

## 2022 KNS Autumn Meeting

원자력발전소 운전지원시스템 개발 워크숍 (M)

# 원전 과도상황 조기경고 운전지원 기술개발

• • • •

2022. 10. 19.

한국원자력연구원  
구 서 룡



# CONTENTS



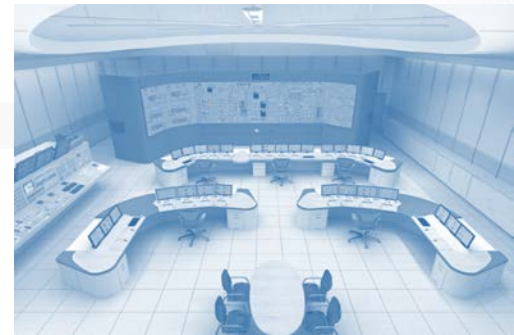
**01** 연구개발 배경 및 필요성

**02** 국내외 연구개발 동향

**03** 연구목표 및 추진전략

**04** 연구개발 진행현황 및 성과

**05** 기대성과 및 활용방안



# 01 연구개발 배경 및 필요성

# 01 연구개발 배경 및 필요성

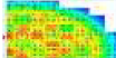


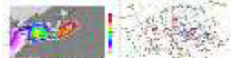
## ■ 미래원자력기술 활용 및 수출 경쟁력 확보

- ✓가동원전 안전 확보 및 해체분야 연구와 방사선 등 타 분야 융합연구에 AI, 빅데이터 등 첨단 ICT기반 기술의 접목이 요구됨
- ✓중소형 원전 SMR 또는 미래형 원전에서 ICT기반 원자력 안전 혁신 분야에 미래원자력기술을 적극 도입하여 원천적인 원전사고 방지 및 경쟁력 확보 필요함

## ■ 2018년 미래원자력 안전역량 강화방안

- ✓정부는 미래원자력 안전역량 강화방안 3대 전략 중 원자력 안전혁신 프로젝트 시범 추진으로 AI, 빅데이터 활용 원전 진단·제어 지원을 위한 지능형 원전 안전운전 지원시스템 개발 계획을 발표함
- ✓원전 이상/사고 예측, 대응 분석 등 인적오류를 최소화하기 위한 지원체계 일환으로 지능형 의사결정지원시스템 개발이 요구됨

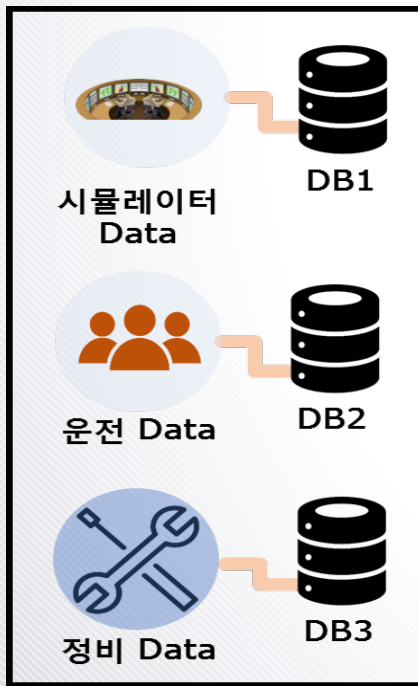
원자력 안전혁신 프로젝트 예시

| [분야1] 지능형 원전 안전운전 지원  |   | [분야2] 첨단기술 융합 방사능 사고대응   |   |
|---|---|--|---|
| 지능형 안전진단 및 빅데이터 구축<br>AI, IoT 이용 원전 진단 및 원전 운영/실험 빅데이터 구축                           | 지능형 의사결정 지원 시스템<br>원전 이상/사고 예측, 대응 분석 등 인적오류 최소화를 위한 지원체계                           | 방사능 사고대응 시스템<br>시뮬용 위해분석, 방사선재난 구호 로봇, 방호 드론 등                                       | 한국형 방사능 방재 체계<br>국내 환경/지역 맞춤형 재난모델 및 통합방재시스템  |
|  |  |  |  |

# 01 연구개발 배경 및 필요성

## 연구 필요성

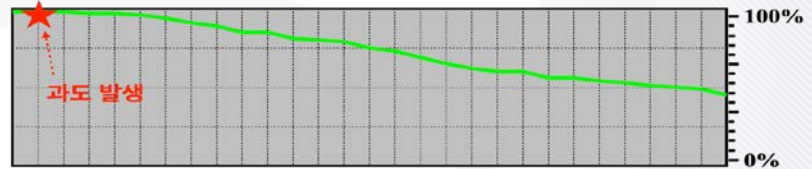
- 국내 원전은 40여년의 운영을 통해서 시뮬레이션, 운전, 정비 등의 다양하고 엄청난 양의 데이터를 확보할 수 있지만, 이런 다양한 원시(Raw) 데이터들을 의미 있는 단위로 분류하고 최적화할 수 있는 빅데이터 처리 체계가 필요함.
- 현재 원전 운전체계는 비정상 또는 비상이 발생한 후 절차서에 따른 운전원의 조치가 이루어지고 있는바, **과도상황에 대한 조기감지 및 대응을 지원하여 운전원 인적오류를 저감**할 수 있는 대응지원 기반기술이 필요함.



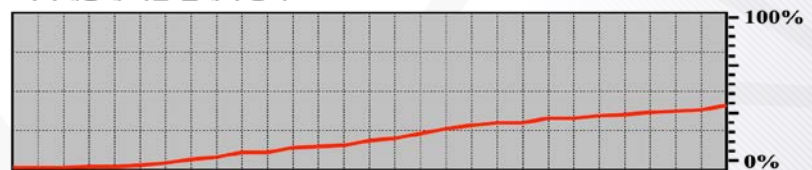
다양한 원시(Raw) 데이터



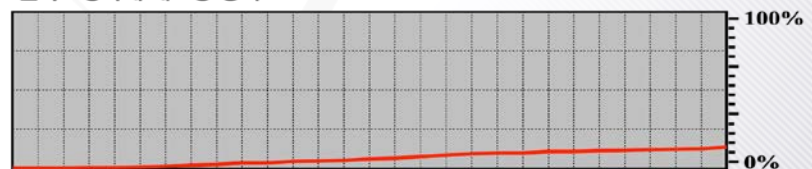
원자로 정상 상태



이차계통에 의한 열제거 증가



원자로냉각재 재고량 증가



# 02 국내외 연구개발 동향

# 02 국내외 연구개발 동향

## ■ 국외 현황

- ✓ 산업분야에서는 GE의 비행기 엔진 관리, Siemens의 IoT기반 공장설비 관리 등 주로 유지보수를 목적으로 기기 단위의 진단을 위한 연구 개발 진행중임.
- ✓ GE는 비행기 엔진에 다양한 센서를 장착해 대량의 데이터를 수집하고 분석함으로써, 기기 상태 예측 및 실시간 의사 결정을 통해 문제 발생 이전에 문제를 해결하고 운영을 최적화하고 있음.



<I-KOREA 4.0 실현을 위한 인공지능 R&D 전략(출처:과기부)>

## ■ 국내 현황

- ✓ 국내 IT, 자동차, 유통, 헬스케어 등 다양한 분야에서는 각 도메인에 최적화된 빅데이터 시스템 구축과 인공지능 연구 추진중임 (I-KOREA 4.0).
- ✓ 빅데이터 연구는 초기에 인프라 구축에 집중되었으나, 데이터의 효율성을 위한 관계성 분석 연구가 더 중요해지고 있는 추세임.
- ✓ 한수원은 원전 주요 설비 고장 조기경보를 위한 데이터센터를 구축하고 운영중임.
- ✓ 원전 인공지능 연구는 특정시점의 사건구분을 위한 딥러닝 연구가 시작되는 단계이며, 과도상황에 대한 조기진단과 대응을 위한 기반기술 연구가 요구됨.

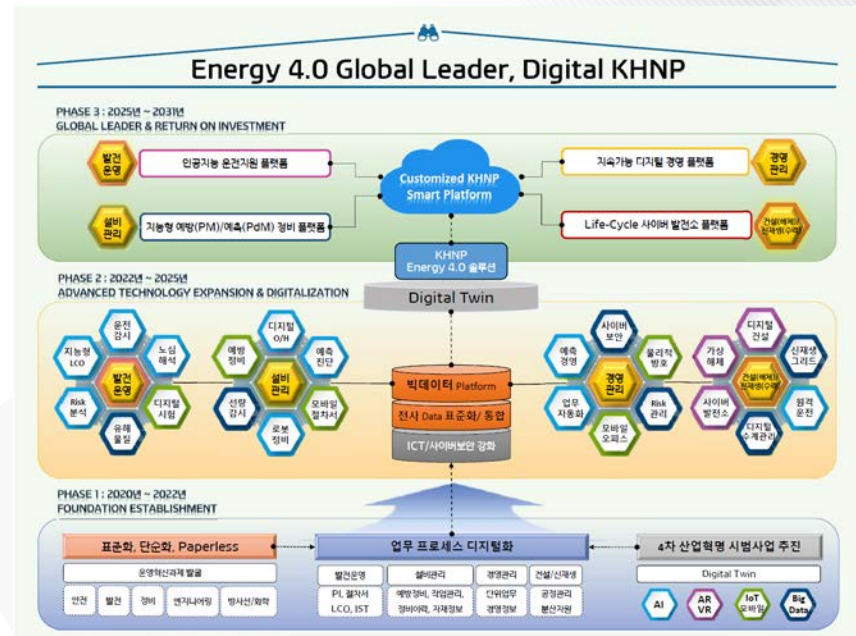


<기기(터빈) 진단 (출처:GE)>

# 02 국내외 연구개발 동향

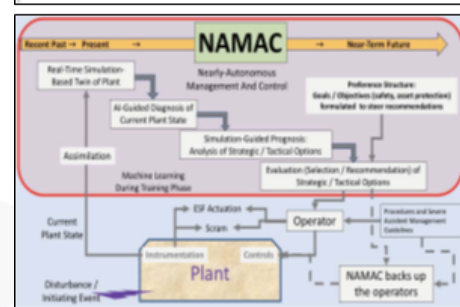
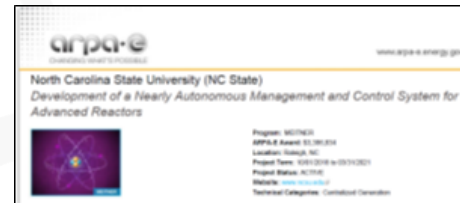
## ■ 국내 현황

- ✓ 한수원은 '한수원형 뉴딜 디지털 발전소 개발계획'에 따라 발전운영 분야에서 '인공지능 운전 지원 플랫폼' 기술개발을 PHASE 3 (2025년 ~2031년)의 최상위 목표로 선정하여 연구개발 계획을 추진중임
- ✓ 국내 원자력안전위원회의 2021년도 '원자력 안전규제 검증기술 고도화' 사업의 일환으로 '원전 디지털 I&C 소프트웨어 신뢰성 평가 규제방법론 개발' 과제를 통해 4차 산업혁명 요소기술의 원전 현장 적용에 따른 규제측면 제약사항 도출 연구개발을 추진중임



## ■ 국외 현황

- ✓ 미국은 2018년 에너지청(DOE) 주관으로 향후 SMR 등 신규원전을 위한 자율운전 및 제어자동화 연구개발에 착수하였으며, OECD 할덴 프로젝트의 경우 2021년부터 다양한 4차산업기술 기반 원전 운전 자동화 연구를 추진중임



| CONTENTS   |   | Page |
|--|---|------|
| Introduction to the 2020-2024 HRP Research Program |   |      |
| 1  | MISSION STATEMENTS  | 5    |
| 1.1  | Operator Performance in Digital Control Rooms   | 5    |
| 1.2  | Crew Factors, Teamwork and Role Independence  | 6    |
| 2  | Human Performance in Operations of Small Modular Reactors                                   | 8    |
| 2.1  | Operator Performance in Highly Automated Plants   | 10   |
| 2.2  | Effects of Adaptive Automation on Operator Performance in Future Plants                     | 10   |
| 3  | Human Performance in Operations of Small Modular Reactors                                   | 10   |
| 3.1  | Operator Performance in Operations of Small Modular Reactors                                | 10   |
| 3.2  | Advanced Condition-Based Maintenance using Digital Twins                                    | 10   |
| 3.3  | New Ways of Working, Organizational Capabilities for Maintaining the Organization Potential | 10   |
| 3.4  | Advanced Condition Monitoring for Decision Support  | 10   |
| 3.5  | Safety Awareness in Outage Organizations  | 10   |

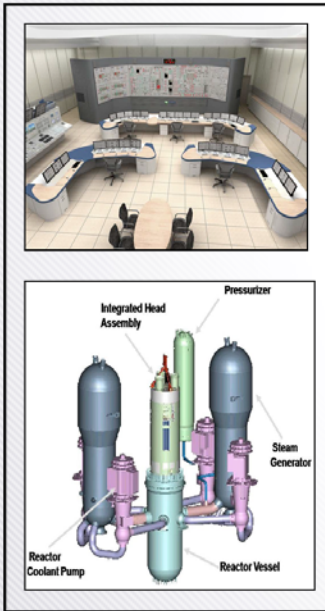
# 03 연구목표 및 추진전략

# 03 연구목표 및 추진전략

## 최종목표

- 원전 정상 및 과도상황 빅데이터 처리 체계 기반기술 개발
- 딥러닝 기법을 활용한 대표 과도상황 조기진단 알고리즘 개발
- 대표 과도상황 조기감지 및 운전 대응 지원 방안 정립

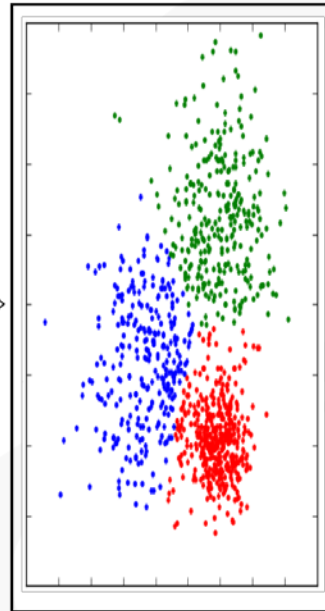
〈데이터 정형화〉



다양한 원시 데이터

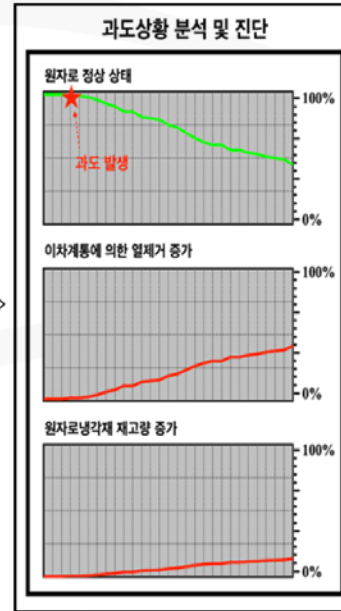
정형 데이터

〈분류 및 최적화〉



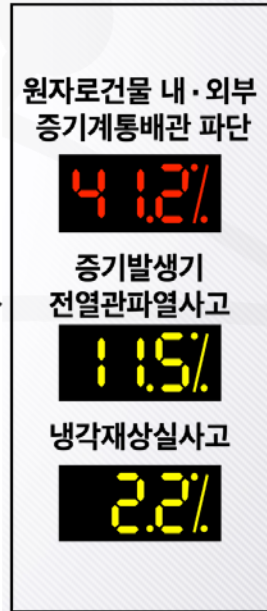
과도상황  
빅데이터

〈과도상황 진단〉



과도상황  
조기감지

〈과도상황 식별〉



과도상황  
식별 및 대응

# 03 연구목표 및 추진전략

## 추진체계

1단계

2단계

- 원시 데이터 전처리를 통한 데이터 정형화 기법 정립
- 정형 데이터 후처리를 통한 분류 및 최적화 기법 정립

- 대표 과도상황 빅데이터기반 조기진단 기반기술 개발
- 과도상황 조기감지를 통한 식별 및 대응지원 방안 수립

원전 정상·과도상황 빅데이터  
체계 및 과도상황 대응지원  
기반기술 개발

원전 정상 및 과도상황  
빅데이터 처리 체계  
기반기술 개발

대표 과도상황  
조기감지/진단 및  
원전원 판단 대응지원 모델  
개발

1단계

2단계

성과목표

2019

2020

2021

2022

2022

원전 빅데이터 확보 (정상, 과도상황 및 대응지원)

원전 빅데이터 데이터 전처리 개발

원전 빅데이터 데이터 후처리 개발

빅데이터 처리체계 선정 및 구축

빅데이터  
전처리/후처리  
보완

빅데이터 처리체계 보완

지도학습 기반 조기진단 딥러닝 모델

과도상황 데이터 생성

확률기반 과도상황 진단모델 개발

신뢰성 향상 모델 개발

강화학습 기반 조기진단 딥러닝 모델

대표 과도상황 대응지원

사고로의 진행 예방 대응 지원

원전 빅데이터  
처리체계 기반기술

대표 과도상황  
감지/진단 및 운전원  
판단 대응지원기술

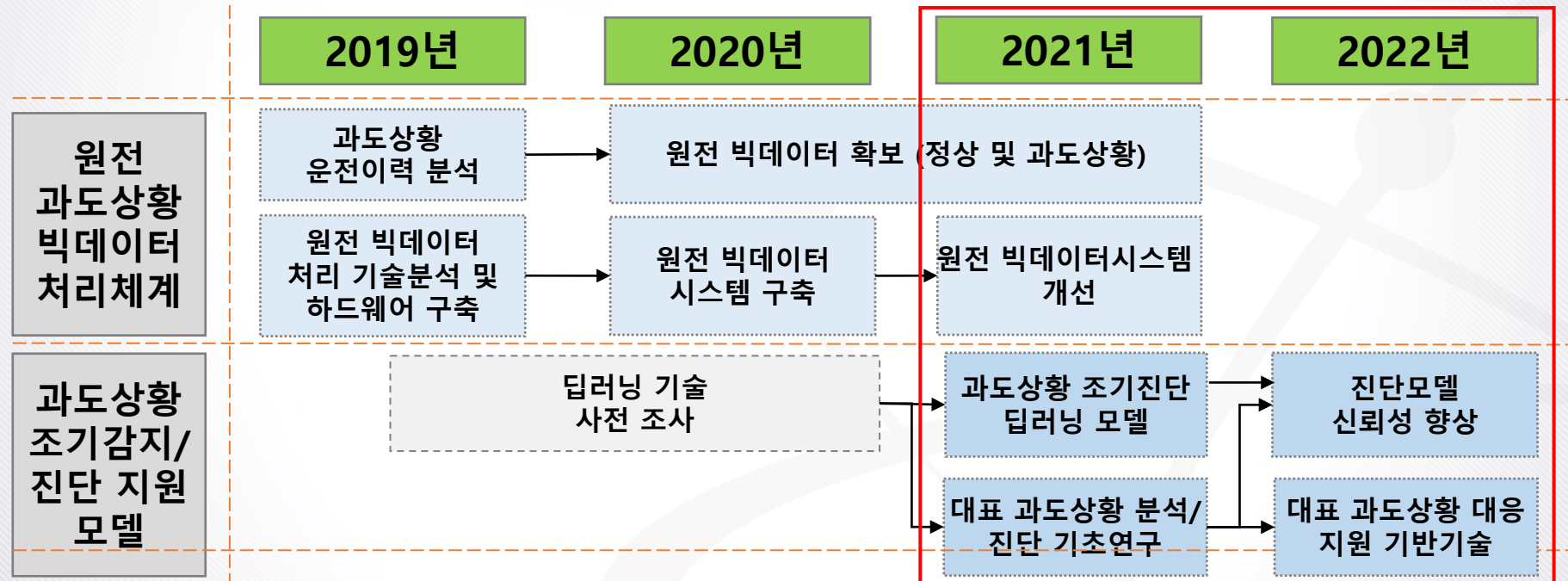
# 03 연구목표 및 추진전략

## 최종 목표

- 원전 **정상·과도상황 빅데이터 처리 체계** 기반기술 개발
- 딥러닝 기반 **대표 과도상황 조기진단 알고리즘** 및 **대응 지원 모델** 개발

## 2단계 목표

- 원전 빅데이터 **지도학습/강화학습 기반 딥러닝 모델** 검토 및 분석
- 원전 대표 과도상황 조기진단/대응을 위한 **신뢰성 향상 진단모델** 개발



## 평가착안점

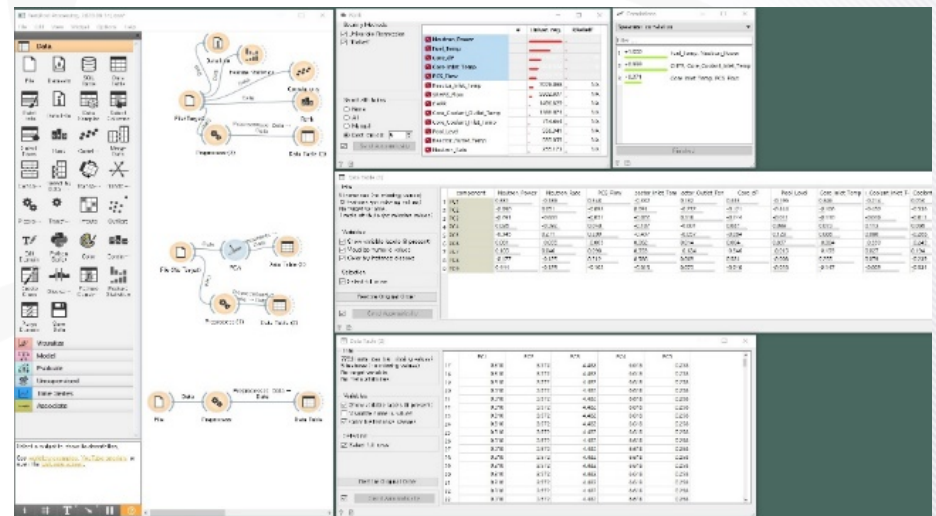
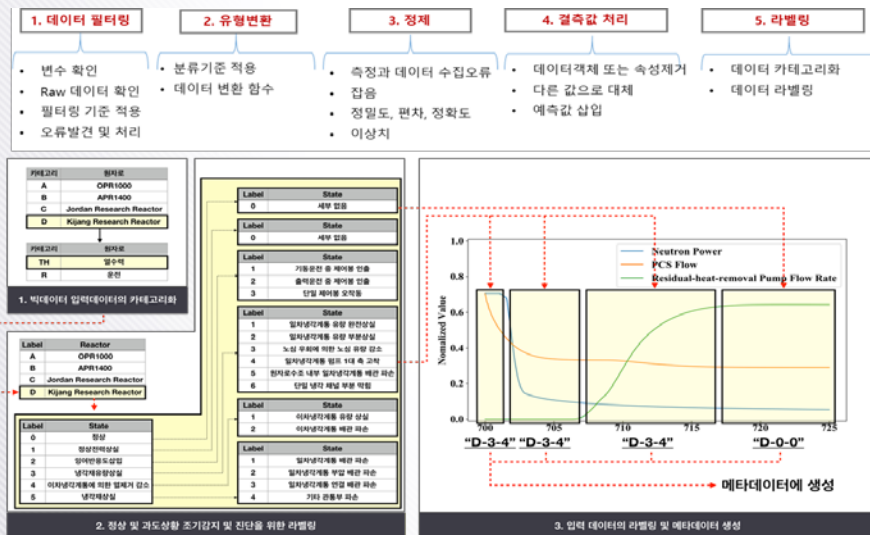
- 원전 빅데이터 딥러닝 모델 보고서 (**국내외 딥러닝 기술특성 및 원전적용성 반영**)
- 대표 과도상황 진단 모델 신뢰성 향상 (**진단 오차율 5% 이하**)
- 대표 과도상황 진단 모델 및 대응지원 기술보고서 (**2건 발행**)

# 04 연구개발 진행현황 및 성과

# 04 연구개발 진행현황 및 성과

## ■ 원전 빅데이터 전처리/후처리 기술 개발

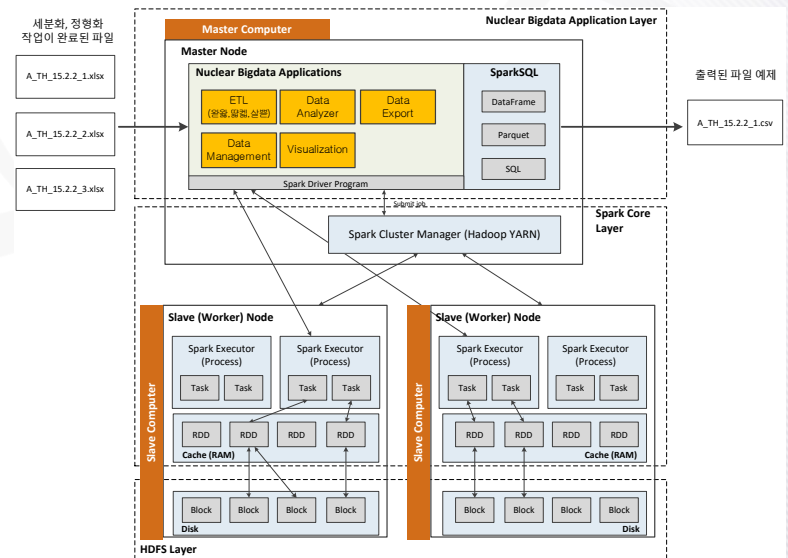
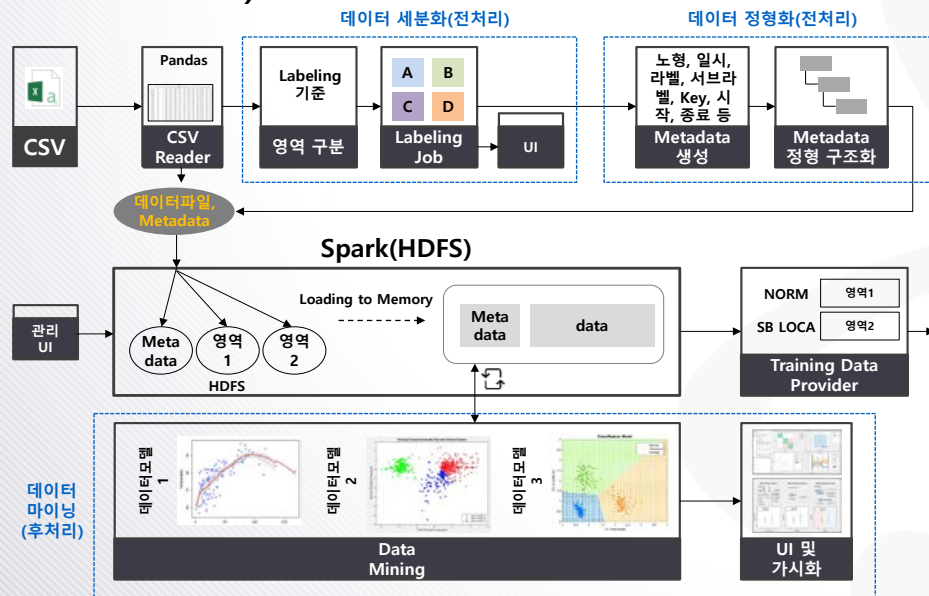
- 원전 빅데이터 특성에 맞는 확장 가능한 **카테고리 전략 및 라벨링 방법** 기반의 원전 빅데이터 전처리 프레임워크 개발
- **2가지(Univariate Regression, Chi2) 데이터마이닝 방법** 기반의 최적의 학습대상 변수 도출을 위한 원전 빅데이터 후처리 프레임워크 개발



# 04 연구개발 진행현황 및 성과

## ■ 원전 빅데이터 처리체계 및 빅데이터시스템 구축

- 원전 빅데이터 특화된 전처리/후처리 소프트웨어 모듈을 포함하는 **원전 빅데이터시스템 처리체계 도출** 및 하드웨어 구성방안 수립
- 대표 과도상황 빅데이터 처리를 위한 **3-Layered 원전 빅데이터 처리 소프트웨어** 개발 (1<sup>st</sup> Layer Hadoop 분산 파일시스템 / 2<sup>nd</sup> Layer Spark 기반 병렬 task 처리모듈 / 3<sup>rd</sup> Layer 원전 빅데이터 전처리 및 후처리 소프트웨어)



# 04 연구개발 진행현황 및 성과

## ■ 대표 과도상황 진단모델 신뢰성 향상

- 라벨간 데이터세트 수량의 밸런스 문제 해결을 위하여 Label\_SLB는 38개, Label\_SBLOCA는 12개, 총 50개의 열수력 계산 빅데이터 추가 확보
- 딥러닝 데이터세트 확장을 통해 Label\_SLB의 세부 라벨별 97% 이상의 정확도, Label\_SBLOCA의 세부 라벨별 99% 이상의 정확도 확인

| Label | Remark       | 범위                      |
|-------|--------------|-------------------------|
| 0     | N/A          | 0                       |
| 1     | 주증기관 면적 10%  | 9, 9.5, 10, 10.5, 11%   |
| 2     | 주증기관 면적 20%  | 19, 19.5, 20, 20.5, 21% |
| 3     | 주증기관 면적 30%  | 29, 29.5, 30, 30.5, 31% |
| 4     | 주증기관 면적 40%  | 39, 39.5, 40, 40.5, 41% |
| 5     | 주증기관 면적 50%  | 49, 49.5, 50, 50.5, 51% |
| 6     | 주증기관 면적 60%  | 59, 59.5, 60, 60.5, 61% |
| 7     | 주증기관 면적 70%  | 69, 69.5, 70, 70.5, 71% |
| 8     | 주증기관 면적 80%  | 79, 79.5, 80, 80.5, 81% |
| 9     | 주증기관 면적 90%  | 89, 89.5, 90, 90.5, 91% |
| 10    | 주증기관 면적 100% | 99, 99.5, 100%          |



| 라벨        | 세부 라벨        | 확장 이전 시험 정확도 | 확장 이후 시험 정확도 |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| Label_SLB | 정상(또는 다른사고)  | 100.00%      | 99.99%       |
|           | 주증기관 면적 10%  | 83.33%       | 100.00%      |
|           | 주증기관 면적 20%  | 50.00%       | 97.69%       |
|           | 주증기관 면적 30%  | 40.91%       | 100.00%      |
|           | 주증기관 면적 40%  | 40.91%       | 97.27%       |
|           | 주증기관 면적 50%  | 4.55%        | 97.27%       |
|           | 주증기관 면적 60%  | 72.73%       | 100.00%      |
|           | 주증기관 면적 70%  | 31.01%       | 100.00%      |
|           | 주증기관 면적 80%  | .00%         | 97.27%       |
|           | 주증기관 면적 90%  | 45.45%       | 94.55%       |
|           | 주증기관 면적 100% | 40.91%       | 90.91%       |

| Label | Remark | 범위            |
|-------|--------|---------------|
| 0     | N/A    | 0             |
| 1     | 1인치 파단 | 0.9, 1, 1.1인치 |
| 2     | 2인치 파단 | 1.9, 2, 2.1인치 |
| 3     | 3인치 파단 | 2.9, 3, 3.1인치 |
| 4     | 4인치 파단 | 3.9, 4, 4.1인치 |
| 5     | 5인치 파단 | 4.9, 5, 5.1인치 |
| 6     | 6인치 파단 | 5.9, 6, 6.1인치 |

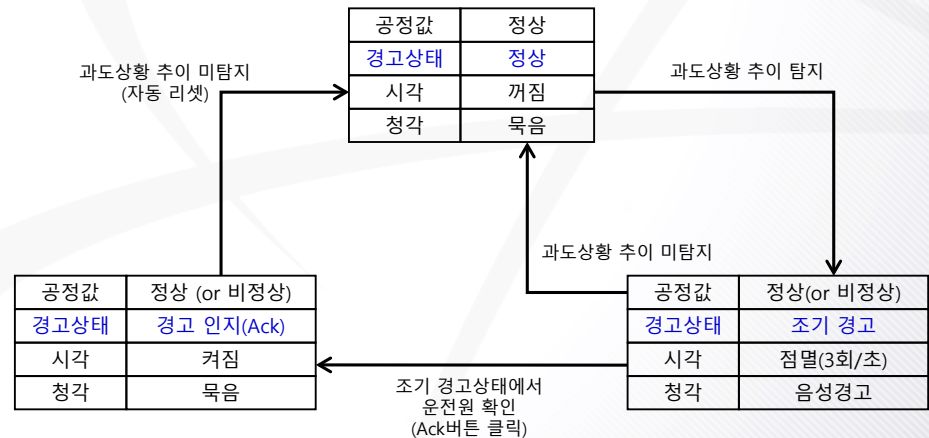
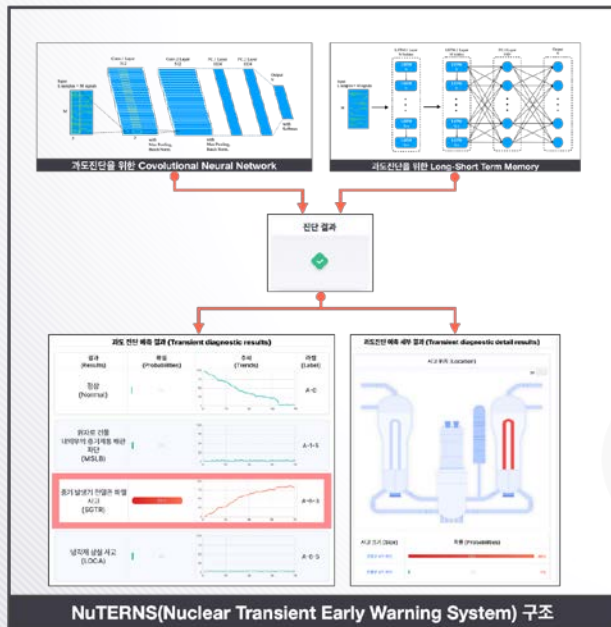


| 라벨           | 세부 라벨       | 확장 이전 시험 정확도 | 확장 이후 시험 정확도 |
|--------------|-------------|--------------|--------------|
| Label_SBLOCA | 정상(또는 다른사고) | 100.00%      | 100.00%      |
|              | 1인치 파단      | 99.70%       | 99.96%       |
|              | 2인치 파단      | 99.71%       | 99.83%       |
|              | 3인치 파단      | 100.00%      | 99.81%       |
|              | 4인치 파단      | 99.44%       | 99.80%       |
|              | 5인치 파단      | 100.00%      | 100.00%      |
|              | 6인치 파단      | 100.00%      | 100.00%      |

# 04 연구개발 진행현황 및 성과

## ■ 대표 과도상황 대응지원 기반기술

- 대표 과도상황 종류, 사고위치, 그리고 사고크기를 진단할 수 있도록 **6개의 CNN 모델과 6개의 LSTM 모델을 앙상블(Ensemble) 구조로 개발**
- 기존 규칙기반의 원전 경보(Alarm)와 달리 확률값(가능성)으로 출력하는 운전원 의사결정지원 개념의 **지능형 조기경고(Intelligent Early Warning) 대응지원** 요소기술 개발

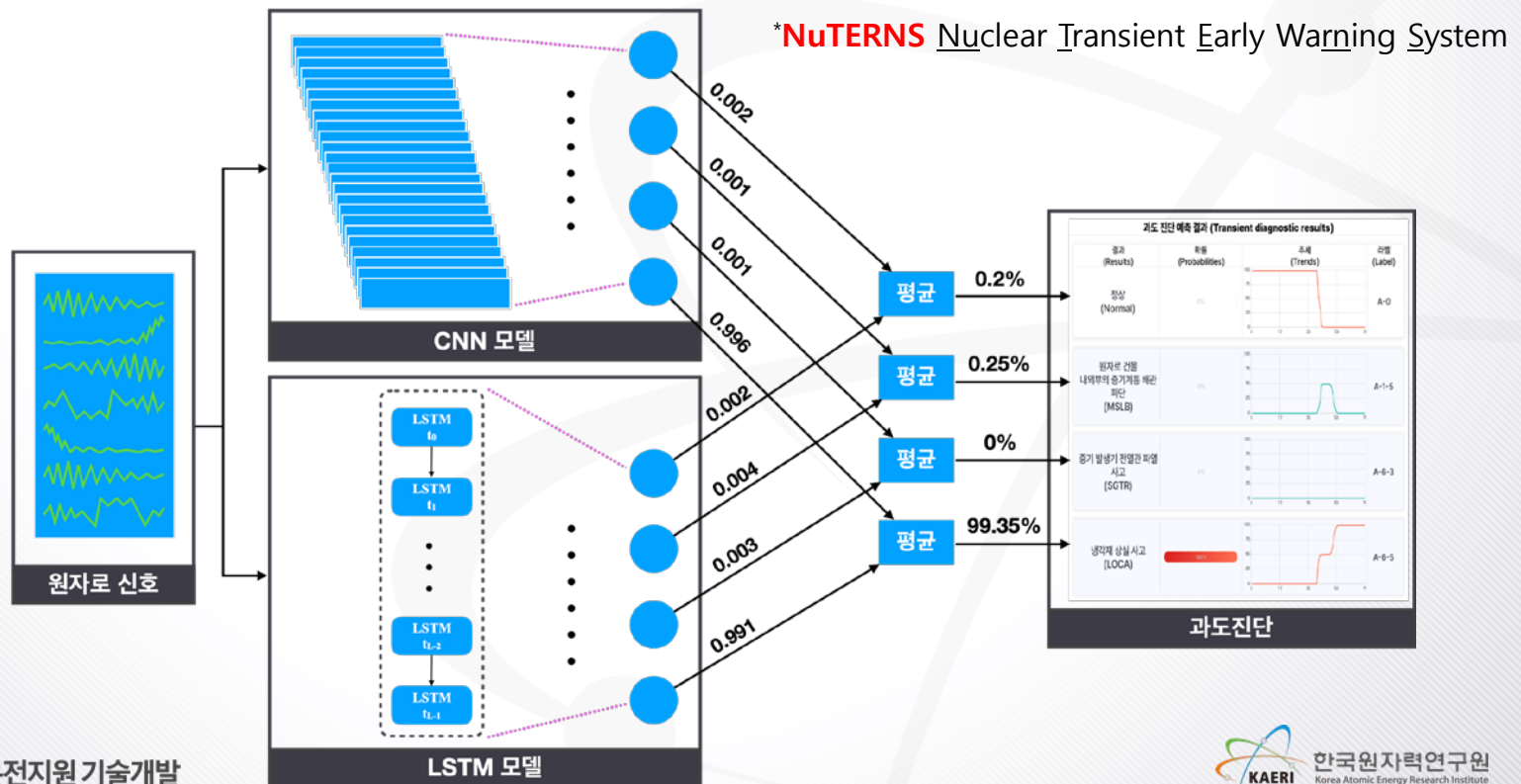


<딥러닝 기반 조기경고 상태 천이도>

# 04 연구개발 진행현황 및 성과

## ■ 확률 기반 과도상황 진단 구조

- CNN 모델과 LSTM 모델의 앙상블 구조 알고리즘
- 두 모델의 라벨 별 출력 값(정상, MSLB, SGTR, LOCA) 평균으로 확률 값 획득
- 라벨 별 확률 값을 NuTERNS 연관된 입력에 연결 및 결과 표시



# 04 연구개발 진행현황 및 성과

## ■ 원전 과도상황 조기경고시스템(NuTERNs) 개발

NuTERNs (한국원자력연구원)

### NuTERNs(Nuclear Transient Early waRNING System)

시나리오: 시나리오: \SBLOCA\_Location\_Loop1\_ColdLeg\_Size\_0.9\_Inch\_(트립 발생안함)  
현재상태: 정상

#### 과도 진단 예측 결과 (Transient diagnostic results)

| 결과<br>(Results)                        | 확률<br>(Probabilities) | 추세<br>(Trends) | 라벨<br>(Label) |
|--|-----------------------|----------------|---------------|
| 정상<br>(Normal)                         | 99%                   |                | A-0           |
| 원자로 건물<br>내외부의 증기계통 배관<br>파단<br>(MSLB) | 0%                    |                | A-1-5         |
| 증기 발생기 전열관 파열<br>사고<br>(SGTR)          | 0%                    |                | A-6-3         |
| 냉각재 상실 사고<br>(LOCA)                    | 0%                    |                | A-6-5         |

#### 과도진단 예측 세부 결과 (Transient diagnostic detail results)

사고 위치 (Location)

3D



사고 크기 (Size)

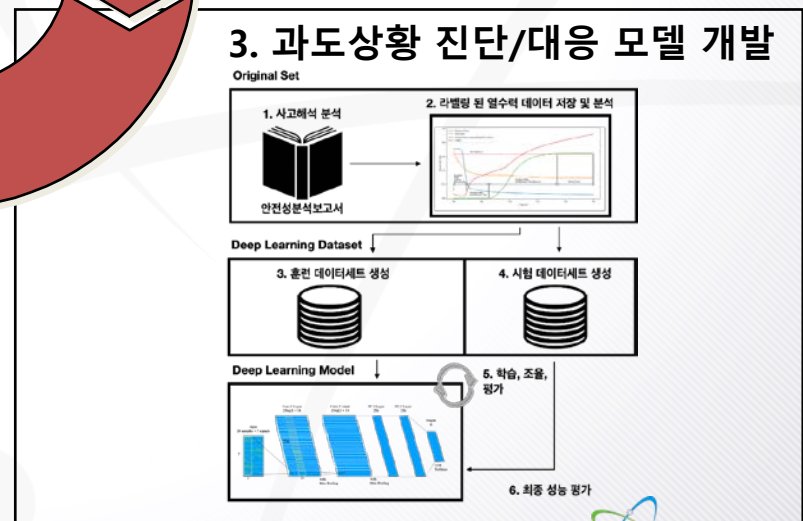
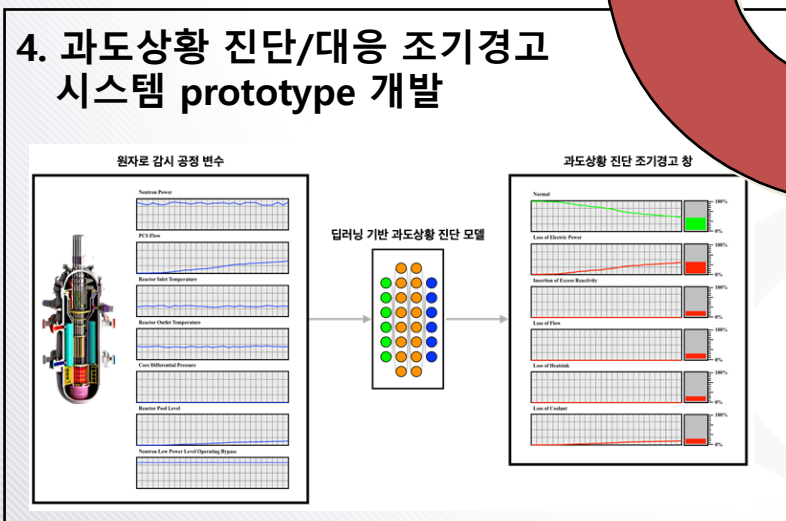
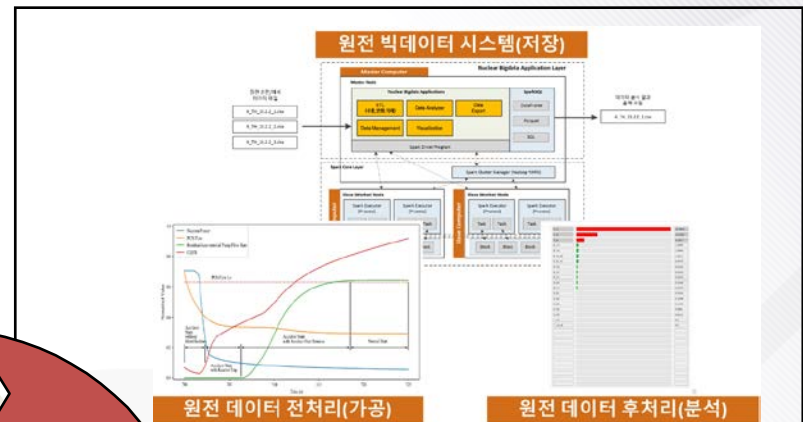
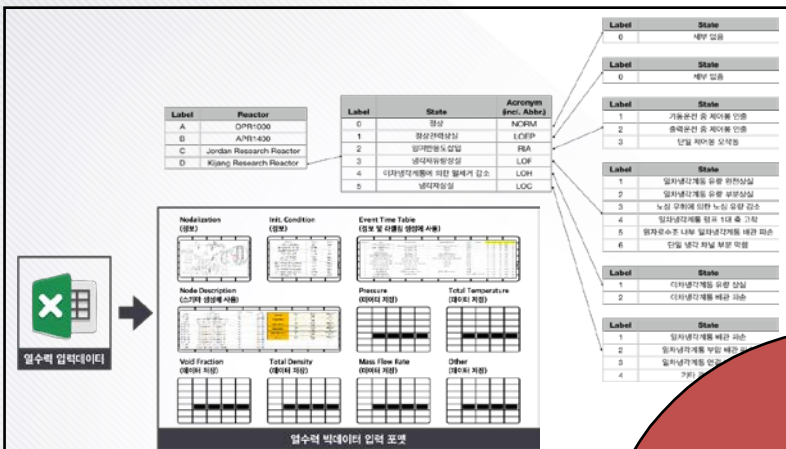
확률 (Probabilities)

|   |    |    |
|---|----|----|
| - | 0% | 0% |
| - | 0% | 0% |

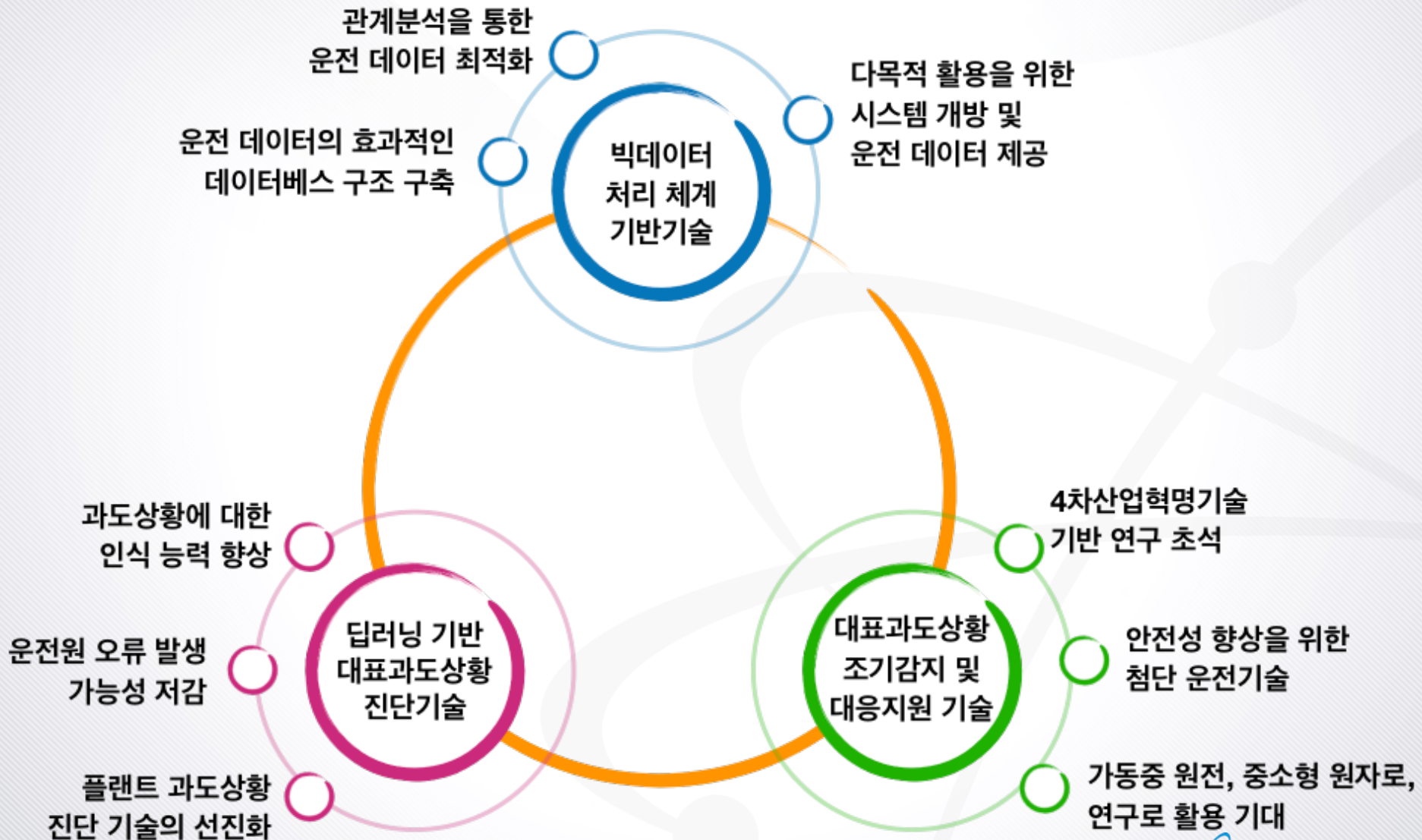
# 05

## 기대성과 및 활용방안

# 05기대성과 및 활용방안



# 05기대성과 및 활용방안





# THANK YOU