

APR1400 MMIS 디지털 트윈 개발

- MMIS 설비 가상화 -

2021.10.20



한국수력원자력주 증양연구원 계측기술그룹
이성진 선임

01 추진 배경

02 개발 현황

03 활용 방안
및 향후계획

04 참고 자료

Q&A





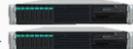
추진 배경

1.1 디지털 트윈

KHNP 디지털트윈



예측진단/조기경보



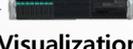
머신러닝 서버

시뮬레이션



시뮬레이션 서버

Twin 가시화



Visualization 워크스테이션

사용자 HMI



어플리케이션 서버

빅데이터 서버



DT의 핵심 특징

1. 과거의 값을 본다
2. 구성 요소를 변경(*)
3. 디지털 복제를 가상 공간으로 시각화
4. 실제 값을 트윈으로 전송
5. 임의 값을 트윈으로 전송(*)
6. 시뮬레이션(*)
7. 다시 현재 상태로 복귀



❖ 디지털 트윈에 대한 소견

- 발전소 실시간 상태 정보가 입력되지 않는 경우?
- 발전소 특정 상태에서 가상의 발전소 운전 또는 설비 조작 후 거동은 어떻게 예측?
- 시뮬레이션 변수는 실시간 상태 정보와 어떻게 통합?
- 디지털 트윈에 구현된 설비는 어느 수준까지 변경할 수 있을까?
- 발전소 건설-시운전-운영-유지보수-해체 단계별 디지털 트윈의 기능은?
- 건설 단계에서는 실시간 정보가 없음, 시운전 단계에서는 설비/계통 시험 위주

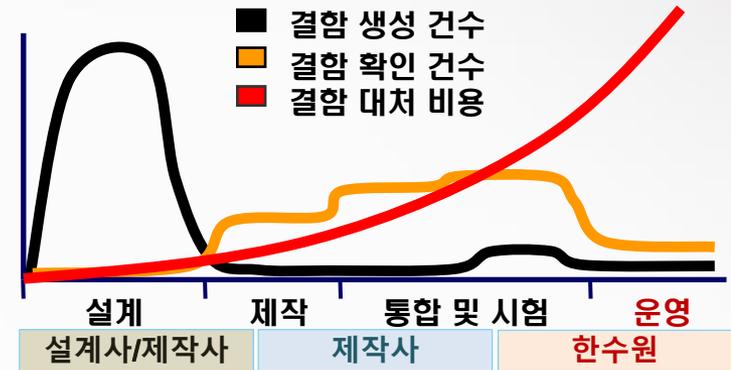
➔ 목적 지향적 개발

1.2 가상화 기반 APR1400 MMIS 디지털 트윈 필요성

❖ 원전 MMIS 건설단계(설계~시운전) 품질 고도화

- 주요 이슈 : 대규모 현장설계변경, 설계/제작 품질, 공기/비용 증가, 검증/고장분석 한계, 디지털기술
- 원인 : 문서기반 설계/제작/시험, 디지털기술 수준
- O&M 단계 : 주기적 시스템 변경/개선 및 대규모 플랫폼 교체 예정으로 건설단계 이슈 반복 가능
- **MMIS 제작/시험 전 수작업 외 검증수단 한계**

설계/제작/시운전 단계별 최적 시험/검증 디지털기술 필요



디지털시스템 생명주기 단계별 결함, 대처 비용 관계도

❖ MMIS O&M 용 ENG. 도구 개발 시급 ❖ 혁신형 SMR용 MMIS 개발 기반 확보

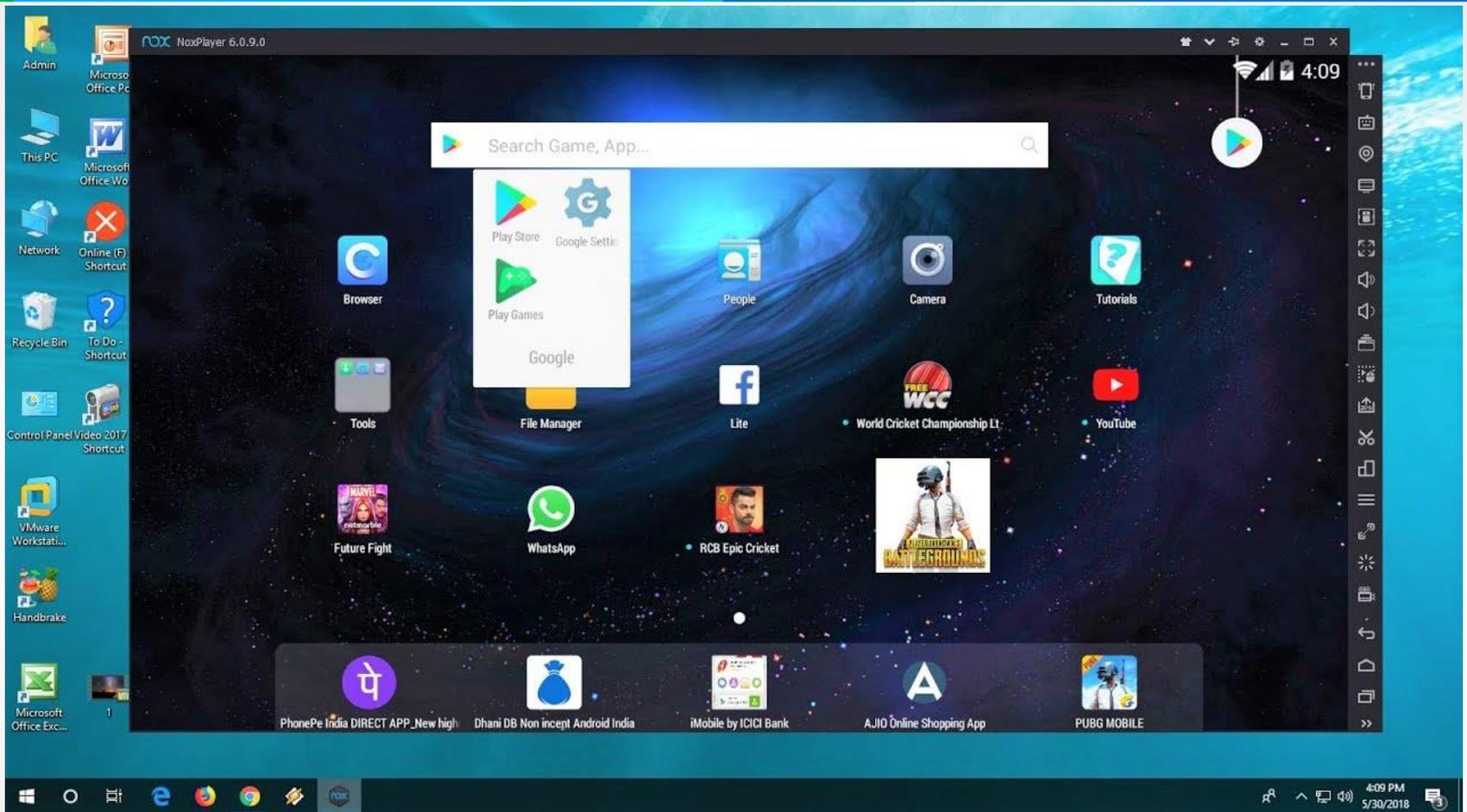
- 필요성 : 폐쇄형 기술구조(Embedded)의 MMIS 핵심 기술 확보, 복합/파급고장 근본분석 및 전문가 감소 대응
- **MMIS 엔지니어링 수행을 위한 전용 시뮬레이터 부재**
- 방향 : 가상기술기반 고충실도 시뮬레이션 기술개발,
- 설계/제작사 기술통제 가능 디지털기술 확보

복합시스템(SoS) 고장 근본원인 분석, 디지털 핵심역량 확보

단종 대체품 성능검증, O&M단계 설비변경 검증, R&D 기반

- 가상화 기술 기반 고신뢰성 차세대 MMIS 핵심 모듈 사전검증
- 혁신형 SMR용 MMIS 생애주기 기술 분석 및 Prototype 운영 인프라 구축
- 자율운전, 시스템 자동주기시험, AI적용 등 첨단 지능형 디지털 기술개발을 위한 고충실도 Test bed

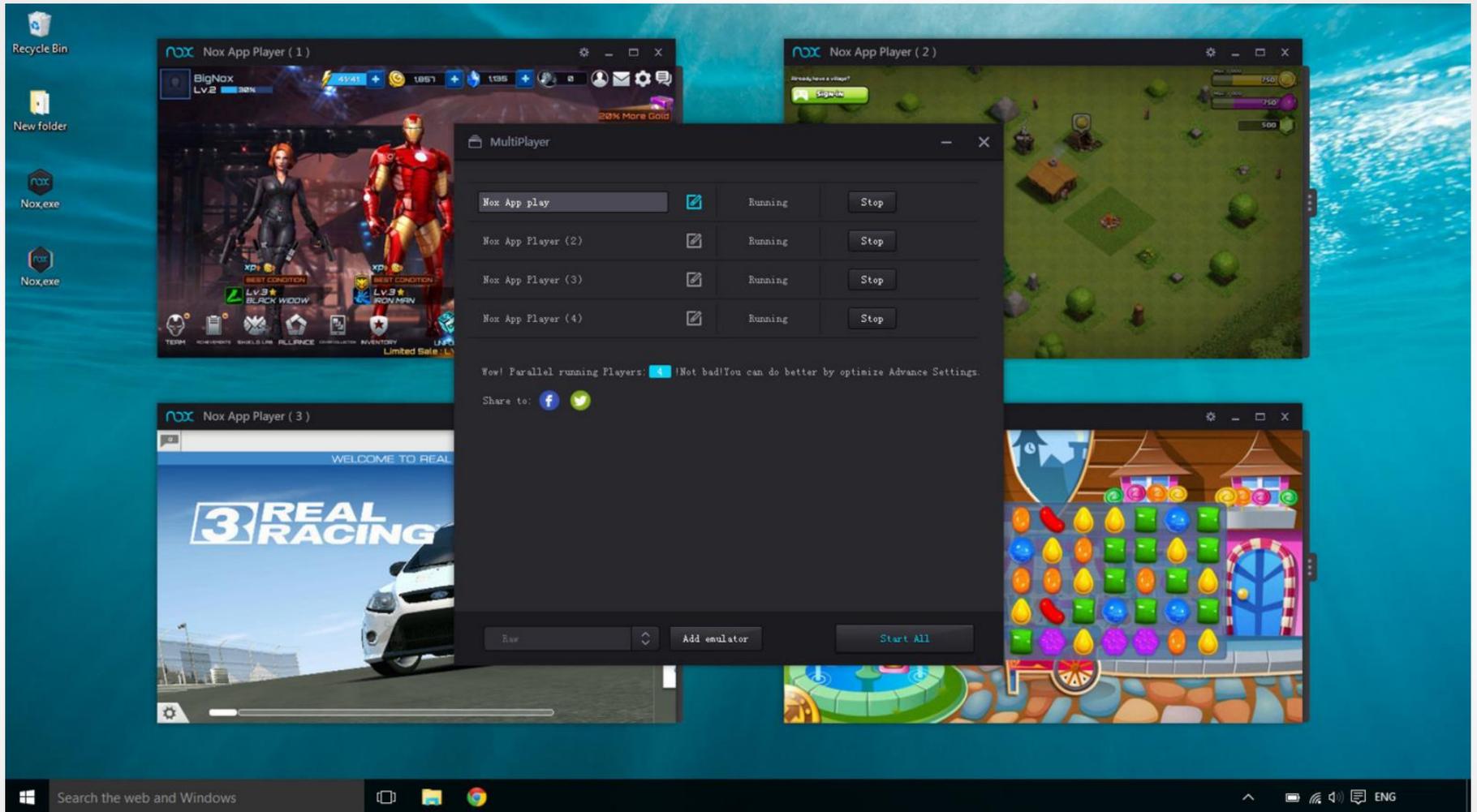
1.3 Virtualization



NOX Player

- 1) Virtual Box 기반으로 CPU Emulator는 아님
- 2) Host OS -> Hypervisor(NOX, Virtual Box) -> Guest OS

1.3 Virtualization

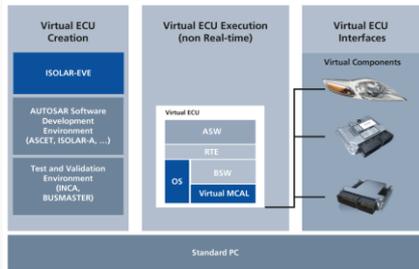


바람직한 활용법!

1.4 디지털 시스템 가상화

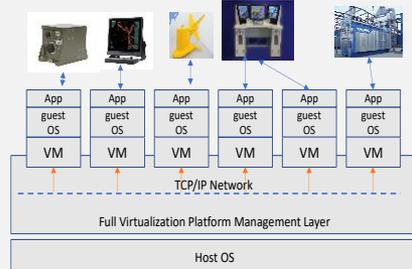
- ❖ IT 분야의 서버 가상화는 AWS, 클라우드 등 광범위하게 활용되고 있음
- ❖ 하드웨어(임베디드 시스템) 가상화 응용 사례 및 원전 MMIS에 적용

자동차분야



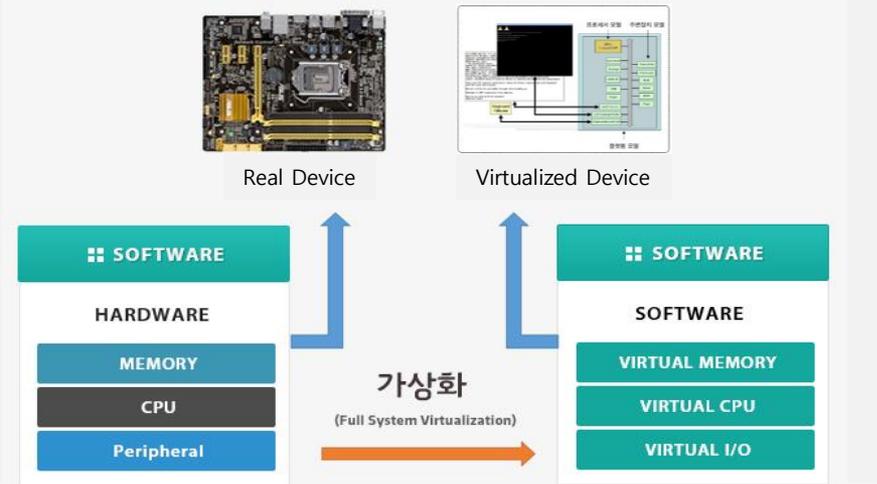
Virtual ECU 기반 SW 검증 및 차량 제어시스템 전체의 성능, 신뢰성, 내고장성, 보안성 등을 시험

국방분야



가상화 기반 전투체계 기능 훈련 및 사이버 모의 전투 훈련, 신뢰성/내고장성/수명 관리 등 시스템 검증 전반 활용

임베디드 시스템 가상화 개념



원전 MMIS 적용

안전계통(PLC)



비안전계통(DCS)



정보처리계통



가상화 기술

APR1400 국산 MMIS 디지털 트윈 개발

1.6 국산 MMIS 가상화 기반 DT 개발 전략

- ❖ 활용과 접근이 용이한 **다목적의 고충실도 Smart Simulator** 역할
 - (기능) MMIS **Engineering Simulator**, MMIS **Testing Simulator**, Plant **Operating Simulator**
 - (활용) MMIS 설계/제작/시험검증/시운전/운영(정비/개선) 전반의 사내외 디지털 조직 지원 툴
 - (확장) i-SMR MMIS 설계 Prototyping , KHNP DT 개발 연계, 디지털 신기술 R&D Test Bed
- ❖ MMIS DT 구현 방향 : 핵심 제어모듈-원형 동등 가상화, 기타 구성품- 기능/성능 가상화
 - MMIS DT 개발 단계 : 모듈 > 플랫폼(PLC, DCS) > 케비넷 & 콘솔 > 단일 시스템 > MMIS DT
 - MMIS Software(OS, Middle Ware, App. SW) – 원형 동일 사용, DT 개발 단계 & 기술 표준화
 - MMIS DT 활용을 위한 DT Smart Engineering, DT Management, DT 연계 운전Sim. 병행 개발



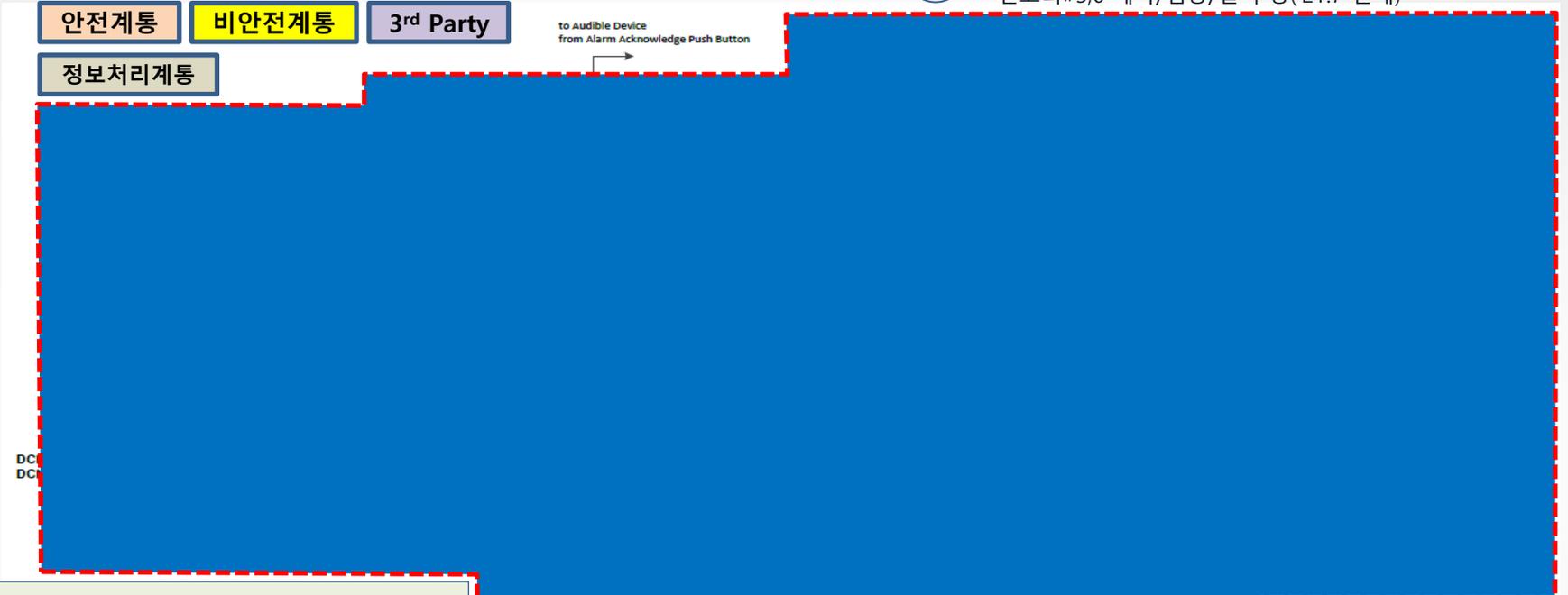


개발 현황

2.1 국산 MMIS 구성 및 가상화 범위

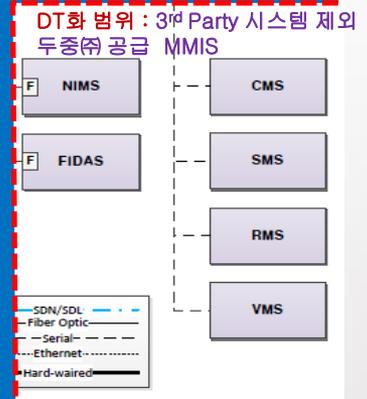
현황

- * 국산화 개발(KNICS) 및 상용화 검증 ('01~'09)
- * 신한울#1,2 제작/검증/설치완료('15), 시운전 중
- * 신고리#5,6 제작/검증/설치 중('21.7 현재)



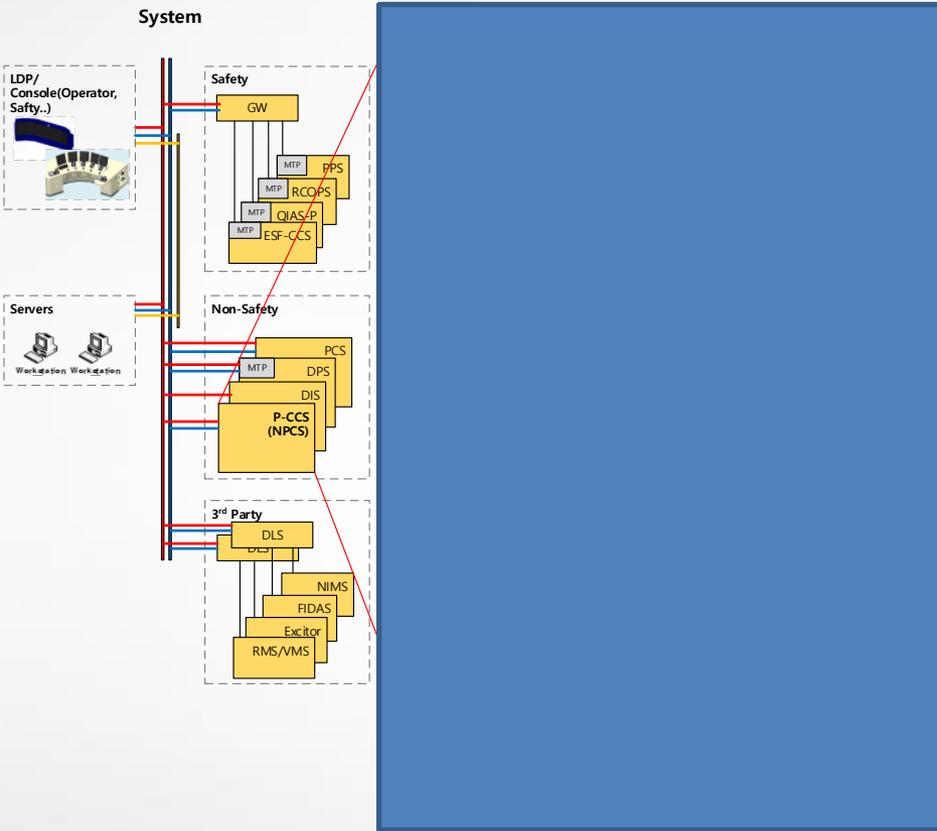
- * MMIS : 원전 디지털제어시스템
 - 공급사 : 두산중공업
- * 발전소 보호/제어/감시/정보 담당
- * 국산 플랫폼 사용, 고신뢰성 구조
 - 안전 PLC(4Ch), 비안전 DCS(2Trn)
- * 네트워크 기반 복합 시스템(SoS)
 - 13계통/295Cab.&콘솔/45Rooms

별첨. ESF-CCS Ch.A 구성도



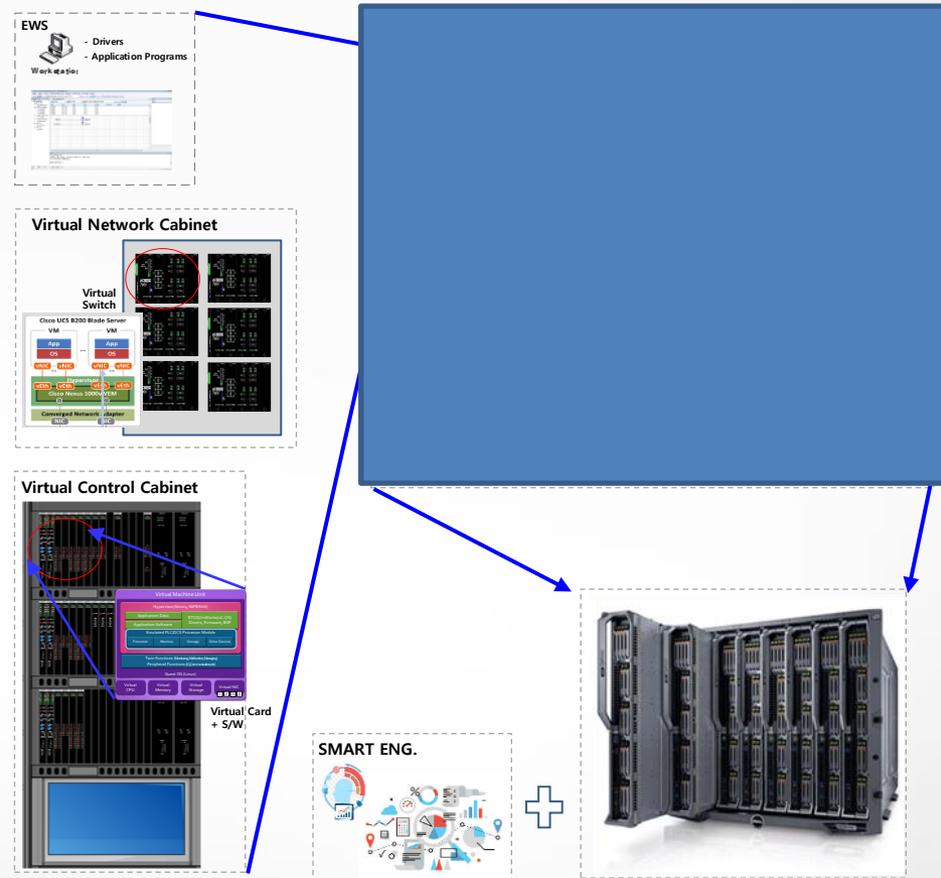
2.2 실물 MMIS의 디지털 트윈 구현 방법

Real MMIS



세분화 작업(가상화 구현대상 식별)
 계통 → 설비 그룹 → 단위 설비 → 주요 모듈

Virtualized MMIS

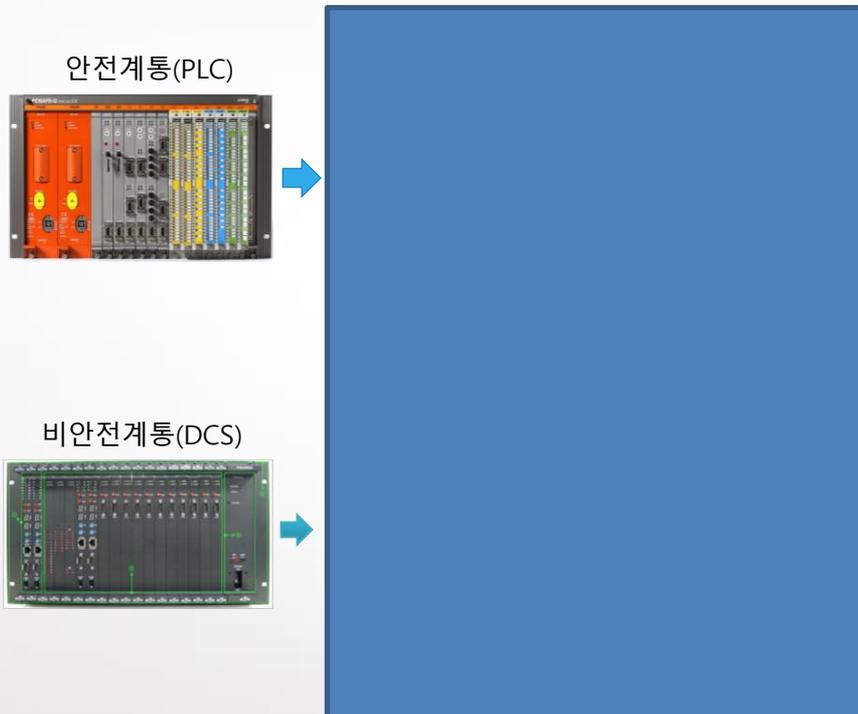


역순으로 통합 구축 (Build & Add)

2.3 국산 MMIS 디지털 트윈 개발(1/3) – 특징#1,2

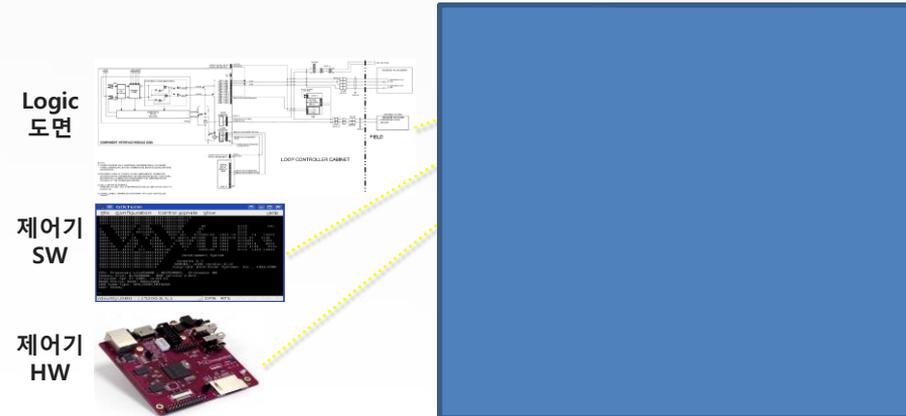
❖ [Key#1] 임베디드 시스템 전가상화

- 전가상화 : 대상 시스템의 OS를 수정하지 않고 그대로 사용하는 방식
- CPU 가상화 기반 Virtual PLC, Virtual DCS 전가상화 개발
- 각종 Upgrade에 대응 가능 : Processor, 주변 부품, Firmware, OS, Application SW & Contents

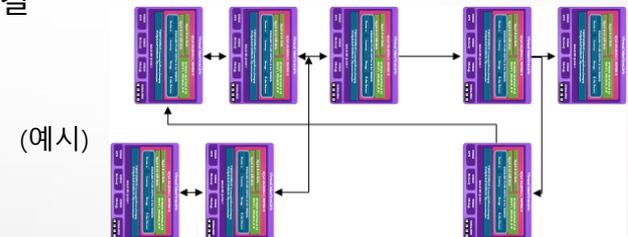


❖ [Key#2] 가상머신(VM) 단위 개발

- VM(Virtual Machine) : 컴퓨팅 환경을 소프트웨어로 구현한 것
- 단일 VM에 Virtual PLC 또는 Virtual DCS를 탑재
 - Guest OS 영역에서 추가 기능 개발 용이
- VM간 네트워크 가상화 구성



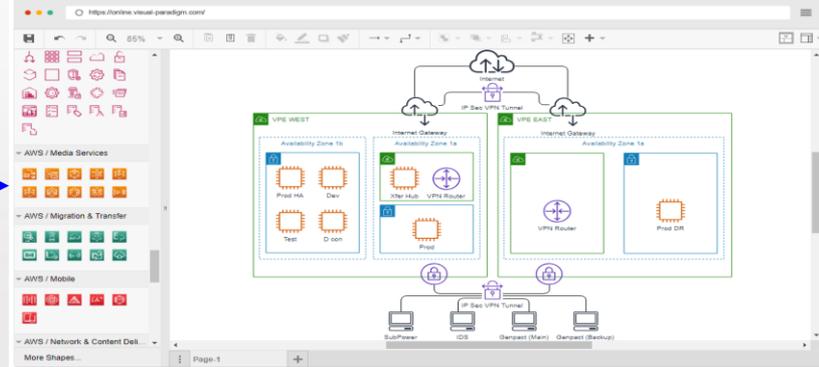
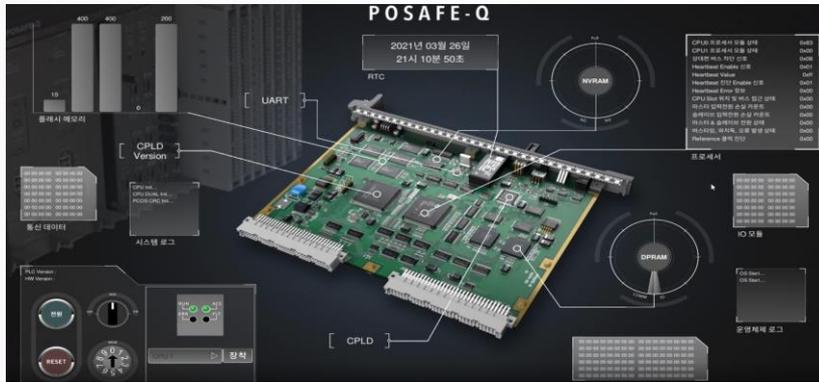
- 1개의 VM = 1개 Rack(제어 유닛(CPU+I/O+PS)) 대응
 - MMIS 계통 구성 : VM 다수 배치 → 형상 설정 → 네트워크 연결



2.3 국산 MMIS 디지털 트윈 개발 (2/3) - 특징#3,4

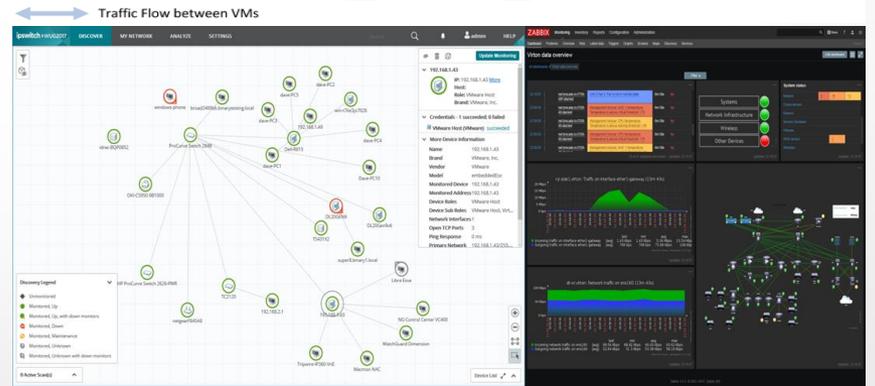
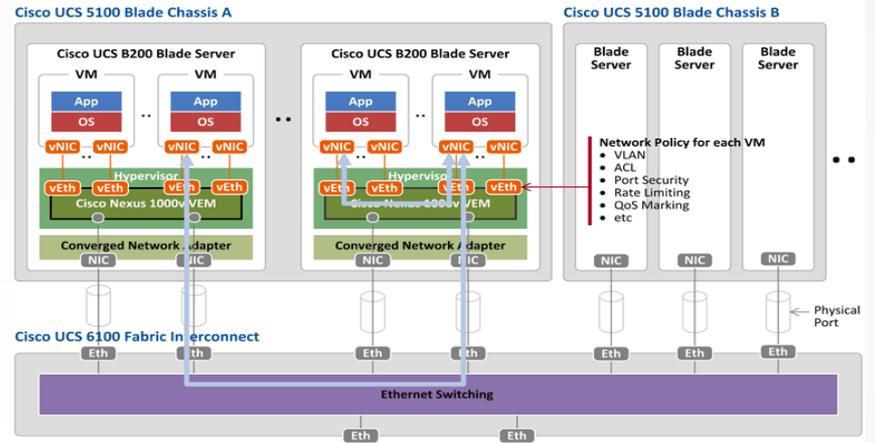
❖ [Key#3] GUI 기반 DT 엔지니어링

- 가상머신(VM) 관리
 - VM 생성 및 삭제, 표준 VM 템플릿 구성
- MMIS DT 관리
 - Drag & Drop 가상 MMIS 구성 기능
 - MMIS HW, SW 버전 관리
 - 가상 MMIS 및 개별 VM 상태 감시



❖ [Key#4] 네트워크 가상화

- 실물 설비 기반이 아니므로 소프트웨어 기반의 네트워크 가상화 적용
- GUI 기반 네트워크 Configuration 적용
- 네트워크 트래픽 감시 용이



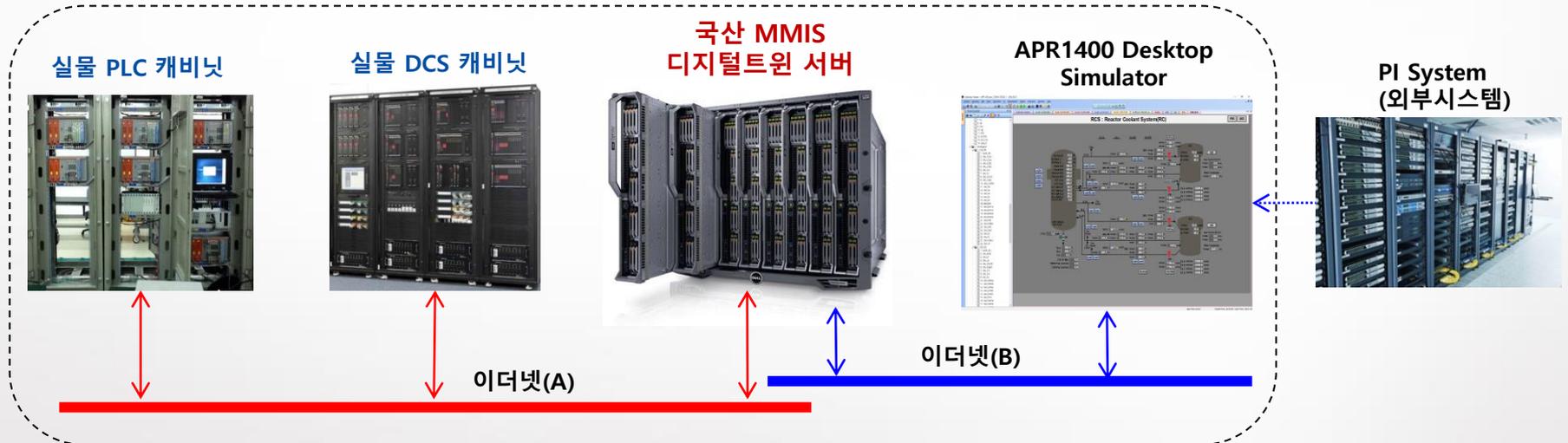
2.3 국산 MMIS 디지털 트윈 개발 (3/3) – 특징#5,6

❖ [Key#5] 가상-실물 MMIS 연계

- 가상화된 MMIS 전체 중 일부를 실물 설비(캐비닛)로 적용하여 네트워크(이더넷 기반)로 통합
 - 안전계통(PLC)/비안전계통(DCS) 실물 캐비닛 연결
 - 실물 설비 변경(설계변경, 대체품) 사전 성능 검증
- 향후 발전소 MMIS 시스템 중 제어 감시용 설비의 부분 가상화 설비화 R&D 추진 시 사전 기술검증

❖ [Key#6] 동적 모의 모델 및 실시간 발전소 PI 연계

- 발전소 운전원 교육훈련용 시뮬레이터(FSS) → MMIS 디지털 트윈용 변환
 - FSS 형상에서 MMIS 부분(Control 및 HMI)을 제거
 - 다양한 모의 상황(Initial Condition) 저장/복원 기능 활용
 - 중요 작업 전 모의 조작을 통해 발전소 거동 확인
- 발전소 PI 연계
 - 최신 발전소 상태를 기준으로 시뮬레이터 초기 조건 생성
 - 최신 발전소 MMIS 상태를 디지털 트윈에 반영
 - 기준점으로부터 발전소 모의 운영 수행



2.4 주요 기능

MMIS 설비 동적 상태 표시 (2D/3D)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 플랜트에 운영되고 있는 모든 MMIS 설비(캐비닛, 네트워크 스위치)를 3D 공간에 배치 <ol style="list-style-type: none"> 1) 네트워크 부하량 표시 2) Data Flow 표시 ▪ 개별 캐비닛의 전/후단 외관 표시 ▪ 개별 캐비닛에 속한 제어모듈의 상태정보 표시
PLC/DCS EWS 기능 구현	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 발전소에 설치된 EWS와 동일한 기본 기능(Task, Logic 업로드/다운로드/로직시행/로직변경 등) 구현 ▪ PLC EWS(pSet-II)의 경우 기존(설비와 시리얼 포트 연결) 대비 이더넷 방식으로 변환 구현 ▪ 추가 기능 <ol style="list-style-type: none"> 1) 다수 가상 모듈 동시 접속 2) 스크립트 방식 EWS 작업 자동화
MMIS 제작단계 프로토타입 구축 기능	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 건설/제작 단계의 프로토타입 구축을 위해 가상 캐비닛 단위로 GUI 형태의 System Builder 구현 <ol style="list-style-type: none"> 1) Drag&Drop으로 가상 캐비닛 배치 2) 캐비닛 속성 및 가상 네트워크 설정 3) 각종 정보(캐비닛 I/O 포인트) 매핑 누락여부 검사
PLC/DCS 제어모듈 동작 확인	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PLC/DCS 제어모듈의 레지스터, 메모리, 버퍼, Task등 실시간 동작상태 확인 ▪ 전체 설비에 대한 실시간 동작 상태정보 기록 (로그 분석)

2.4 주요 기능

MMIS Database 유효성 검증	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 플랜트 MMIS에 사용되는 각종 DB의 유효성 검증
네트워크 신뢰성 검증	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 실시간 네트워크 데이터 모니터링, 저장, 상태 시각화 ▪ 네트워크 부하 테스트 기능
기기제어로직 검증 자동화	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 단위 기기제어로직의 Test Case 구성 및 테스트 자동화 ▪ 다수 기기제어로직 동시 테스트 수행 --> 제작 공정 단축
MMIS 시운전절차서(시험절차) 수행	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 시운전 단계에서 사용되는 시험절차서 수행 기능 : 설비에 대한 단순 Graphic이 아닌 시험기능을 수행하기 위한 추가 GUI 필요 ▪ Manual Test 구현 후 Automatic Test로 기능 고도화
MMIS 계통 및 전 범위 성능 시험 수행	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 일부 계통 또는 전체 계통에 대한 성능 시험 Test Case 구성 ▪ 성능시험 결과 기록 ▪ 설계-제작-운영 단계 지원
설비 설계변경(HW, SW, 로직) 전후 유효성 검증	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 발전소에서 운영중인 Software V&V 절차를 가상 MMIS에서 수행할 수 있도록 기능 구현 ▪ SW 및 로직 검증 기능을 우선 구현하고, 향후 가능한 범위 HW 유효성 검증을 지원
설비 고장 시뮬레이션 및 원인분석 지원	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가상화 구현 범위 내에서 Malfunction(기존 고장사례 및 FMEA 분석결과)을 정의 ▪ 각 고장별 원인분석에 필요한 최적 지원화면 개발 : 고장 전파 상황 확인, 범위 내 설비의 성능 저하 확인 등

2.4 주요 기능

<p>정비원/운전원 교육훈련</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ MMIS 설비 정비원 대상 실습 교육 수행 기능 <ol style="list-style-type: none"> 1) 강사용 Instructor Station(Malfunction, Remote Function) 개발 2) 교육생용 다중접속 설비화면 개발 3) 교육생용 설비 조작화면 개발 ▪ 현재 운영되고 있는 MMIS 설비 교육훈련 프로그램 반영 ▪ MCR 운전원용 운전 콘솔 구현 - 디스플레이, 아날로그 스위치 등 통합 <ol style="list-style-type: none"> 1) 기존 운전원용 시뮬레이터 기능 포함 ▪ 운전원/정비원 통합직무 훈련용 End Point 설비 구성
<p>MMIS 설비 운영 데이터 저장</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 인공지능 및 빅데이터분석용으로 사용되기 위한 기초 자료 저장
<p>가상화 서버 상태 감시 및 관리 기능</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 블레이드 서버 Resource 모니터링, 개별 VM 성능 감시, Network 감시 ▪ VM Live Migration, 개별 VM Console 접근
<p>MMIS 다중 형상버전 운영</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가상화 MMIS 전범위를 단일 형상으로 관리 ▪ 현재 블레이드 서버에서 운영 중인 형상을 다른 형상으로 전환 및 재기동하는 기능 (예시 : 신한울#1,2 <-> 신고리#5,6 또는 신한울#1,2 2021버전 <-> 2022버전)
<p>운전원 훈련용 FSS 연계 기능</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 가상 MMIS 및 시뮬레이터 서버간 양방향 정보 공유 기능 ▪ 발전소 실시간 정보 기반 초기조건 생성 기능 ▪ Simulation Function (Run, Stop, Snap, IC)

3

활용 방안 및
향후 계획

3.1 기술적 활용

첨단 IT 기술을 적용한 공정제어 설비

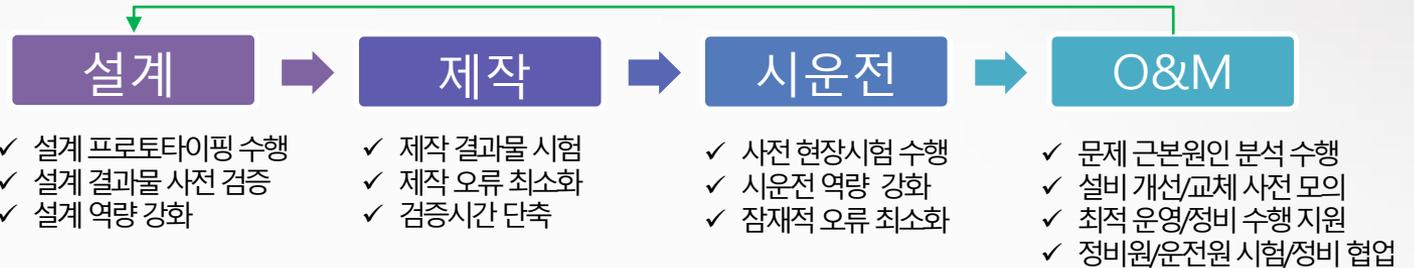
→ High Availability, Scalability, Centralized Remote 형태의 디지털 전환

핵심 기술 구분	세부 활용 방안
[Key 1] PLC/DCS 플랫폼 에뮬레이션	<ol style="list-style-type: none"> 1. 벤더 기술력 제고 - 새로운 임베디드 플랫폼을 가상으로 개발하여 기능 검증. 실제 현장과 동일한 환경에서 플랫폼에 대한 버그 테스트 수행 가능 2. 단종 대응 - 모든 디지털 설비에 대해 본품과 동등한 에뮬레이션 이미지 구축하여 단종에 대응 3. 부품 노후화 대비 - 플랫폼에 사용되는 각종 부품의 노후화/열화 등의 문제에서 자유로움 4. 새로운 벤더 참여 - 공급 업체 다양화 가능
[Key 2] VM 표준 구조	<ol style="list-style-type: none"> 1. 이용률 극대화 - 가상화 MMIS의 일부 기능이 불능시, 해당 기능을 복구하기 위한 조치(VM 생성 및 네트워크 연결)를 수행
[Key 3] 네트워크 가상화	<ol style="list-style-type: none"> 2. 설비 공간 최소화 - 공정제어 설비 중 가상화 가능한 부분을 모두 전환 3. 원격 설비 제어 - IoT와 초고속 통신망을 기반으로 광역에 걸친 설비들을 제어하기 위해 중앙 집중식 가상화 제어
[Key 4] 트윈 관리 기능	<ol style="list-style-type: none"> 4. 효율적 설비 감시(사무실/원격/모바일) - 문제가 발생하는 요소를 쉽게 식별하고 가능한 범위에서 즉시 복구
[Key 5] 트윈 실물 연계	<ol style="list-style-type: none"> 1. 이용률 극대화 - 문제가 되거나 유지보수가 필요한 실물 공정제어 설비를 '트윈 설비'로 대체 2. 이중화 구축 - 같은 기능을 갖는 서로 다른 형태의 공정제어설비 구축 효과

3.2 사업적 활용

국산화 APR1400 발전소

- MMIS 생애주기 단계별 핵심 엔지니어링 도구 → **이용율/신뢰도 향상**



- 체코/폴란드 입찰제안서 내 '신기술'분야 선정 → **수출경쟁력 제고**

i-SMR 개발

- i-SMR 및 수출원전 용 혁신형 MMIS 개발기간(설계-제작-시운전) 단축**

- 플랫폼 개발시 MMIS DT 활용으로 개발 Prototype 기능/성능 사전 확인
- 플랫폼 확정 후, MMIS DT 중심의 MMIS 계통 설계/제작/시험 연계로 설계사-제작사-운영사 간 불필요한 연계업무 제거, 공기/비용/품질 제고

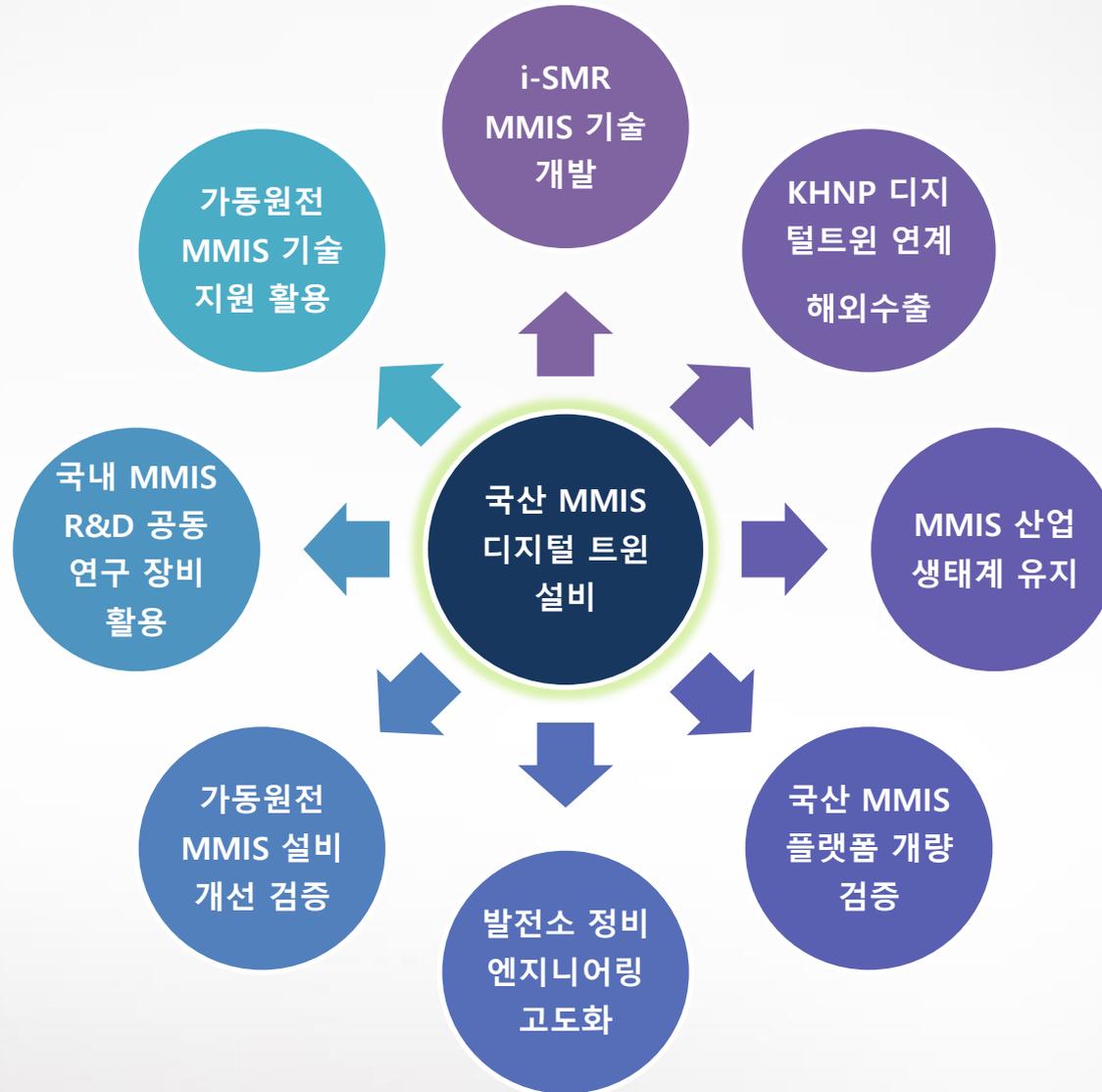
KHNP 디지털트윈 연계

- 본사 추진 디지털 트윈 3단계(노형확대+고도화)시 통합운전제어 연동 → **회사 사업 추진 효율성 제고**
- 디지털트윈 연계용 디지털 설비 가상화 기술 표준화 방안 도출

MMIS 디지털트윈 유관기관 공동활용

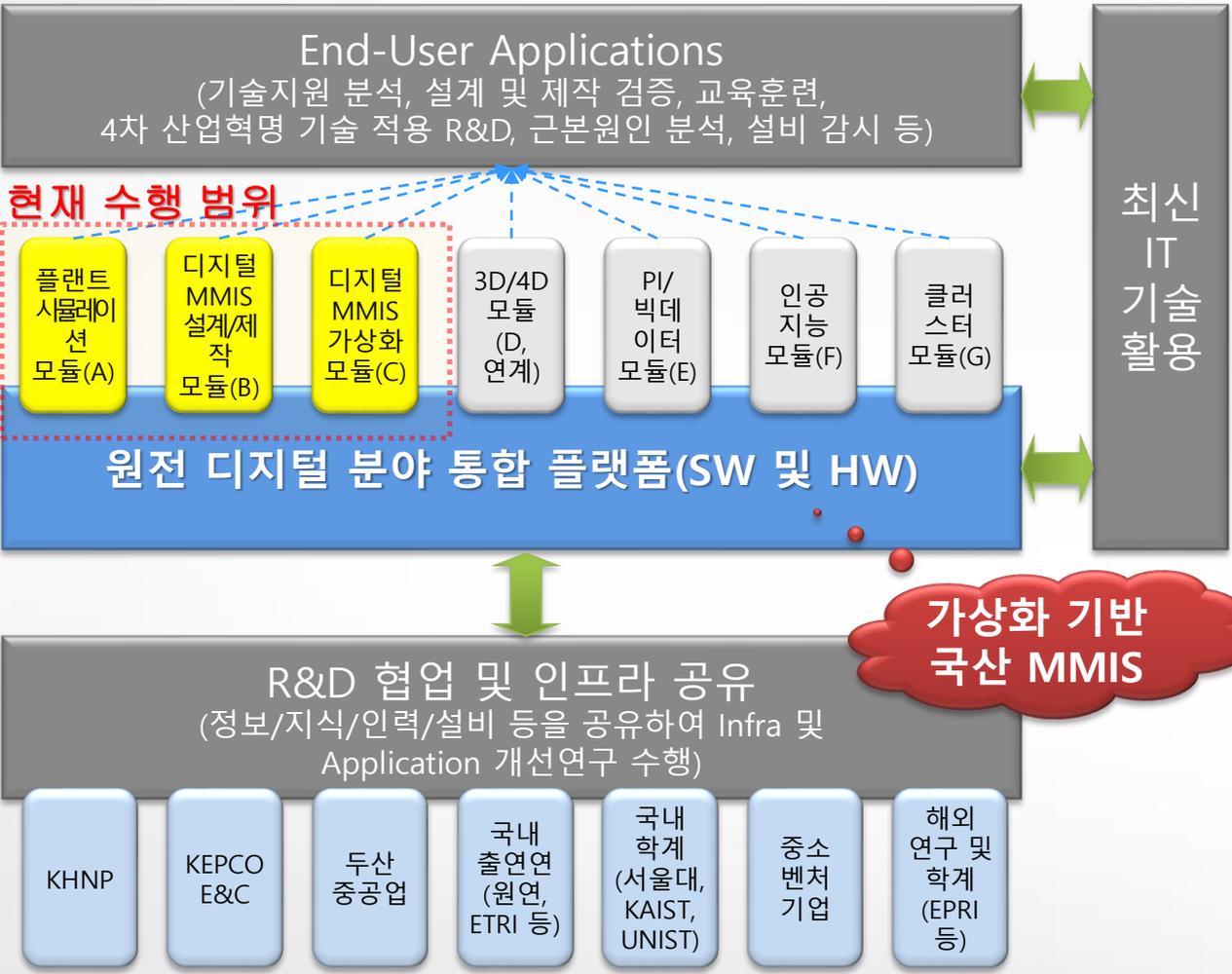
- 디지털 MMIS 분야 **개방형 R&D 설비**로 운영
- MMIS 트윈 기반 국내 계측제어 및 MMIS 분야 R&D 협업 체계 구축
- KHNP 주도로 효율적 중장기 디지털I&C R&D 로드맵 운영

3.3 신성장 동력 인프라 기능



3.3 신성장 동력 인프라 확대 운영

1. 디지털 기술 개발 플랫폼 구축 2. 개방형 연구설비 운영 3. 국산 MMIS 2.0 개발



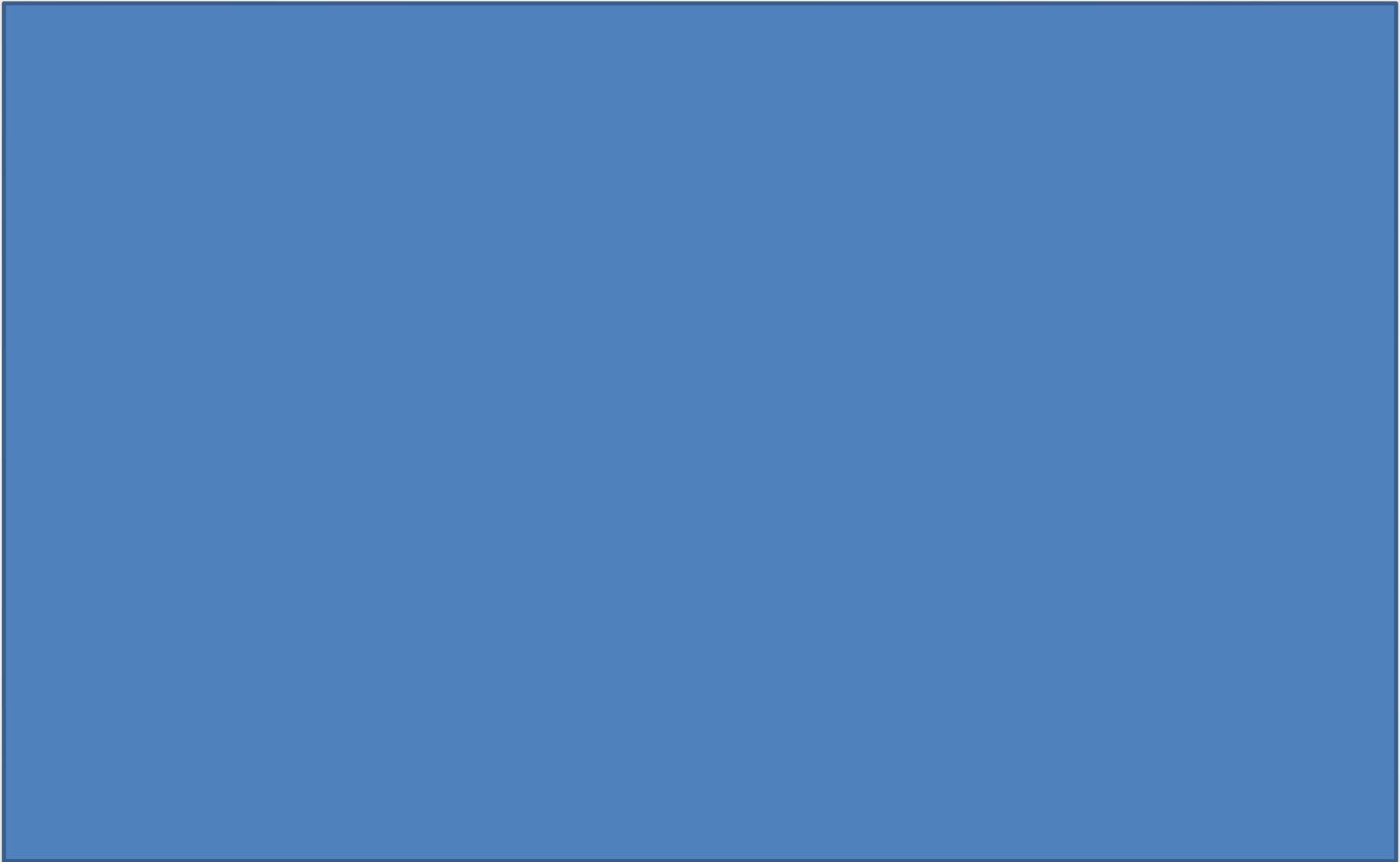
- ❖ 각 모듈별 고유 기능
- ❖ 복합기능
 - A+B: 발전소의 MMIS를 가상화하여 FSS 시뮬레이터와 연계 작동하여, 해당 MMIS 성능 분석 수행 및 운전/정비분야 교육훈련 강화
 - A+B+C: MMIS 개선 방안을 가상화 환경에 신속히 Prototype하여 설계 변경 또는 제작 전 사전 성능 검증
 - C+E: 가상화 MMIS에 PI 정보 또는 빅데이터를 입력하여 성능 분석
 - A+C+E: 현재 PI 정보를 FSS에 입력하고, 실제와 동등한 가상화 MMIS를 통해 향후 발전소 거동 예측

- ❖ 복합 조합이 가능하도록 디지털 플랫폼 제작 필요
 - 좋은 아이디어 → 빠른 구현으로 원전 디지털분야 기술경쟁력 업그레이드



참고자료

별첨 1. MMIS ESF-CCS Ch.A 구성도



CS : Confirm Switch
PPS : Plant Protection System
RMS : Radiation Monitoring System

STA : Safety Technical Advisor

DCN-MQ : Data Communication Network Multichannel Qualified
DCN-M1 : Data Communication Network Multichannel1
DCN-M2 : Data Communication Network Multichannel2

별첨 2. 운전원 훈련용 시뮬레이터(FSS)와 MMIS 디지털 트윈 비교



❖ FSS(Full Scope Simulator)

- 다양한 발전소 거동 시뮬레이션 및 실제와 동일한 주제어실 HMI 구현한 훈련용 설비

❖ MMIS 디지털 트윈

- 가상화 기술 기반으로 MMIS(제어기, 캐비닛, HMI등)을 발전소와 동등하게 구현한 설비로 FSS의 경량화(FSS에서 MMIS 부분(Control+HMI) 제거) 버전을 포함하고 있음

구분	훈련용 FSS(Full Scope Simulator)	MMIS 디지털 트윈
도면(Logic) 구현	FSS 개발도구 내에서 Control Sheet 1~2개에 로직도면 형태로 구현 	제조사 제어도면으로 재 개발 후 다수의 제어 캐비닛에 분할 배치 
PZR Pr. 제어 도면		
제어기 HW/SW	모의 (Control Sheet 작동 수준)	제어기 HW Emulation(임베디드 시스템 가상화), 제어기 SW는 동일 버전 구동
제어기 I/O 모듈	구현하지 않음 (공정 변수로 대체)	I/O 모듈 기능 모의 (제어기 관점에서 차이 없음)
제어기간 연결성	구현하지 않음	실제 발전소와 동등한 connectivity 구현
운전원 Interface	구현 (개발 방식에 따라 충실도 차이 존재)	실제 발전소 MMI SW 구동 (정보시스템 가상화)
정비원 Interface	구현하지 않음	3D/2D GUI로 개별 캐비닛 단위 구현 (동작상태 표시 및 조작 기능 포함)
Plant Model	노심, 열수력 해석코드 구동 단위 기기 동적 모델링 구현	FSS Plant Model 도입 → 노심, 열수력 해석코드 구동 단위 기기 동적 모델링 구현

친환경 에너지 기업



한국수력원자력주



Q&A

email : Sungjin.lee@khnp.co.kr

