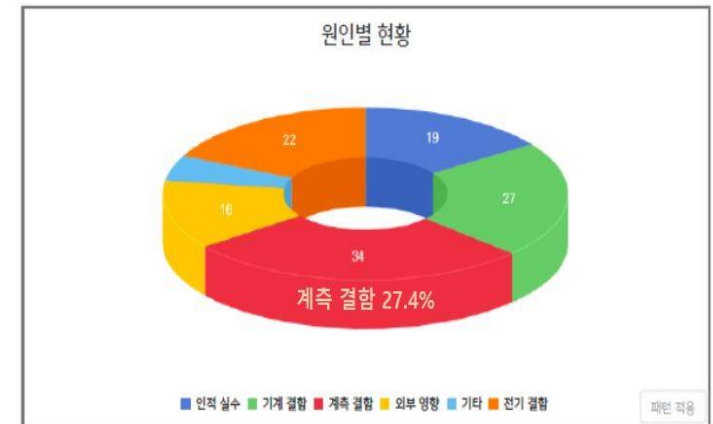
## □ 원전의 계측제어계통은 인체의 두뇌 및 신경망에 해당하는 설비

- ◆ 수천 개의 발전소 현장 **센서신호**를 취득하는 **계측기능**
- ◆ 발전소를 정상적으로 운전하는 **제어기능**
- ◆ 유사시 발전소를 안전하게 정지시키거나 **안전설비**를 구동하는 **보호기능**
- ◆ 효과적 대응을 위해 발전소 상태를 적시에 알려주는 **감시기능**

## □ 국내 원전 계측제어계통 사고·고장 현황 (2010년~2019년)

- ◆ 총 124건의 사고·고장중에서 **계측결함의 원인으로 34건**이 발생 (27.4%)
- ◆ 인적실수에 의한 **사고·고장 사례 19건** 조사됨.  
계측결함과 직접적 연관으로 볼 수는 없지만,  
유지보수 중 **보수요원의 실수사례**도 있음.
- ◆ 계측결함 및 인적실수를 합한 건수는 **53건**으로  
**전체 사고·고장의 약 43% 차지**

2010년~2019년 (10년간) 국내원전 사고·고장 현황



출처: <http://opis.kins.re.kr>

# 필요성

## □ 현 계측제어계통 시험 방법

- ◆ 내장된 자가진단 기능을 통해 건전성 확인
- ◆ 주기시험을 통한 기능적 건전성 확인
- ◆ 오버홀 기간 동안 기능 및 성능 확인



- 주기시험은 정상 운전 중에는 확인할 수 없음
- 기능이 저하된 경우에만 고장 상태를 감지할 수 있음
- 특히, 디지털 계측제어계통의 고장은 사전 징후 없이 고장이 발생하므로 감지하기 어려움이 있음

## □ 4차 산업혁명기술 기반 상태진단 및 고장예측 기술 개발 필요

- ◆ 고장 발생 전에 그 가능성을 예측하여 **선제적으로 대응**함으로써 불필요한 원전정지 등을 사전에 예방할 수 있음
- ◆ 주기시험 빈도 절감으로 유지보수 요원 **인적실수 감소**

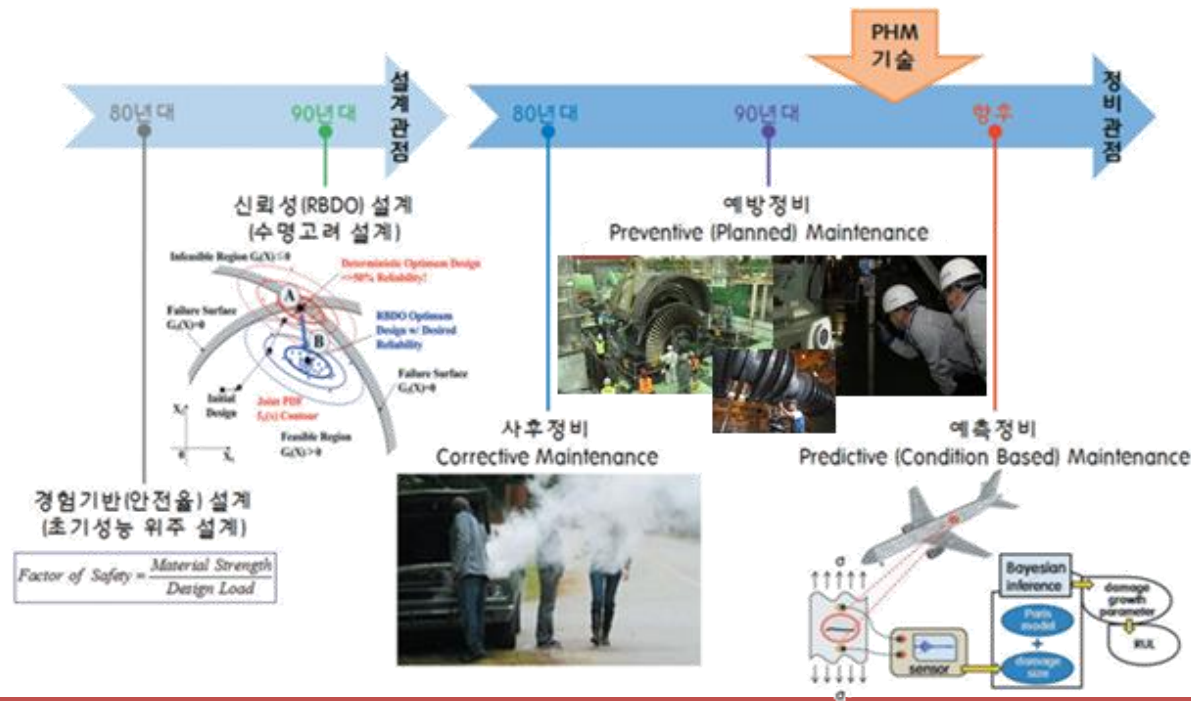
# 연구 개발 현황

## □ 한수원

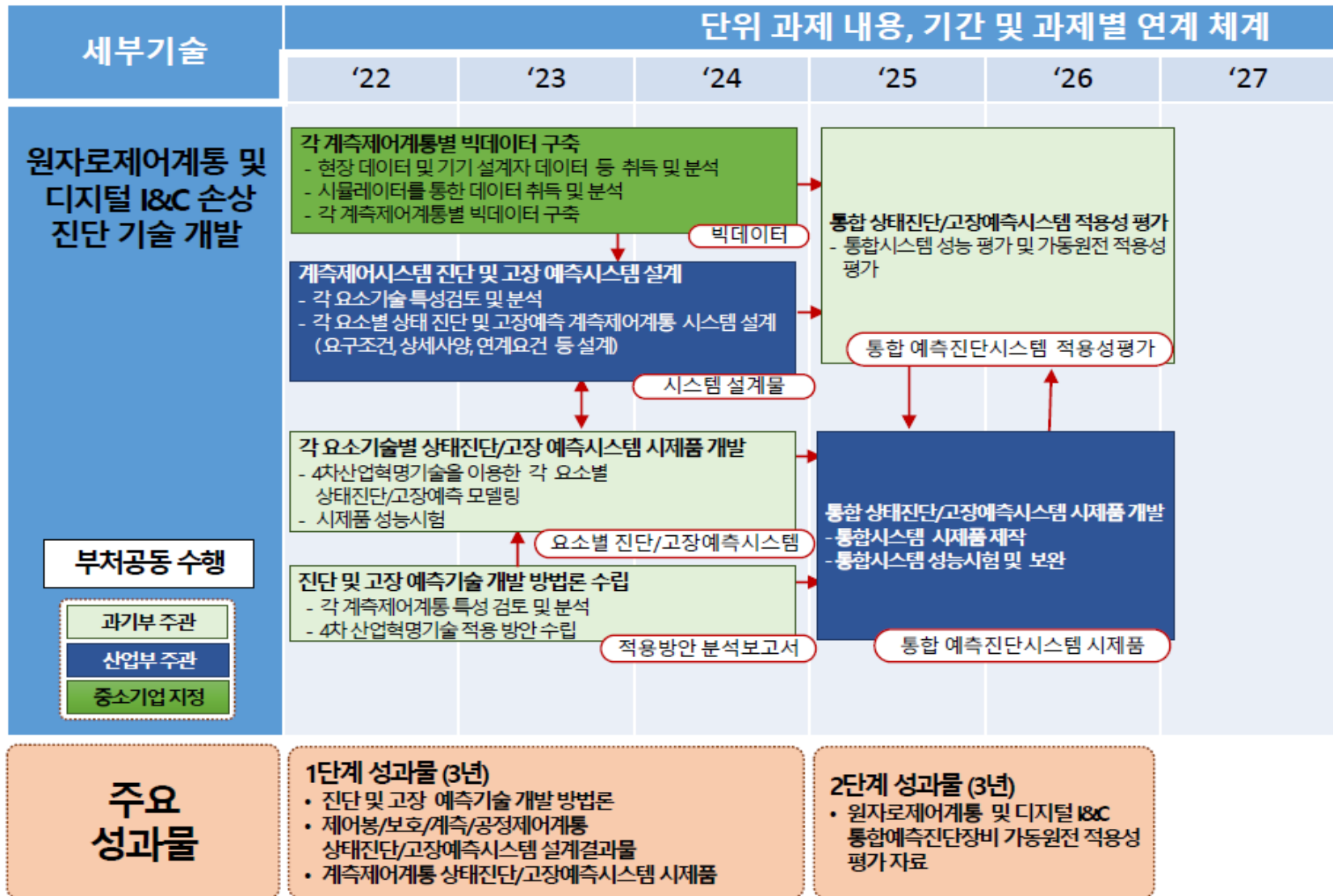
- ◆ 주요 회전설비에 대한 상태감시 및 예측진단 모델 개발
- ◆ 2021년 11월 인공지능 기반 자동예측진단시스템(프로메테우스) 상품화 추진

## □ 국외

- ◆ 항공우주시스템, 발전소, 철도, 자동차 등으로 확대되고 있는 추세임



# RFP 로드맵



# 연구 계획 (과기부 주관)

# 연구 목표

---

## □ 최종 목표

- ◆ 원전 불시정지, 사고 및 중대 사고 사전 예방을 위한 **가동원전 디지털 계측제어계통의 상태진단 및 고장예측 기반기술** 개발

## □ 세부 목표

1. 4차 산업기술을 적용한 가동원전 디지털 계측제어계통 상태진단/고장 예측 **방법론** 개발
2. 계측제어 계통별 빅데이터를 활용한 디지털 계측제어계통 상태진단/고장예측 **모델개발**
3. 계통별 상태진단/고장예측 **시작품 (Pre-prototype)** 개발 및 시험
4. **통합** 상태진단/고장예측시스템 **시제품 (Prototype)** 기능/성능 시험 평가
5. 통합 상태진단/고장예측시스템 시제품 **원전 적용성** 평가

# 연구목표 및 과제구성

연구기간 (예산)	1단계 3년	2단계 2년
최종목표	원전 불시정지, 사고 및 중대 사고 사전 예방을 위한 가동원전 디지털 계측제어계통의 상태진단 및 고장예측 기반기술 개발	
단계목표	1단계 : 시작품 개발 및 시험	2단계 : 시제품 개발 지원 및 가동원전 적용성 평가



## 대표과제 한원연 (김창희)

신뢰도 데이터 구축, AI기반 상태진단 및 고장예측  
모델개발, 원전 적용성 평가



### (주)미래와도전(이정훈)

빅데이터 플랫폼 구축,  
인공지능 알고리즘 시험



### (주)우리기술(이준희)

비안전 계측 및 제어계통  
신뢰도 분석 지원



### 조선태(나만균)

인공지능기반 APR-1400  
원자로보호계통  
고장예측모델 개발



# 연차별 연구내용 (1단계)

1단계 최종목표	AI 기반 계측제어계통별 상태진단 및 고장예측 시작품 개발 및 시험		
구분	기관	세부연구목표	세부연구내용
1차년도	한원연	계측제어계통 특성분석 및 빅데이터 취득 처리기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>신뢰도 평가를 위한 계측제어계통 특성 분석</li> <li>인공지능 적용방안 분석 및 방법론 도출</li> </ul>
	(주)미래와도전	빅데이터 플랫폼 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>빅데이터 플랫폼 애플리케이션 설계</li> </ul>
	(주)우리기술	비안전계통 각 제어카드 별 회로도 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>제어카드별 회로도 분석 지원</li> </ul>
2차년도	한원연	각 계측제어계통 고장 데이터 분석 및 고장예측 모델링 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>각 계측제어계통 고장 데이터 분석</li> <li>상태진단/고장예측 모델링 및 AI 알고리즘 개발</li> </ul>
	(주)미래와도전	빅데이터 플랫폼 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>빅데이터 플랫폼 구축 (각 계통 별)</li> <li>부품 고장의 시스템 동작 영향 유추 모델링지원</li> </ul>
	(주)우리기술	비안전계통 각 제어카드 별 고장데이터 취득	<ul style="list-style-type: none"> <li>제어카드별 신뢰도 분석 지원</li> <li>고장 주입에 의한 고장 데이터 제공</li> </ul>
3차년도	한원연	AI 기반 계측제어계통별 상태진단 및 고장예측 시작품 개발 및 시험	<ul style="list-style-type: none"> <li>상태진단/고장예측 모델링 및 AI 알고리즘 보완</li> <li>AI 기반 계측제어계통별 상태진단/고장예측시스템 시작품 성능시험 및 설계문서 개발</li> </ul>
	(주)미래와도전	계측제어계통별 상태진단 및 고장예측 시작품 시험 지원	<ul style="list-style-type: none"> <li>빅데이터 플랫폼 시범운영 및 상태진단/고장예측 모델 시험 지원</li> </ul>
	(주)우리기술	비안전계통 상태진단 및 고장예측시스템 시작품 시험 지원	<ul style="list-style-type: none"> <li>비안전계통 상태진단/고장예측시스템 시작품 성능시험 지원</li> </ul>

# 연차별 연구내용 (2단계)

2단계 최종목표	AI 기반 통합 상태진단 및 고장예측시스템 가동원전 적용성 평가		
구분	기관	세부연구목표	세부연구내용
1차년도	한원연	AI 기반 통합 상태진단 및 고장예측시스템 기능/성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>통합 상태진단/고장예측시스템 시제품 제작 지원</li> <li>통합 상태진단/고장예측시스템 기능/성능 평가</li> </ul>
	(주)미래와도전	AI 기반 고장예측 알고리즘 성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>AI 기반 고장예측 알고리즘 기능/성능 평가 및 보완 (기능시험계획서/시험절차서/시험보고서)</li> </ul>
	(주)우리기술	비안전 제어/ 계측계통 관련 상태진단 및 고장예측 모델 기능/성능 평가 지원	<ul style="list-style-type: none"> <li>비안전 제어/계측계통 관련 상태진단/고장예측모델 기능/성능 평가 및 보완 지원</li> </ul>
2차년도	한원연	AI 기반 통합 상태진단 및 고장예측시스템 가동원전 적합성 평가 및 상용화 계획 수립 지원	<ul style="list-style-type: none"> <li>통합 상태진단 /고장예측시스템 가동원전 적용성 평가</li> </ul>
	(주)미래와도전	AI 기반 고장예측 알고리즘 적용성 평가	<ul style="list-style-type: none"> <li>AI 기반 고장예측 알고리즘 적용성 평가 (성능검증계획서/절차서/보고서)</li> </ul>
	(주)우리기술	비안전 제어 및 계측계통 상태진단 및 고장예측시스템 가동원전 적용성 평가 지원	<ul style="list-style-type: none"> <li>비안전계통 상태진단/고장예측 모델 성능검증 지원</li> </ul>

# 적용 범위

## □ OPR1000 및 APR1400 디지털 계측제어계통

- ◆ 보호계통 (노심보호연산기계통) : 안전등급, 발전소안전계통
- ◆ 제어계통 : 비안전등급, 급수제어계통, 가압기수위제어계통 등
- ◆ 원자로제어계통 : 비안전등급, 논리함 및 전력함으로 구성
- ◆ 계측계통 : 안전등급, 비안전등급

[국내 원전 계측제어계통 플랫폼]

	OPR1000		APR1400	
	울진 5&6	신고리 /신월성 1&2	신고리 3&4	신한울 1&2 신고리 5&6
비안전 제어계통	- OMRON PLC	좌동	- Ovation DCS	- (주)우리기술 OPERA DCS
원자로제어계통	- 논리함 : Quantum PLC - 전력함: TI	좌동	- Ovation DCS	- 논리함: OPERA DCS - 전력함: TI
보호계통	- ABB AC160 PLC - Concurrent Computer	좌동	- AC-160 PLC	- (주)수산ENS POSAFE-Q
비안전 계측계통	- Ovation DCS	좌동	- Ovation DCS	- OPERA DCS
DPS	- (주)우리기술 Microsemi FPGA	좌동	-Ovation DCS	- OPERA DCS

■ 본 과제 적용계통

# 적용 범위

## □ 디지털 계측제어계통 캐비닛 구성

### ◆ 제어기 (Platform)

- 프로세서모듈(카드)
- 입력 및 출력모듈(카드)
- 통신모듈(카드)
- 전원모듈(카드) 등

### ◆ 통신장치

- 제어통신장치
- 정보통신장치

### ◆ 전원장치

### ◆ 단자대

### ◆ 각종 케이블 등



[APR1400 제어계통 (우리기술: OPERA DCS) 캐비닛 및 내부 구성품]

# APR1400 디지털 계측제어계통 (신한울 1,2,3,4 신고리 5,6)

## □ APR1400 디지털 계측제어계통 캐비닛

안전  
등급



RPS  
(Reactor Protection  
System)



ESF-CCS  
(Engineered Safety  
Feature-Component  
Control System)



QIAS-P



QIAS-N

비안전  
등급



PCS  
(Power Control System)



CRCS  
(Control Rod Control  
System)



Non-safety Control  
System

# 상태진단 및 고장예측 방법

## □ 고장데이터 수집

### ◆ 현장 고장데이터

- 시험 또는 시운전 중 발생한 고장 이력 (운영사)

### ◆ 인위적 고장주입에 의한 고장데이터 (제작사)

- Testbed 구축
- 한계 입력값, 노이즈 주입
- 온도변화, 전압변동 등 환경 변화

### ◆ 신뢰도기반 고장율 분석 (한원연)

- 신뢰도분석 시뮬레이션 툴 개발
- 부품고장율, FMEA 등 신뢰도 분석 (온도, 전압 등 환경변화)

## □ 고장데이터 DB 구축

- ◆ 데이터 전처리
- ◆ 빅데이터 플랫폼 구축 및 운영

## □ 상태진단 및 고장예측 방법 개발

- ◆ 인공지능 적용 방안분석
- ◆ 인공지능 알고리즘 선정
- ◆ 학습을 통한 최적화

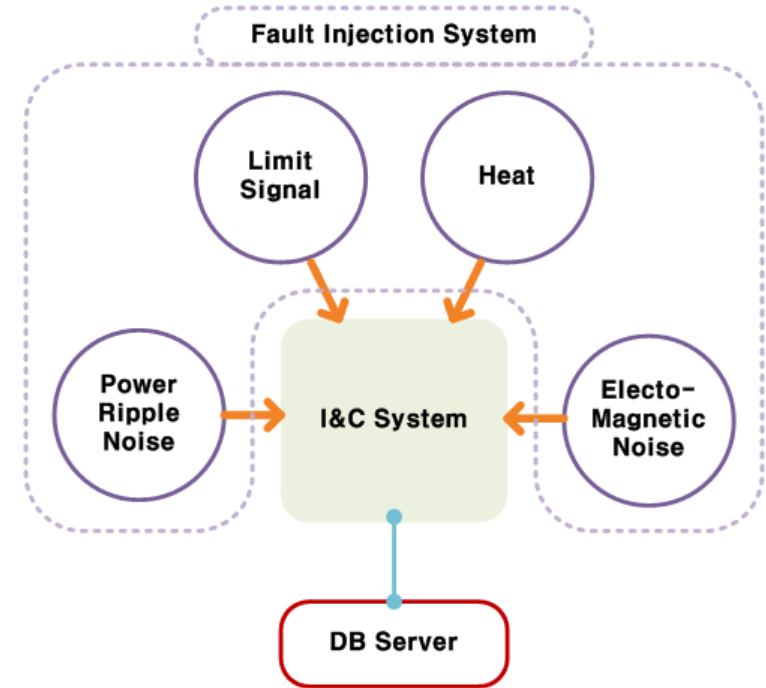
## □ 상태진단 및 고장예측 모델 개발

- ◆ 성능평가를 통한 최적 모델 개발
- ◆ 시제품 설계 지원
- ◆ 시제품 원전 적용성 평가

# 손상탐지 및 고장예측 방법

## □ 각 카드별 고장주입 시험 (예시)

- ◆ 기준 : Testbed를 구축하여 인위적 고장 주입을 통한 고장 데이터 수집
- ◆ 적용 방법
  - 한계 입력값 주입 동작 상태 및 고장 데이터
  - 노이즈 주입시 동작 상태 및 고장 데이터
  - 고온 환경 조건 동작상태 및 고장 데이터
  - HW 부품 발열로 인해 국지적 변화 측정 데이터 등



[고장 주입 시스템]

# 손상탐지 및 고장예측 방법

## □ 각 카드별 부품 고장을 분석 (예시)

◆ 기준 : MIL-HNBK-217F Notice 2 Part Stress Method

◆ 적용 환경

- 주변 온도, Electrical Stress, 부품 제조특성, 시스템 운용환경 등

◆ 계산식

- $\lambda_p = (C1 \times \pi T + C2 \times \pi E) \times \pi Q \times \pi L$

- $\lambda_p$  = Failure Rate in Failures/Million Hours
- C1 = 게이트 또는 트랜지스터의 수와 같은 장치의 복잡성에 영향
- $\pi T$  = 주변 온도 및 장치와 관련된 온도 상승의 요인
- C2 = 장치 패키지 또는 표면 장착, 밀봉된 표면과 같이 시스템이 제조 및 배치되는 방법에 영향
- $\pi E$  = 항공기와 같이 장치가 작동하는 환경 고려
- $\pi Q$  = 조달 방법에 따라 장치의 품질 결정
- $\pi L$  = 장치 제조 기간에 영향

[부품고장을 분석 결과표 (예시)]

Name	각 부품의 이름을 기술한다
Part Number	공급자가 제공하는 각 부품의 모델명을 기술한다
Description	각 부품의 종류(예, 저항, 콘덴서, 퓨즈 등)를 기술한다
Quantity	각 부품들이 한 모듈에 사용된 수량을 기술한다
Failure Rate	각 부품들의 계산된 고장률을 기술한다
N x Failure Rate	각 부품의 고장률에 모듈에 사용된 동일부품의 수량을 곱한 값을 기술한다
Parameters	각 부품의 고장률 평가에 사용된 정보들을 기술한다



# 인공지능 기반 손상탐지 및 고장예측 개발 전략

데이터  
분석  
단계

APR1400/OPR1000 계측제어계통 데이터 활용계획 수립

계측제어계통  
신뢰도 데이터

계측제어계통  
고장실험 데이터

계측제어계통  
현장고장 데이터

방법론  
선정  
단계

인공지능기반 계측제어계통 상태진단/고장예측 연구동향 분석

APR1400/OPR1000 계측제어계통 인공지능 적용방안 분석

인공지능 기반 APR1400/OPR1000 계측제어계통  
상태진단/고장예측 방법론 선정 및 알고리즘 개발

최적화  
단계

인공지능 기반 APR1400/OPR1000 계측제어계통  
상태진단/고장예측 알고리즘 최적화

성능  
평가  
단계

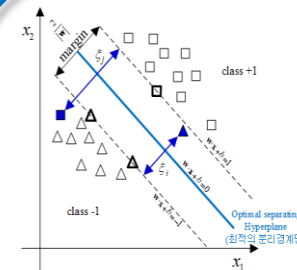
인공지능 성능평가

인공지능 기반 계측제어계통  
상태진단/고장예측  
알고리즘 성능평가

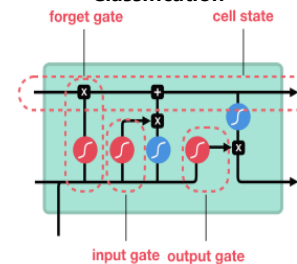
인공지능 기반 계측제어계통  
상태진단/고장예측 알고리즘  
보완

모델 최적화

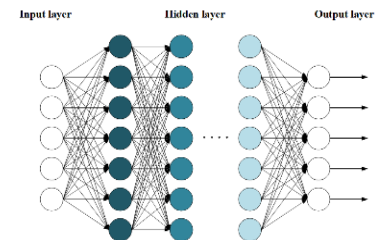
인공지능 알고리즘 예시



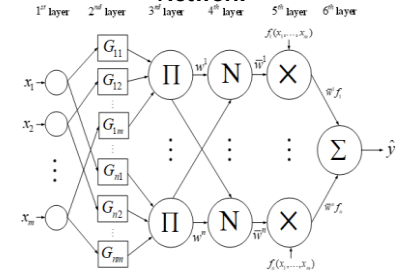
<Support Vector Classification>



<Long Short-Term Memory>



<Deep Neural Network>



<Fuzzy Neural Network>

# 참여 기관 역할

## □ 한원연

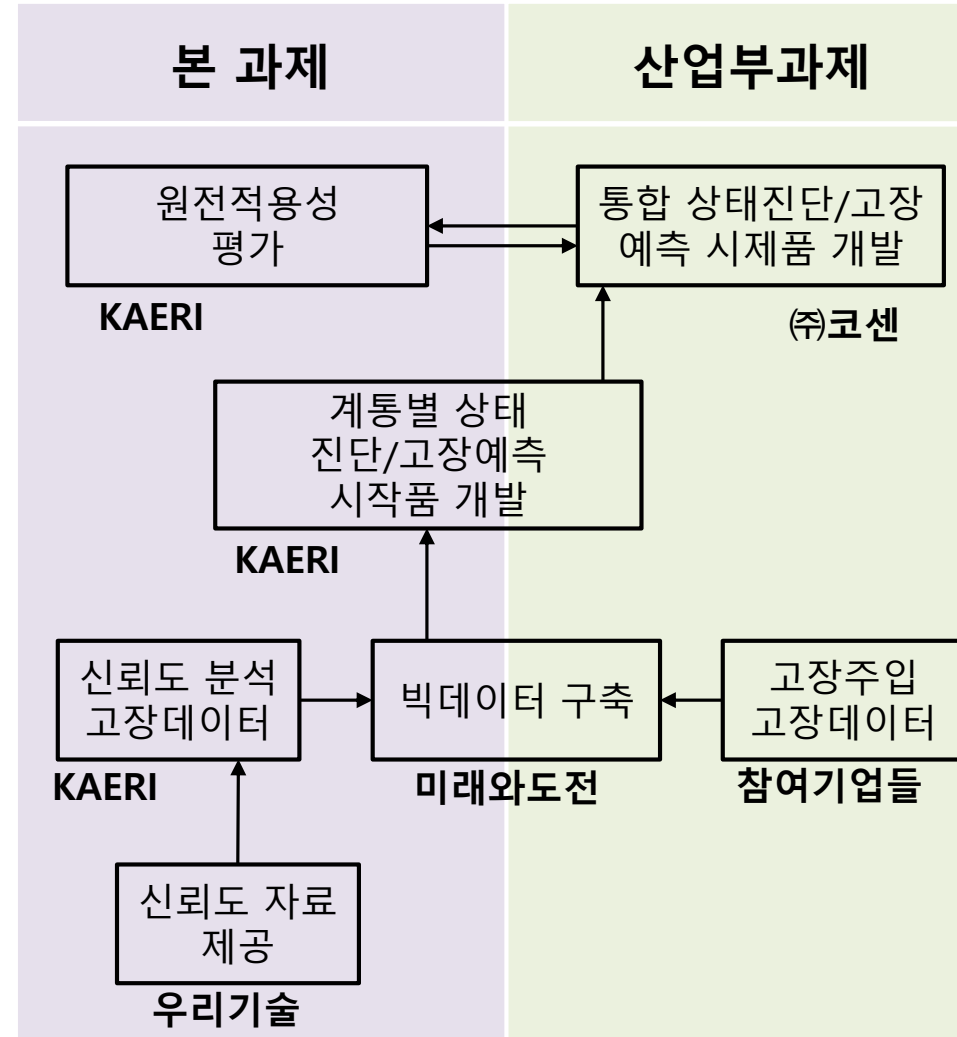
- ◆ AI 기반 가동원전 디지털 계측제어계통 상태진단/고장예측 방법론 개발
- ◆ 계측제어 계통별 빅데이터를 활용한 상태진단/고장예측 모델 개발
- ◆ 계통별 상태진단/고장예측 시제품 개발 및 시험
- ◆ 통합 시제품 원전 적용성 평가

## □ (주)미래와 도전

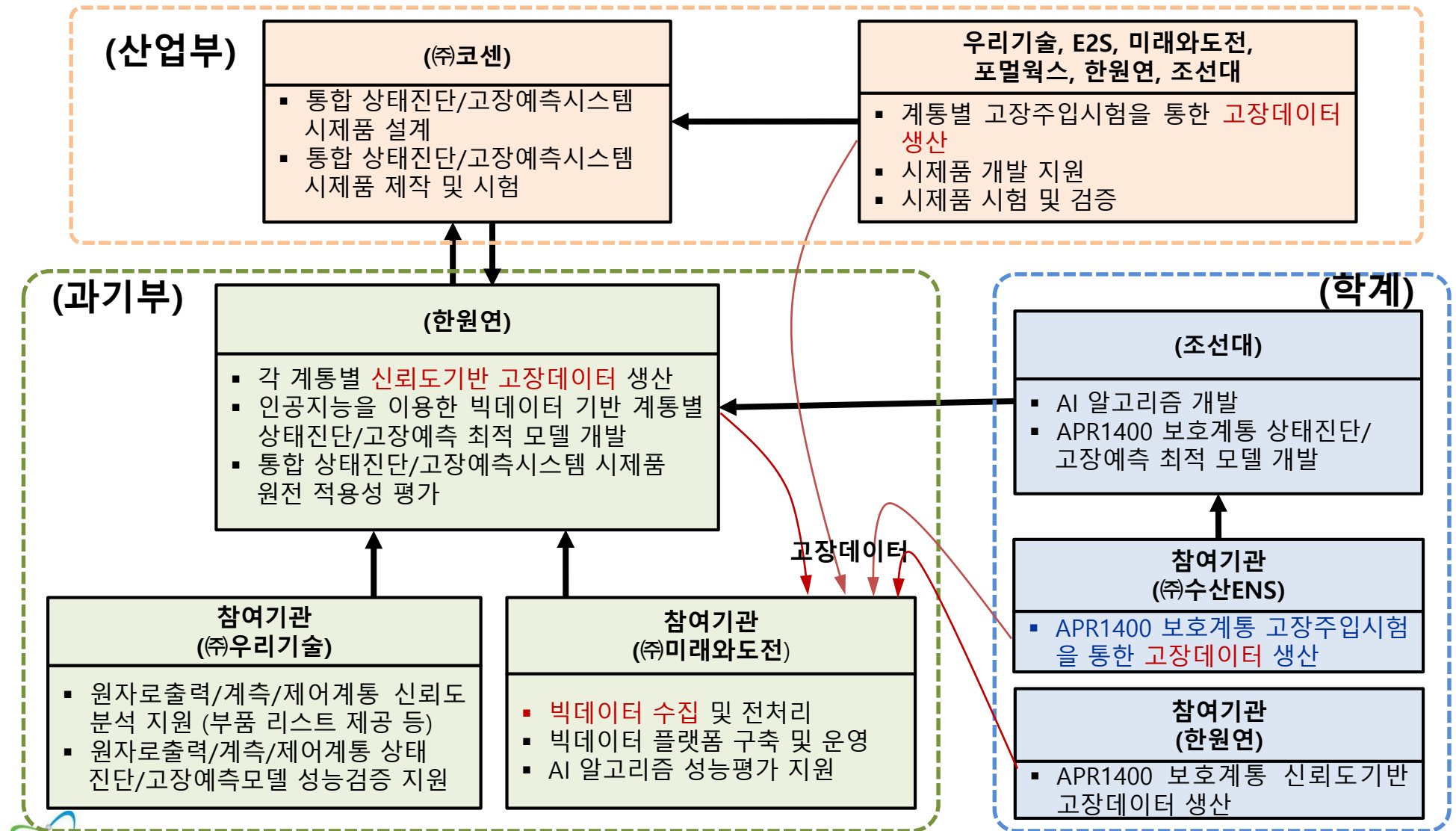
- ◆ 계측제어계통 고장데이터 수집용 빅데이터 수집 및 빅데이터 플랫폼 구축
- ◆ AI 알고리즘 성능평가 지원

## □ (주)우리기술

- ◆ 제어/계측계통/원자로출력제어계통 신뢰도분석 자료 제공
- ◆ 제어/계측계통/원자로출력제어계통 상태진단/고장예측 모델 성능평가 지원



# 참여 기관 및 과제간 연계 (산업부 및 과기부)



# 참여 기업 소개 (산업부 및 과기부)

기관명	(주)미래와도전	(주)우리기술	(주)수산ENS	(주)이투에스	(주)포멀웍스	(주)코센
						
주 생산	인공지능 및 시뮬레이션 전문업체	비안전계통 플랫폼 제작업체	안전계통 플랫폼 제작업체	원자로제어계통 전력함 제작업체	안전 소프트웨어 검증업체	품질검사, 설계 엔지니어링 업체
						
본 사업 역할	빅데이터 플랫폼 구축 및 AI 알고리즘 시험	비안전 계측/제어계통 고장데이터 수집	안전계통 고장데이터 수집	원자로제어계통 전력함 고장데이터 수집	인공지능 기반 진단/고장예측 시스템 시험검증	통합 상태진단/ 고장예측 시스템 시제품 설계, 제작

# 활용방안 및 기대효과

## □ 활용 방안

- ◆ AI 및 빅데이터를 활용한 상태진단/고장예측을 통해 원전 정지, 사고 및 중대사고 예방
- ◆ 4차 산업혁명 기초기술 개발을 통해 가동원전 건전성 감시기술로 활용
- ◆ 향후 개발될 SMR 원전 등의 안전성 향상을 위한 기반 기술로 활용
- ◆ 국방 무기체계, 우주탐사용 기체나 인공위성체에 활용

## □ 기대 효과

- ◆ 계측제어계통 고장에 대한 선제적 예측 및 대응을 통해서 원전의 안전성을 획기적으로 향상
- ◆ 기존 주기 시험 등에도 불구하고 계측결함 및 유지보수 요원의 인적실수에 의한 사고·고장 사례가 발생하였지만, 개발될 기술은 상시감시를 통한 고장예측으로 선제적 대처 가능
- ◆ 계측제어계통 내부의 기기고장 및 잔존수명을 예측하여 주요 부품의 경년열화에 대한 안전 마진을 유지하고, 발전소 주기시험 및 오버홀 기간 동안 정비 시간 단축 기대
- ◆ 본 기술 적용을 통해 가동원전의 안전성 향상 및 사고확대를 방지함으로써 원자력발전소에 대한 사회적, 국민적 불안감 해소에 기여

## 최종 결과물 형태 (예)

### □ 각 계통별로 on-line 상태진단 및 고장예측 기능 제공

- ◆ 캐비닛 내부온도, 전원 전압 등 환경요소 측정
- ◆ (예) 유지보수 시험반 컴퓨터에 인공지능모델 탑재하여  
진단 후 결과를 MTP 화면에 표시

(예)유지보수 시험반 (MTP)



APR-1400 원자로보호계통  
캐비닛-1채널

### □ 통합 상태진단 및 고장예측시스템 독립 운영

- ◆ 각 계통의 내부온도, 전원 전압 등 환경요소 측정
- ◆ 측정된 데이터를 big data platform에 저장
- ◆ Server 급 AI 머신을 활용하여 진단 후 결과를 정보계통 화면에 표시

# 감사합니다.

원자력발전소 안전을 위해  
지속적 원자력 연구개발에  
매진하겠습니다.