

연구로 사업에서 인간공학 경험

2016. 10. 26



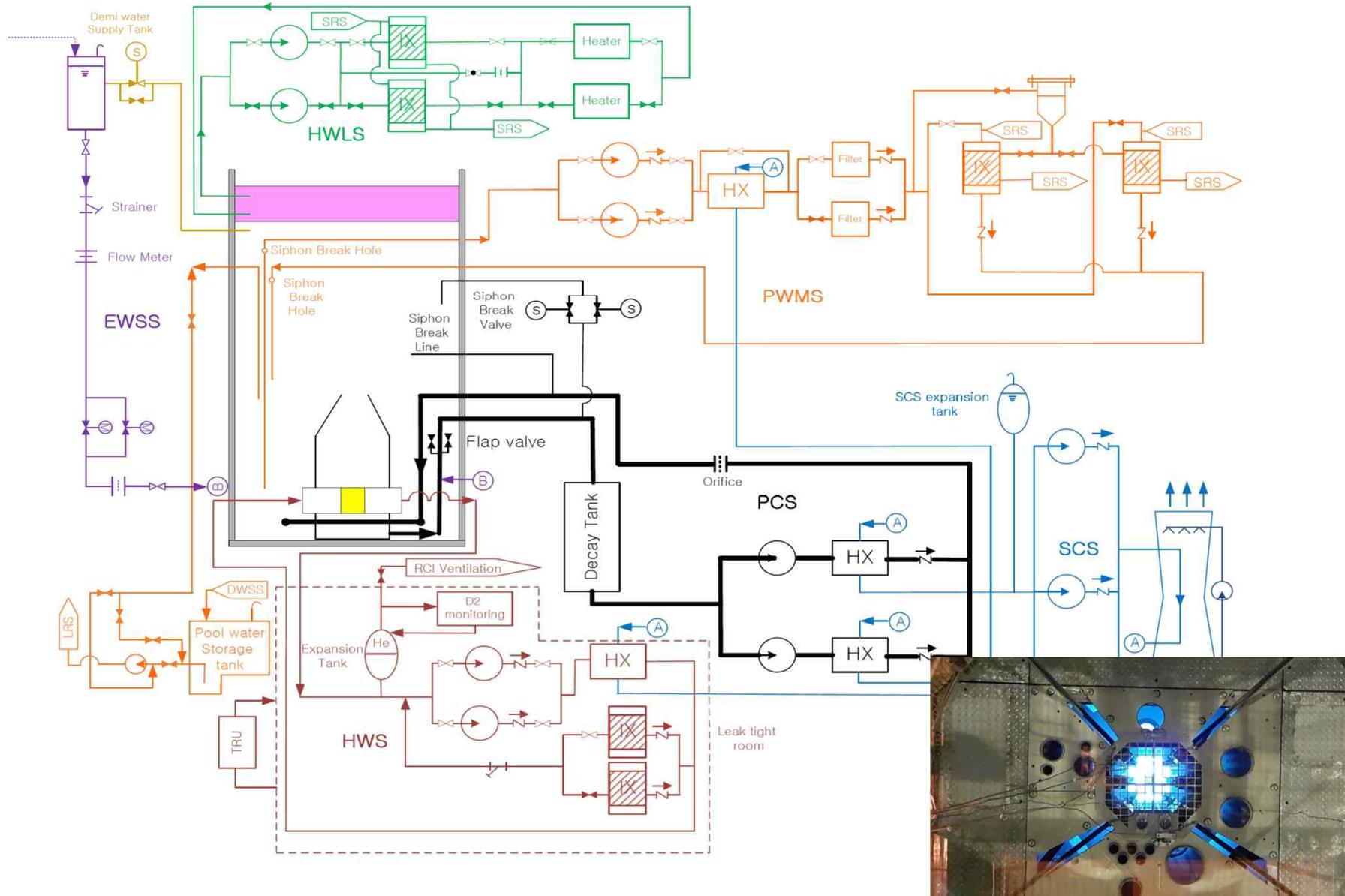
서 상 문
smsuh@kaeri.re.kr



Korea Atomic Energy
Research Institute

- ◆ 수동 제어 기능 할당 및 Crediting 사례
- ◆ 기기 설치 단계에서의 인간공학 결함사항 사례
- ◆ 시운전 단계에서의 인간공학 결함 사항 사례
- ◆ 결론

요르단 연구용원자로 개괄도



운전원 수동제어 할당 – Diverse Backup Function

- 소프트웨어 CCF에 따른 보호기능의 상실에 대비한 독립적이고 다양성을 갖춘 백업 시스템 요구 (BTP 7-19, Rev.6, 2010)

1.7 Diverse Backup Method

When an independent and diverse method is needed as a backup to an automated system used to accomplish a required safety function as a result of the D3 assessment identifying a potential CCF, the backup function can be accomplished via either an automated system, or manual operator actions performed from the MCR. The preferred independent and diverse backup method is generally an automated system.

- JRTR MMIS는 위에서 보는 것 처럼 규제기관이 선호하는 방식인 자동백업시스템으로써 APS를 설계
- 그러나 APS로 Large Break LOCA Accident에 대응하기 위해서는 추가적인 설계 변경 필요성이 확인
- 이에 대응하기 위한 차선의 방안으로 “운전원 수동조치” 대응 방안으로 선정

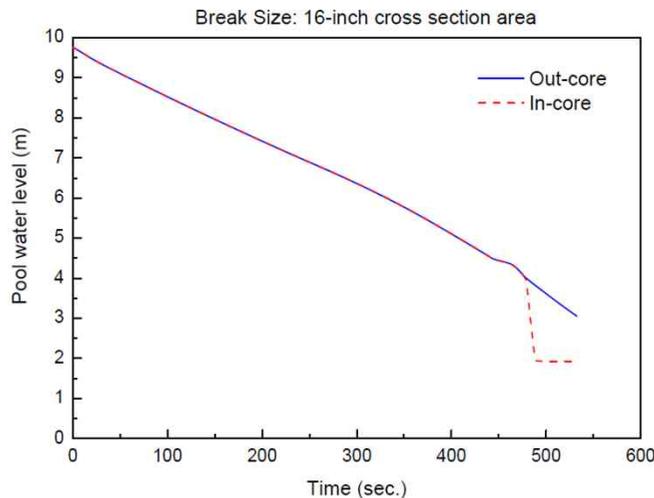
수동 제어기능 할당 및 Crediting 사례 (2)

운전원 수동제어 할당 - 허용시간

수조 높이 (m)	주요 경위	시간 (sec.)	비고
9.75	사고 발생	0	
9.5	SSR 낙하	19	RPS Pool Level, Lo-Lo (Rx Trip)
9.0		59	RPS Pool Level, Lo-Lo-Lo (SBVs Open)
8.0		146	
5.0		407	
4.0		480	
2.0	핵연료 상부	488	

8.5m 일 때 Process Pool Level, Lo-Lo-Lo-Lo
 => **Unique Alarm** for manual action 발생 (추정치 103초)

← 4.3m가 되는 시간
 추정치 458초



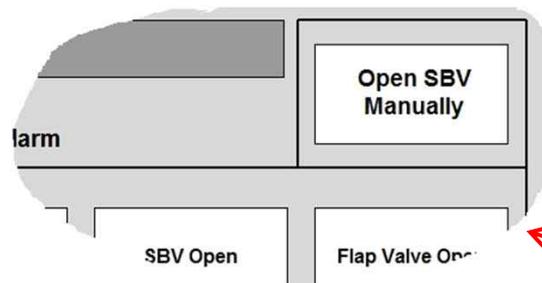
* 자연순환에 의한 핵연료 냉각이 형성되려면 약 4.3m의 수위가 확보되어야 함.

운전원 수동제어 할당 – 수동제어 내용

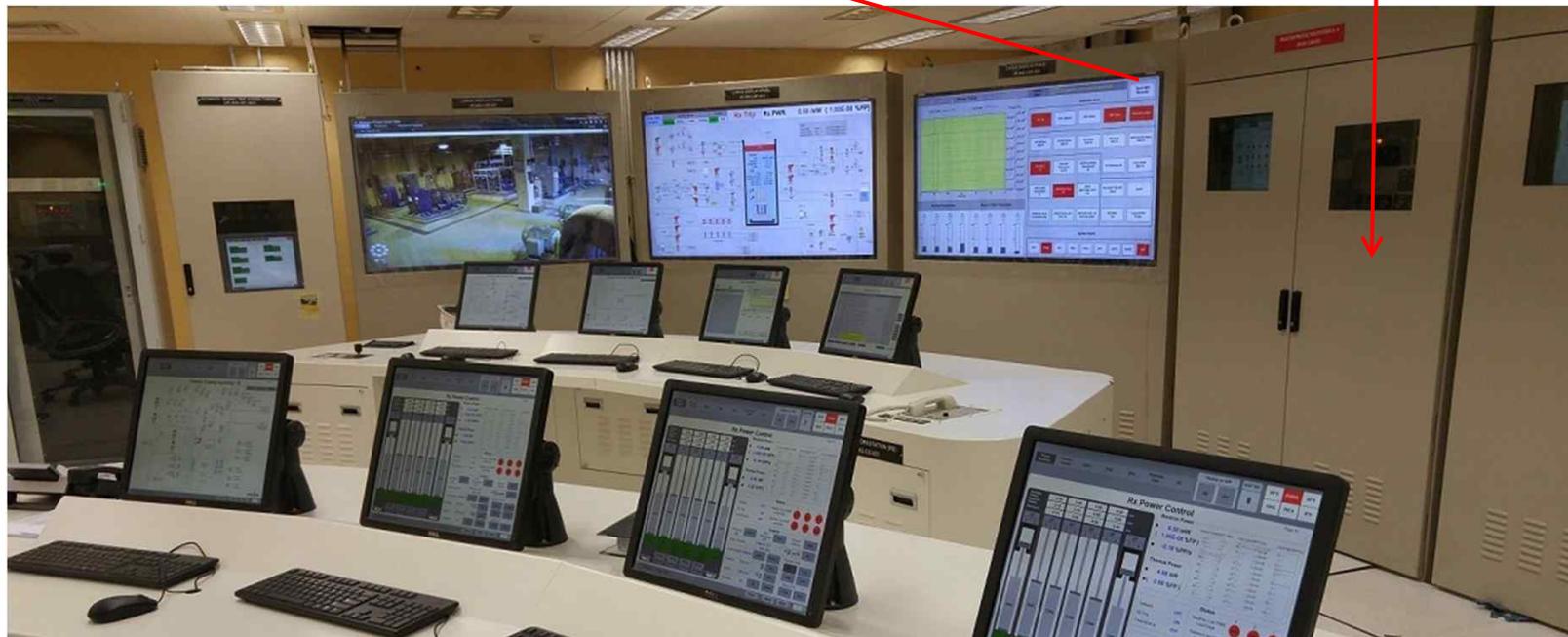
- JRTR MMIS D3 분석 중 LB-LOCA 사고에서 RPS CCF에 대응하는 운전원수동조치는 다음과 같음.
 - 진단: RPS CCF 발생 및 수동으로 “Reactor Trip” 과 “SBV(Siphon Break Valve) 개방” 이 요구됨을 확인
 - 조작: RPS 캐비닛으로 이동하여 수동으로 “Reactor Trip 스위치” 와 “SBV 개방 스위치” 조작
 - 평가: 원자로가 정지되고, 수조수 수위 감소가 멈추었는지 확인
- 위의 운전원수동조치는 시스템 설계가 허용하는 시간인 약 355초 이내에 신뢰성 있게 완료되어야 함.

수동 제어기능 할당 및 Crediting 사례 (4)

운전원 수동제어 할당 – HSI 설계내용



Siphon Break Valve 스위치
(Push-button type)



운전원 수동제어 할당 – 직무 속성

- 보호기능의 수행은 보통 정지변수의 지속적인 감시 요구와 사건 발생 시 조치의 신속성 및 정확성이 요구됨.
- “인간공학의 기능할당 원칙” 에서 보면 “인간” 에게 수동으로 감시 및 제어하게 하는 것 보다는 “기계” 에 자동으로 감시 및 제어하게 하는 것이 합당함.
- 이런 이유로 보호기능은 법에서 자동 감시 및 제어를 하도록 규정되어 있음.
- 결국 운전원수동조치를 대응방안으로 선택하는 것은 규제기관이 선호하는 방식이 아니므로, 규제의 강도는 매우 높아질 수 밖에 없음 – SRP 18장의 부록 A에 따라 분석 및 검증 결과를 제출 해야 함.

3.5 Use of Manual Action in Diverse Backup Safety Functions

If manual operator actions are used as backup to safety system functions, a suitable HFE analysis should be performed by the applicant/licensee to demonstrate that plant conditions can be maintained within recommended acceptance criteria for the particular anticipated operational occurrence or DBA. The acceptability of such actions is to be reviewed by the NRC staff in accordance with Appendix 18-A of SRP Chapter 18, "Crediting Manual Operator Actions in Diversity and Defense-in-Depth (D3) Analyses."

Crediting 요건 – SRP 18장, 부록 A

- 분석 및 검증은 다음과 같은 4개의 PHASE로 이루어져 있음.
 - PHASE 1: Analysis
 - PHASE 2: Preliminary Validation
 - PHASE 3: Integrated System Validation
 - PHASE 4: Maintaining Long-Term Integrity of Credited Manual Actions in The D3 Analysis
- 상기의 PHASE 4는 설계변경과 그에 따른 EOP 및 훈련내용의 변경 등과 같이 연구로 운영과정에서 예상되는 운전원 수동조치의 변경 관련 사항으로 항상 최신의 D3 Analysis 유지가 요구됨.

Crediting 요건 – 단계별 요건 및 수행 내역

- PHASE 1: Analysis 단계에서 요구되는 업무.
 - “Time Available” 분석 및 문서화
 - “Time Required” 분석 및 문서화 **ANSI/ANS 58.8 적용**
 - “Time Required” 분석 시 Bias 유발 요인 식별 및 평가, 문서화
 - 직무분석은 진단 및 적절한 조치의 선정 등과 같은 인지적인 요소를 반영해야 할 뿐만 아니라 수행시간 및 인적오류에 영향을 미치는 PSF(Performance Shaping factor) 등에 대한 내용도 포함 되어야 함.
- PHASE 2: Preliminary Validation 단계에서 요구되는 업무.
 - 검증의 Bias를 줄이기 위해 복수의 방법을 이용하여 PHASE 1에서 생산된 “Time Required” 에 대한 독립적 검증을 수행.
 - Tabletop analysis
 - Walkthrough/talkthrough analysis
 - Software models of human behavior, such as task network modeling
 - Use of control/display mockups
 - Man-in-the-loop prototype testing
 - Pilot testing
 - Real-time validation on a suitable⁴ part-task simulator

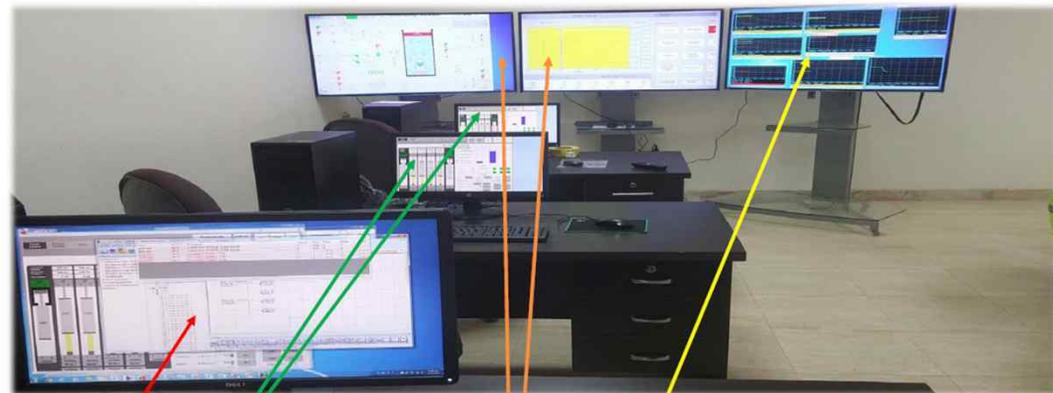
Crediting 요건 – 단계별 요건 및 수행 내역

- PHASE 3: Integrated System Validation 단계에서 요구되는 업무.
 - (ANSI/ANS 3.5 훈련용 시뮬레이터 요건 충족하는) ISV용 Test-bed 개발 → **실물 사용**
 - 피시험자로 실제 연구로를 운전할 요원으로 선정, 교육 → **JRTR 운전원**
 - CCF 상황을 잘 모의하는 Operational Conditions 개발 및 문서화
 - 수행완료 시간 측정 및 PHASE 1에서 분석된 “Time Available” 과의 비교 평가, 문서화



Crediting 요건 – 단계별 요건 및 수행 내역

- PHASE 4: Maintaining Long-Term Integrity of Credited Manual Actions in The D3 Analysis (교육 및 훈련용 시뮬레이터 개발 및 공급)
 - Normal Operation
 - Shutdown check, fluid system ON
 - Rx Startup, manual control, and approach to criticality
 - Power ascension, full power operation, and shutdown
 - Abnormality Handling during Operation
 - PCS pump failure
 - Loss of Electric Power
 - Loss of Coolant Accident
 - Loss of Heat-Sink
 - **RPS CMF + LOCA**



One Server: includes main program as well as OWS display

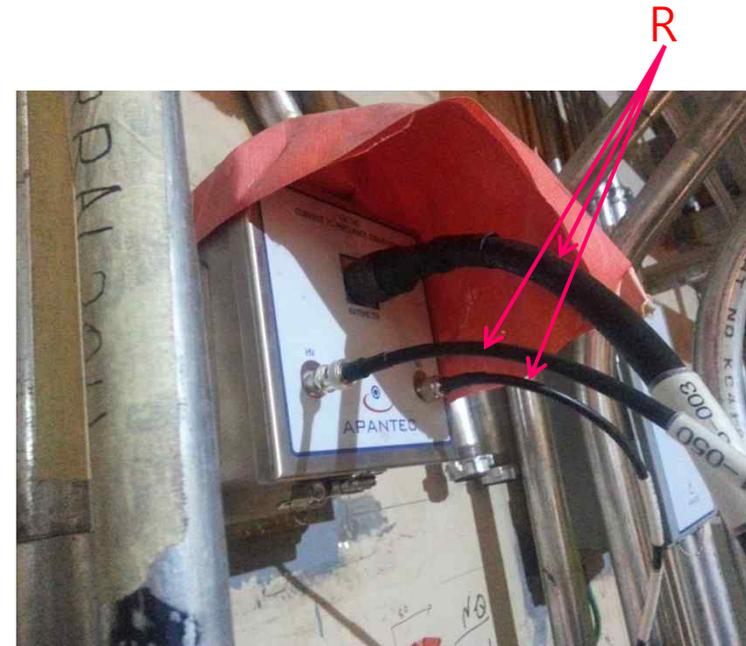
Two Clients: includes OWS display only

Two LDPs: displays mimics and tile alarms

Trends: displays (any) important process variables

기기 설치 단계에서 발견된 HED

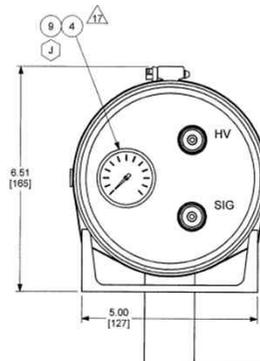
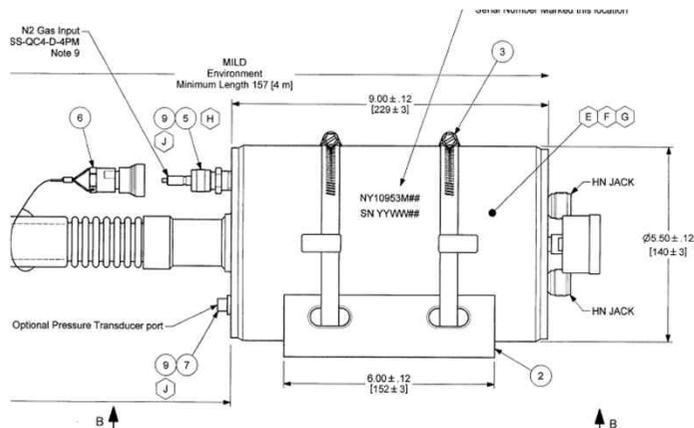
- PRMS¹⁾ 및 PGMS²⁾ 전치증폭기의 Cable Connector 위치
- 기기설계 단계에서 인간공학 검토 미흡
- 설치 주변 환경을 고려하여 기기 설계를 평가 필요 – A/E와 긴밀한 협조 필요
- 위치



1. PRMS: Pool Surface Radiation Monitoring System
2. PGMS: PCS Gamma Measurement System

기기 설치 단계에서 발견된 HED

- NMS¹⁾ Connection Box의 설치 위치
- A/E 의 기기 설치 도면 검토 시 인간공학 검토 미흡
- 설치 주변 환경을 고려하여 유지 보수 및 주기 점검 시 직무 수행 측면에서 검토 되어야 함.

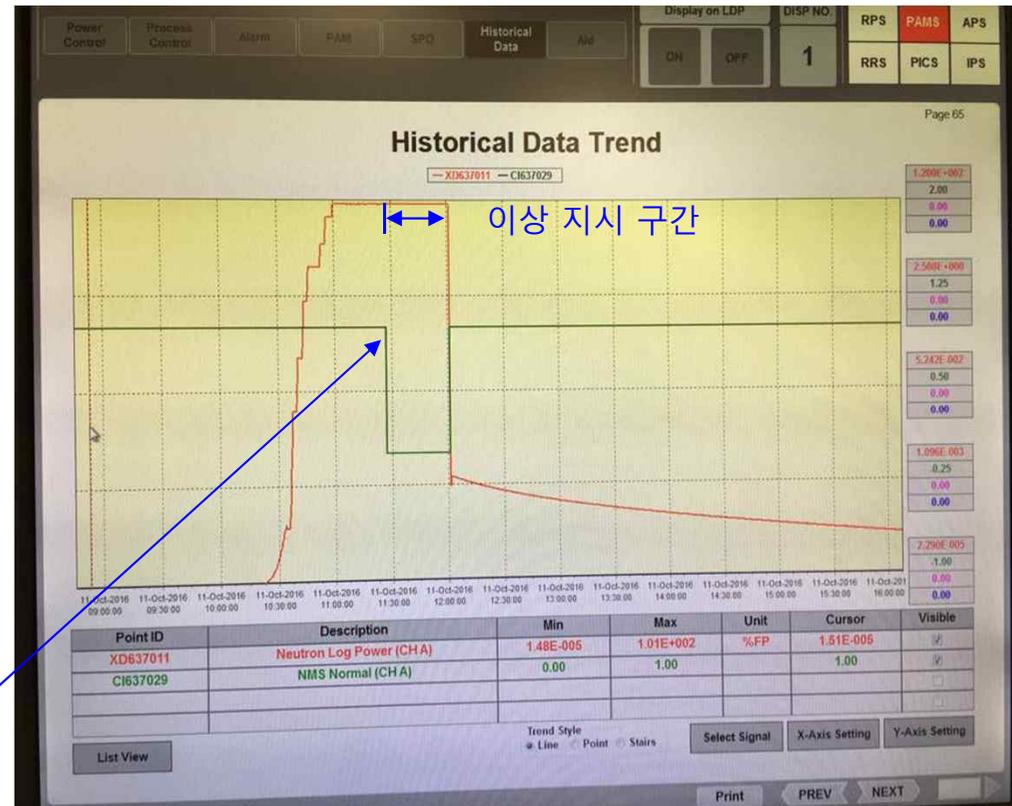


1. NMS: Neutron Measurement System

시운전단계에서 발견된 HED

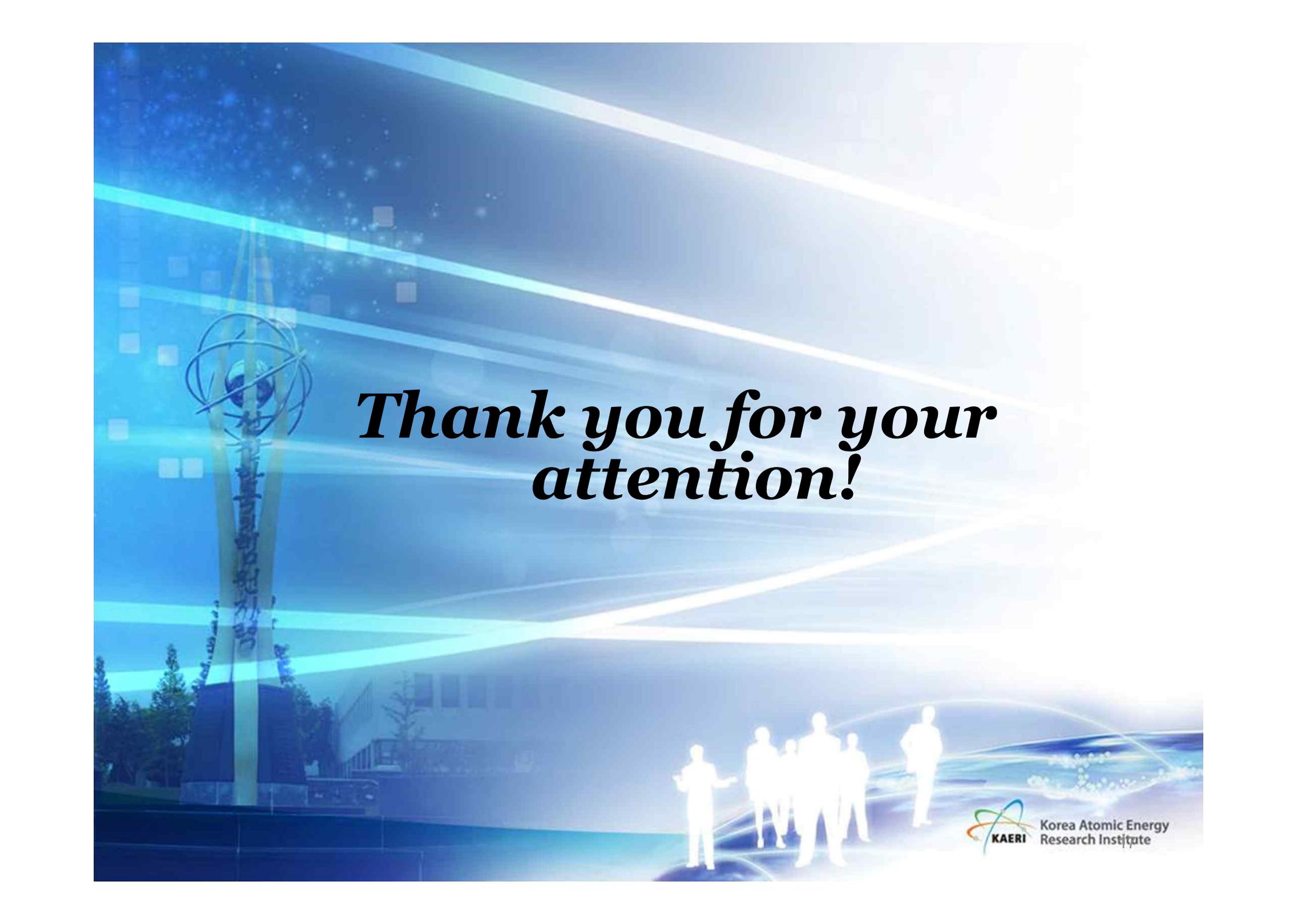
- LOEP¹⁾ 시험 시 원자로 출력제어계통용 중성자 계측기 지시값 이상 → RPS용 3채널, RRS용 3채널, 총 6개 중 1개 채널에서 이상신호 발생
- 출력제어계통 논리 중 일부 인간공학 결함
- 인간공학 검토자의 출력제어계통 설계 검토 미흡

LOEP 시험 (Class IV 전원 차단 시점)



1. LOEP: Loss of normal Electrical Power test

- 운전원 수동조치 Crediting
 - Diverse Backup 수단으로 수동제어를 택할 경우 Crediting에 드는 노력 및 비용이 자동제어설비(비안전등급 가능)를 개발 구축하는 것에 비해 장점이 없는 것으로 판단됨.
 - BTP 7-19, Rev.6 에서도 규제 입장에서 자동 백업 설비를 명시적으로 선호하고 있으므로 인허가 대응에도 유리할 것으로 생각됨. → 기능할당 원칙 측면에서도 매우 부합됨.
- 설치 단계에서 적절한 유지 보수 작업공간 확보 여부 파악 필요
 - 설치 전 기기 사이의 간섭 검토 - 3D 도면 또는 Location 도면 이용
 - 간섭 검토 시 유지 보수 작업 공간 확보 여부 상세 검토 필요
 - 기기 설계 도면 검토 시 - 유지보수 작업 측면, 동선 간섭 측면 상세검토 필요
- 시운전 단계에서 발생하는 인간공학 결함 사항
 - 지시, 표시 등에서 다수의 인간공학 결함 사항 발견
 - MMIS 계통 설계자 사이의 계통 설계 내용에 대한 소통 중요 → 기기 설계자의 구현 단계에서는 발견하기 어려움.



***Thank you for your
attention!***