



Doosan Heavy Industries & Construction

**설비개선을 통한 I&C 노후화 및 단종 이슈
해결 및 가동원전 안정적 운영 (사례 중심)
- 해체/단종/AI와 I&C의 대응 워크숍**

Chae-Ho Nam
October 23, 2019



KNS 2019 추계학술발표회 Workshop, ■ 일시: 2019년 10월 23일(수) 13:00 ~ 18:00

■ 주최: 한국원자력학회 원자력계측제어, 인간 공학 및 자동원격 연구부회, ■ 장소: 일산 INTEX 제2전시장 (4F) 406B

TABLE OF CONTENTS

I Introduction

II 가동원전 I&C 운영 및 설비개선 현황

III 한국표준형원전 제어봉제어설비 개선 사례

IV 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

V Conclusion and Future Work

I. Introduction

원전 안전운영을 위한 지속 가능한 성장, NuPIC과 함께!

“Digital I&C shows it can enhance safety, reliability and efficiency while addressing the issue of obsolescence of analog components,” says NEI Chief Nuclear Officer Bill Pitesa.

■ 탈 원전 정책하에서 ‘원전 안전운영을 위한 지속 가능한 성장’ 방안은?

- ✓ 원전 안전운영을 위해서는 국내 원자력 기술 및 공급망 유지 필수!
- ✓ 설비개선을 통한 I&C 노후화 및 단종 이슈 해결을 통한 원전 안전운영
- ✓ 지속적인 기술개발 투자를 통한 발전소 운영 이슈 해결
- ✓ 국내 원자력 산업계의 Strong Alliance를 통한 해외 시장 개척

II. 가동원전 I&C 운영 및 설비개선 현황

- 국내외 가동원전 보호계통 설비개선 잠재 시장

- 해외(미국) 가동원전 2nd License Renewal(이하 2nd LR) 이 진행되고 있으며 대상 발전소는 52개이며, 이중 대부분이 WEC형 발전소

Note) 1st LR: 40년 운영허가 받은 발전소를 60년 운영허가 갱신 받는 것. 2nd LR : 60년에서 80년으로 운영허가 재 갱신 받는 것

- 해외(필리핀) WEC형 원전 보호계통 개선

- Bataan #1 재개를 위한 필리핀 정부 요청 및 한수원 주관 타당성 조사 ('17.10)
- DI&C 적용 설계개선안 제출



[필리핀 차관(사진 좌측 아래) 외 에너지부와 재가동 방안 협의]



[Korea Team(한수원, 두산중, KPS) 필리핀 바탄원전 현장조사]

- 해외(브라질) WEC형 원전 보호계통 개선

- Angra #1 설계 수명만료(2024)
- 20년 수명연장(2044) 진행 중



브라질 광업에너지부 및 원자력공사 대상 설명회(' 18.05.09)

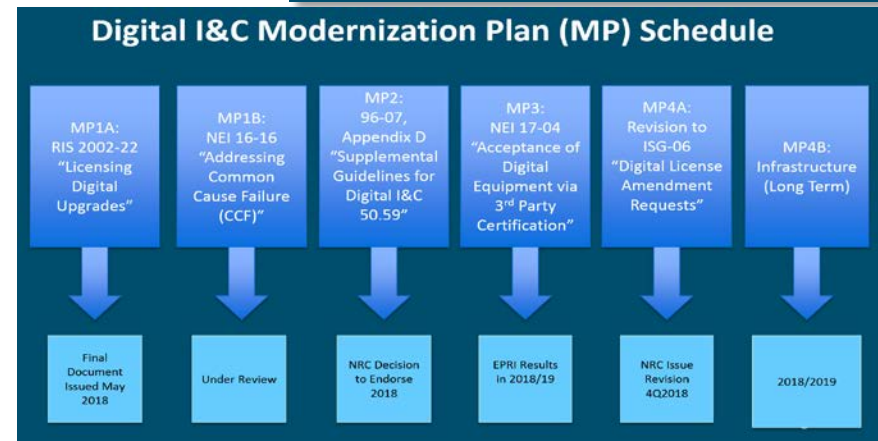
- 국내 WEC형 가동원전 보호계통 개선 (가동원전 계속운전 대비)

- 고리 2,3,4호기, 한빛 1,2호기

II. 가동원전 I&C 운영 및 설비개선 현황

- 해외 사례 NEI, NRC, EPRI opinion (설비개선 관련)

- 미국 내 가동원전 운영허가 2nd LR을 위한, I&C Modernization Plan을 수립하여 추진 중임. 특히, 본 과제에서 Target으로 한 보호계통에 대한 Upgrade를 고려하여 DI&C ISG-06 에 대한 개정을 진행 중임.



NEI Sponsored RIS Workshops

Date	Hosting Utility	Location	Classroom Capacity
August 15	TVA	Chattanooga, TN	50
August 21	Duke Energy	Asheboro, NC	30
August 23	Exelon	Oswego, NY (Luzerne Point)	35
August 28	Exelon	Kennett Square, PA	45
September 5	APS	Tonopah, AZ (PacifiCorp)	45
September 12	Duke Energy	Kings Mountain, NC	30
September 17	Duke Energy	Innsbrook, VA	50
October 10	Exelon	Warrenville, IL (Cantera)	30
October 22	Duke Energy	Kings Mountain, NC	30
October 30	Southern Nuclear Co.	Birmingham, AL	25
November 6	DTE Energy	Newport, MI (Fermi 2)	20

Workshops led by NEI and Industry Experts and NRC HQ, Site and Region staff

© 2018 Nuclear Energy Institute, Inc.

Planned DI&C Capital Improvements at Nuclear Power Plants

- Over 50 safety-related and non-safety-related system and component upgrades planned as a result of guidance in RIS 2002-22 Supplement 1 identified so far
 - Control room chiller controls
 - Emergency Diesel Generator controls
 - Control room indicators and recorders
 - Main Feedwater, Emergency Feedwater and turbine controls

Leading utilities in discussion to implement major digital upgrades to control room, Reactor Protection Systems and Engineered Safety Features Actuation Systems

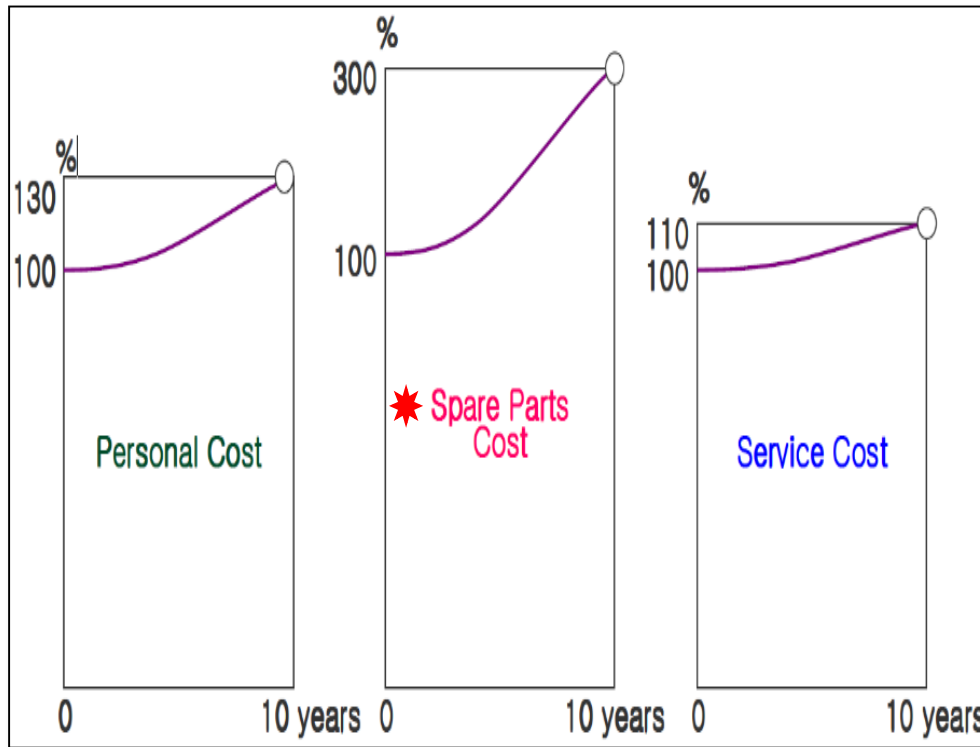
- Plans subject to revision of DI&C ISG-06 by 2018
- Second License Renewal providing opportunities for major capital investments

© 2018 Nuclear Energy Institute, Inc.

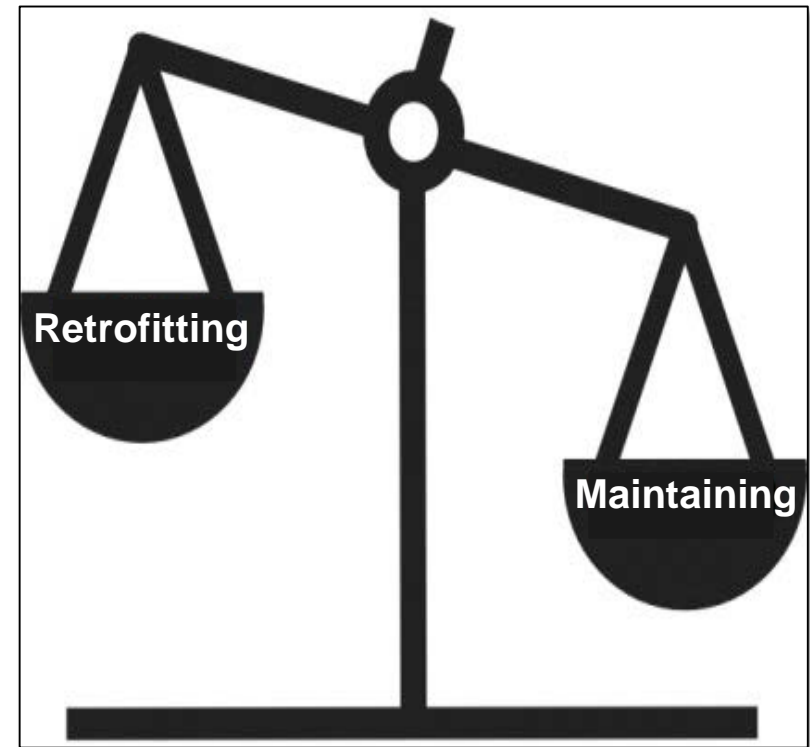
II. 가동원전 I&C 운영 및 설비개선 현황

- 해외 사례 NEI, NRC, EPRI opinion (설비개선 관련)

■ To reduce the operational costs for LTO



Cost Increase over 10 years with Analog Equipment (EPRI)



Cost Comparison

II. 가동원전 I&C 운영 및 설비개선 현황

- 해외 사례 NEI, NRC, EPRI opinion (설비개선 관련)

■ NRC Moves to Boost Nuclear Plant Digital Upgrades



<https://www.nei.org/news/2018/nrc-boost-nuclear-plant-digital-upgrades>

■ NEI

“If we **can’t innovate**, we **can’t continue to operate**,” says NEI Chief Nuclear Officer Bill Pitesa.

“**Digital I&C** shows it **can enhance safety, reliability and efficiency** while addressing the issue of obsolescence of analog components,” Pitesa said.

III. 한국표준형원전 제어봉제어설비 개선 사례

- 표준원전 제어봉제어설비 발전정지 유발요소 제거

■ SPVs are continuously being removed to enhance the reliability of NPP

◆ *SSPS have still more than 80 SPVs*

Good Practice - Zero SPV CEDMCS

◆ *After analyzing SPV of CEDMCS, finding 297 SPVs.*

◆ *Finally, CEDMCS renovated to '0' SPV Systems*

- *Step 1 : Identify – Define the single point vulnerability*
- *Step 2 : Evaluate – Scrutinize all items*
- *Step 3 : Design : Eliminate or mitigate SPVs.*
- *Step 4 : Test – Verify & Validation of all items*

◆ *Enhance the Maintain & Test Ability*

- *On-line replacement of PCM or Electronic Cards*



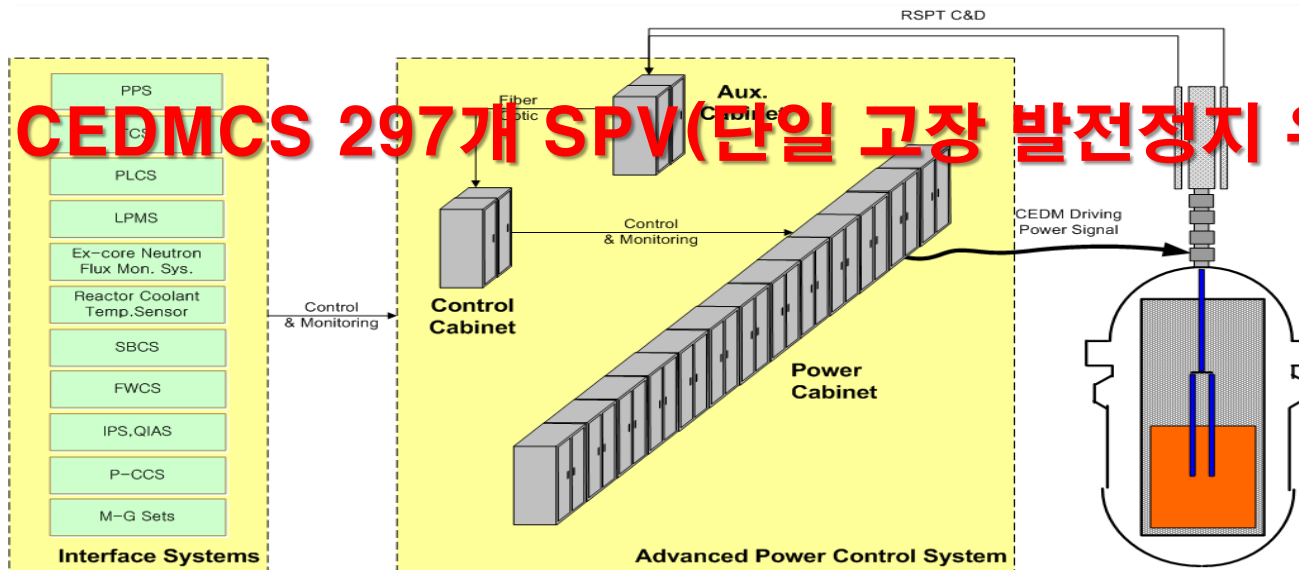
- *Test by CRCS(3-Coil Type) & CEDMCS(4-Coil Type) MMI*

III. 한국표준형원전 제어봉제어설비 개선 사례

- 표준원전 제어봉제어설비 발전정지 유발요소 제거

■ KRN, Hanul, Hanbit CRCS : Retrofit operating NPP

- CRCS is designed for driving 3-coil type CRDM in a nuclear power plant. The CRCS controls the rod motion by driving CRDM in response to signals from the MCR and the RCS (Reactor Control System).
- CEDMCS is designed for driving 4-coil type CEDM in a nuclear power plant. The CEDMCS controls the rod motion (withdrawal or insertion or hold) by driving CEDM in response to signals from the MCR (Main Control Room) and the RRS (Reactor Regulation System).
- Kori#3,4 CRCS and Shinwolsong#1,2&Shinkori#1,2 CEDMCS projects will be expected to contract on 2015.



III. 한국표준형원전 제어봉제어설비 개선 사례

- 표준원전 제어봉제어설비 발전정지 유발요소 제거

■ Outstanding Point of CRCS/CEDMCS

◆ Doosan analysis SPV & design to '0' SPV

- Step 1 : Identify – Define the single point vulnerability
- Step 2 : Evaluate – Scrutinize all items
- Step 3 : Design : Eliminate or mitigate SPVs.
- Step 4 : Test – Verify & Validation of all items

◆ Enhance the Maintain & Test Ability

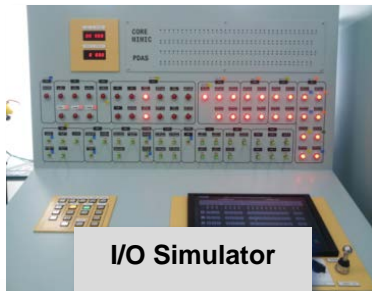
- On-line replacement of PCM or Electronic Cards



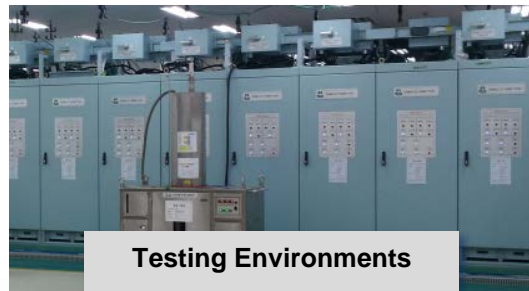
- Test by CRCS(3-Coil Type) & CEDMCS(4-Coil Type) MMI

◆ Enhance the Reliability

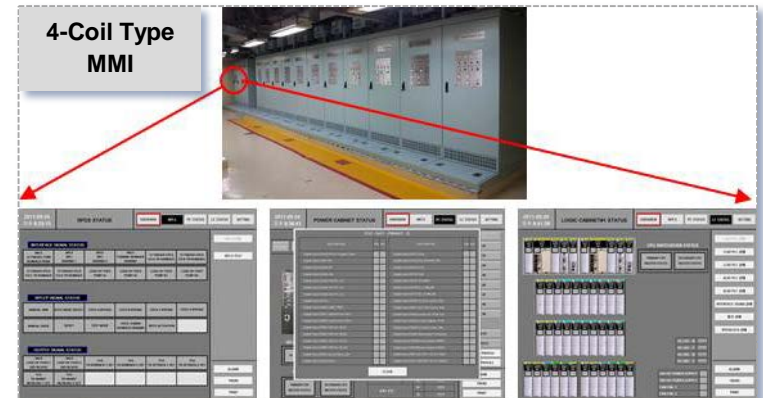
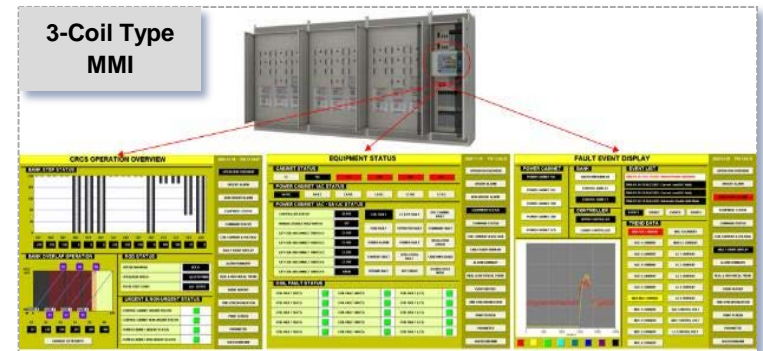
- All test(IST, ST, FAT, SAT) use the Mock up, R-L Load and I/O Simulator



I/O Simulator



Testing Environments



Testing & Start-up Operation

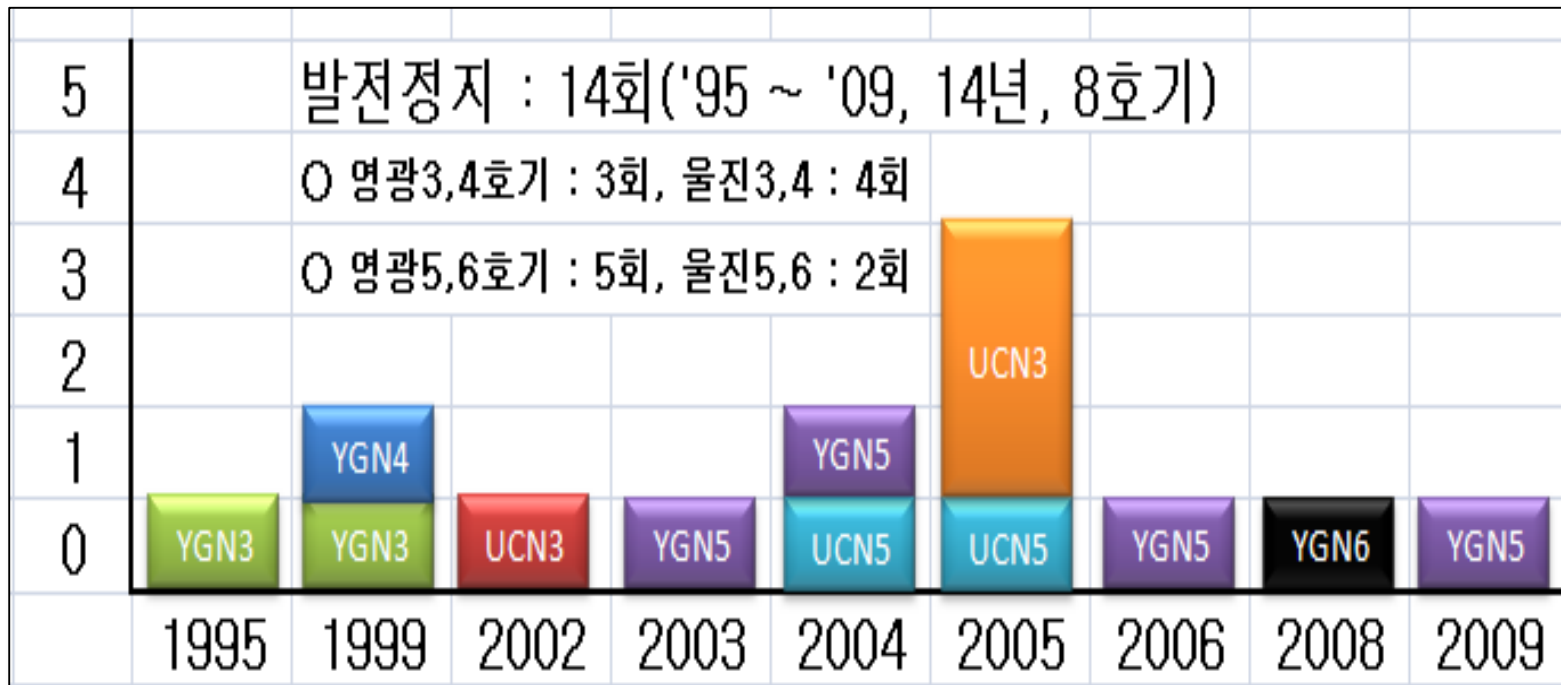
III. 한국표준형원전 제어봉제어설비 개선 사례

- 표준원전 제어봉제어설비 발전정지 유발요소 제거

한빛 3~6호기, 한울 3~6호기 '95년 7월 ~ '09년 12월 기간 중 제어봉 제어계통 고장에 의한 발전정지 14 건 발생

2011년~2015년 국산화 설비로 교체 후 원전정지 0 건

- ✓ 아날로그 회로 위주의 단일화 설계로 단일부품 고장시 원자로정지 유발 가능
 - 발전정지 유발기기 다수포함(1,040개/2호기, 계측설비 SPV의 69~80% 차지)



III. 한국표준형원전 제어봉제어설비 개선 사례

- 표준원전 제어봉제어설비 설비개선 후 발전정지 Zero !

신고리1,2, 신월성 1,2 제어봉제어계통
고장에 따른 원전 불시 정지
✓ 2012년 8월 신월성 1호기
✓ 2012년 10월 신고리1호기
✓ 2013년 4월 신월성 1호기
제어봉제어계통 고장에 따른 출력 감소
✓ 2016년 1월 신월성 2호기 출력 20%

Reference) <http://m.hani.co.kr/arti/economy/marketing/913054.html>

상업운전
✓ 신고리1호기: 2011년 2월 28일
✓ 신고리2호기: 2012년 7월 20일
✓ 신월성1호기: 2012년 7월 31일
✓ 신월성2호기: 2015년 7월 24일

Reference: <http://nsic.nssc.go.kr>

발전손실 금액

(원전 정산단가x 발전손실량)

> 설비 개선 비용 보다 큼

국산화 설비 교체 진행 중

IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- 강화되는 규제에 선제적 대응

■ CCF Requirements are continuously being increased to make sure safety & reliability of NPP

- ✓ As the Regulatory body requires the Safety analysis of CCF under LBLOCA
- ✓ DPS design change requested to add the function of PPS.

2016 원자력안전규제 정보회의

규제 경험 2 : 신고리5,6호기 CCF 분석

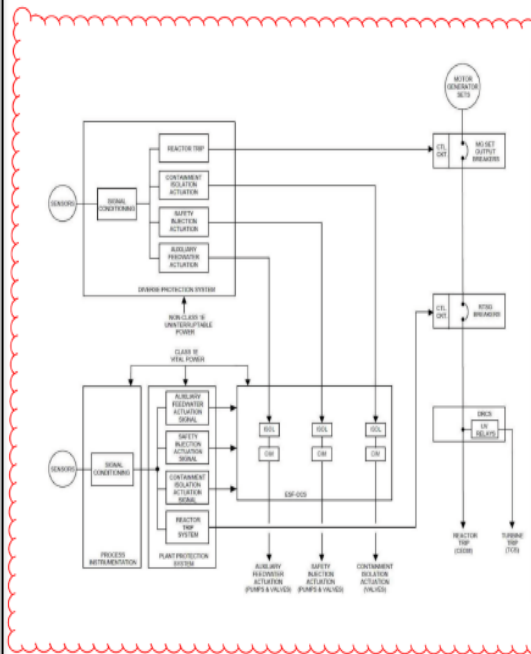
□ 신고리 5,6호기 보호계통 CCF + LBLOCA 초기 분석

- LBLOCA 고려한 보호계통 CCF 분석(정상적 및 정량적)
 - 사고 후 약 300초에 냉각수 재고량이 고갈 → 노심손상 발생
 - 소외선량 평가결과, (10CFR100.11의) 허용 기준치를 초과

□ 분석 결과에 따른 DPS 설계 변경 (선행호기 대비)

- (냉각수 재고량 고갈 방지) DPS에 안전주입작동 기능 기능 추가
 - 가압기 저압력 센서 추가
 - 가압기 압력이 설정치 이하 시, SIAS 신호를 발생 (to CIM)
 - 가압기 압력 운전우회 (가압기 압력 < 400psia 시 수동 개시)
- (소외선량 기준치 만족) DPS에 원자로건물 격리작동 기능 추가
 - 가압기 압력이 설정치 이하 시, (74개 원자로건물 격리밸브 중) 선정된 23개 밸브의 닫힘 신호 발생
 - 제한구역경계에서의 2시간 및 저인구지대에서의 30일동안 감상선량 1.154mSv 및 726mSv, 전신선량 7.26mSv 및 1.75mSv

□ 심사결과를 반영한 신고리 5,6호기 DPS 설계

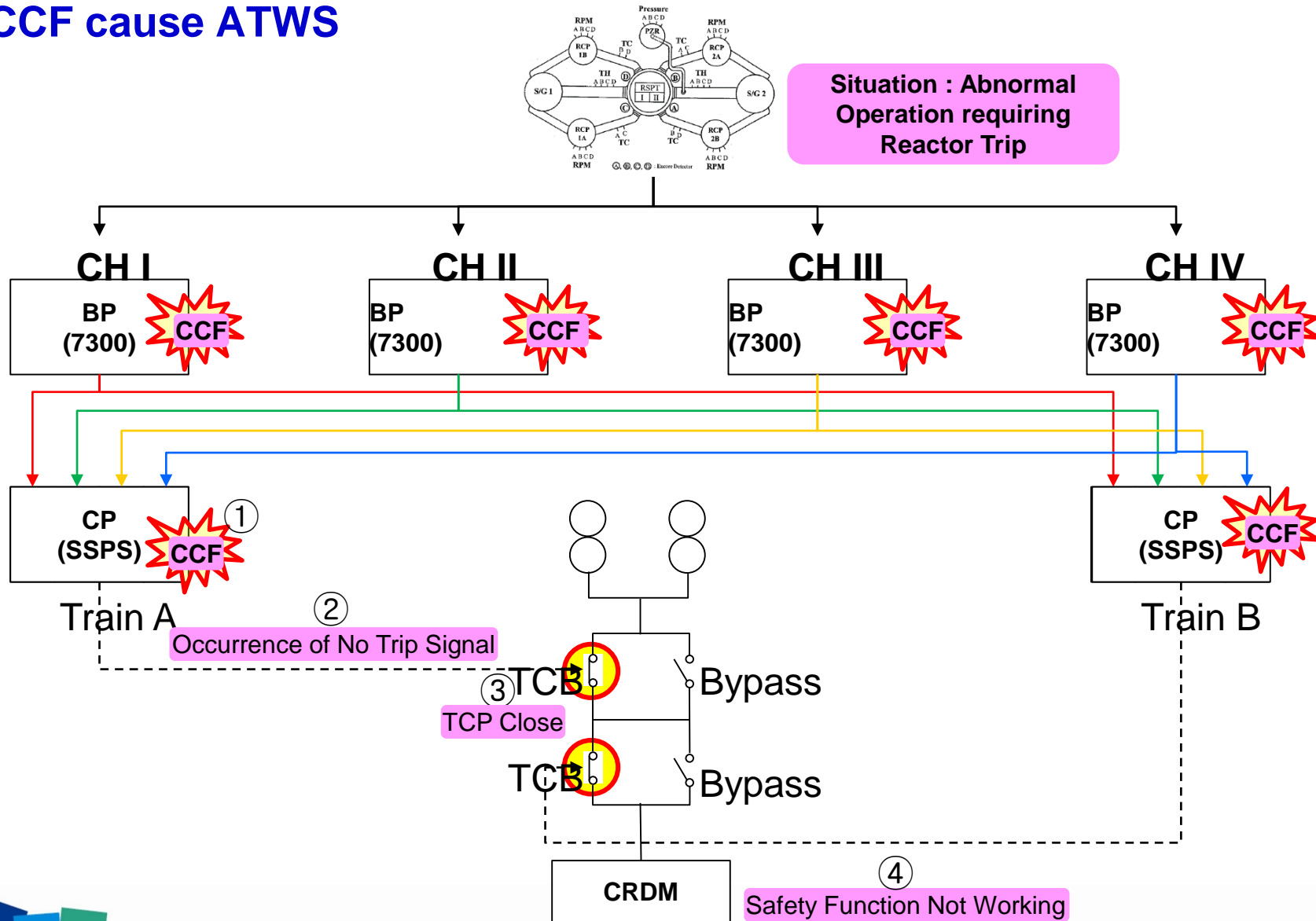


보호계통 출력	다양성 출력
원자로정지	✓ 가압기 고압력 CNMT 고압력
CIAS	✓ 가압기 저압력
SIAS	✓ 가압기 저압력
CSAS	
MSIS	
AFAS	✓ S/G 저수위
FHEVAS	
CPIAS	✓ CIAS 연계
CREVAS	✓ (TBD)

IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- 아날로그 보호계통의 CCF에 의한 취약 구조

■ CCF cause ATWS



IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- 아날로그 보호계통의 단일고장에 의한 취약점

SPV (Single Point Vulnerability) :

A components whose failure will directly cause **unwanted reactor trip** or Turbine Trip in NPP. SPVs are continuously being removed to enhance the reliability of NPP. But, SSPS have still more than 80 SPVs.

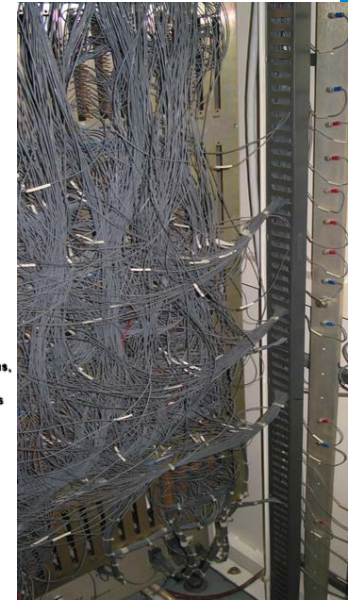
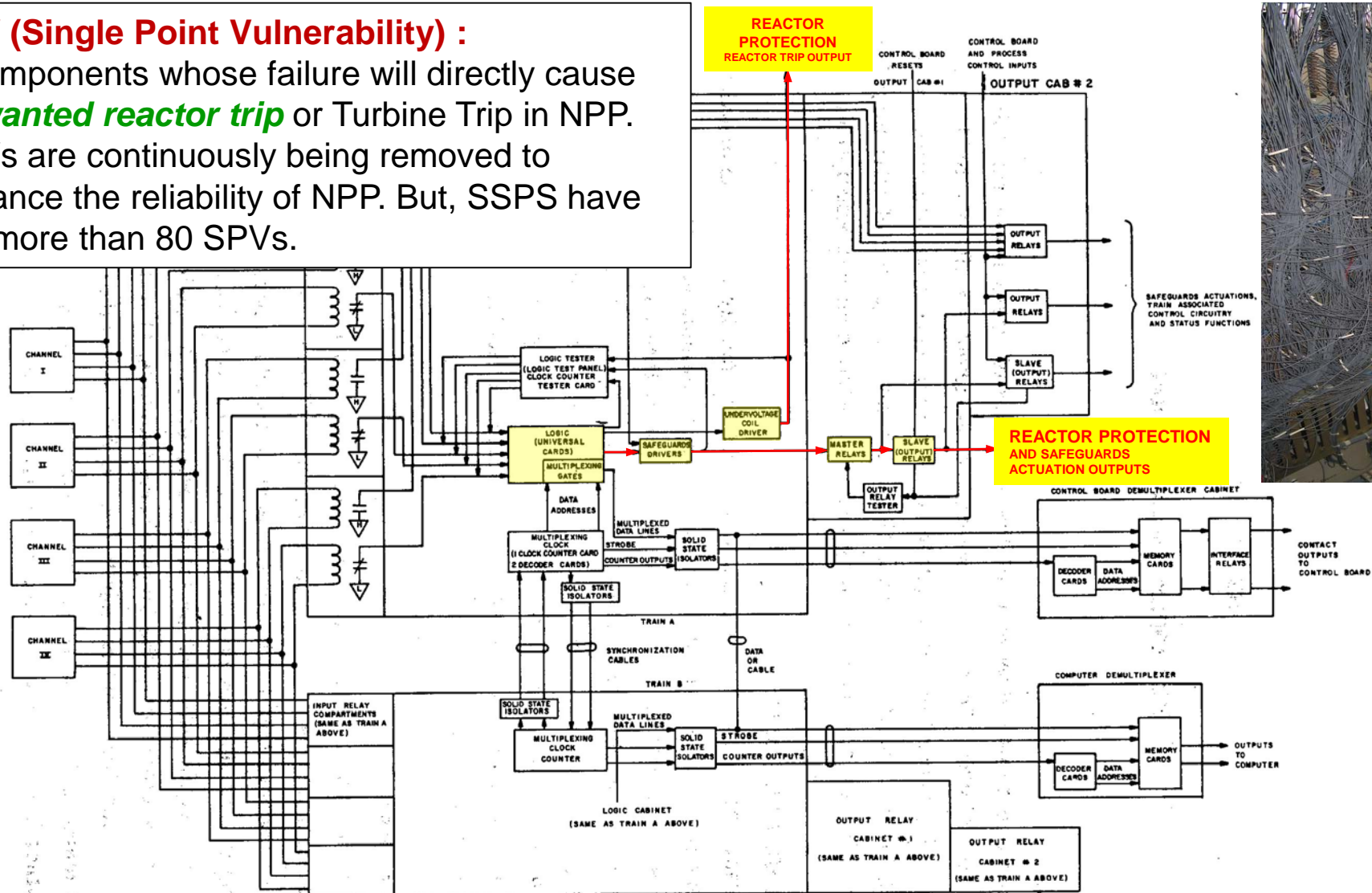


Figure 2-1. SSPS Block Diagram

IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- 아날로그 보호계통의 Surveillance Test의 어려움

■ Surveillance Test for Analog Protection System

1) 7300 Bistable Logic Test

2) SSPS Input Relay Test

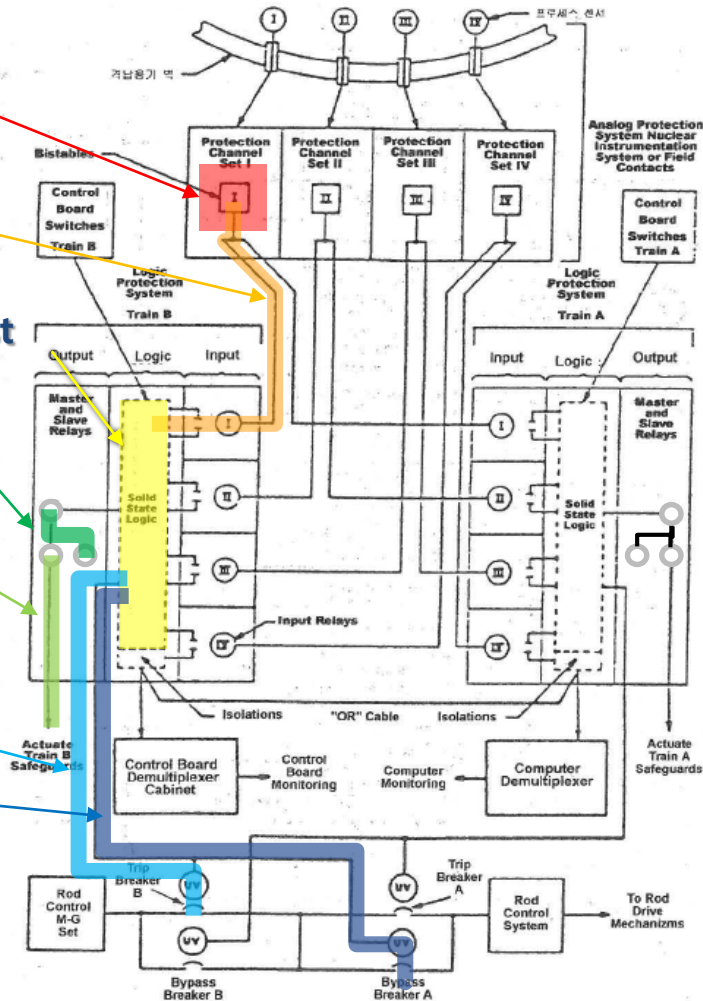
3) SSPS Coincidence Logic Test (semiautomatic test panel)

4) Master/Slave Relay Test

5) ESFAS Signal Test (Safeguard Test Cabinet)

6) RTB Test

7) Bypass Test



Difficult

✓ It should be split into several tests for full test coverage

Limited

✓ It is impossible to test entire Protection System in

Time-consuming

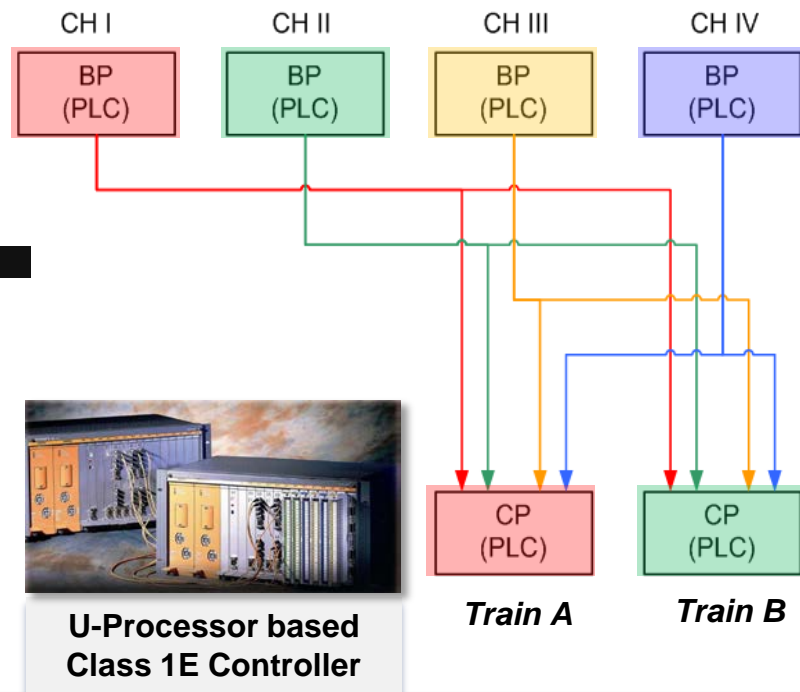
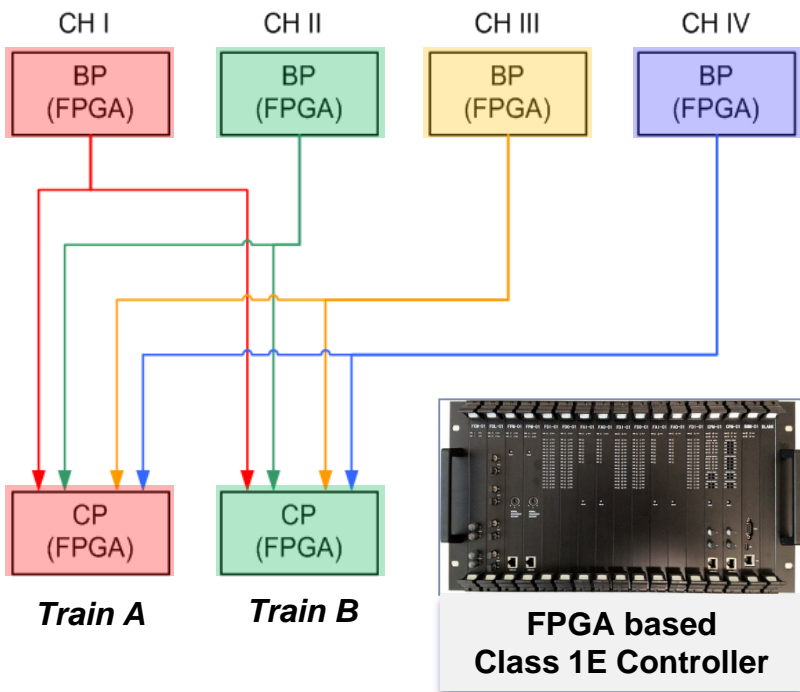
✓ Test of Analog Protection System is complicated and needs much time

IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- Digital Protection System against CCF & SPV

■ Different Platform of PPS will resolve the CCF Issues without DPS

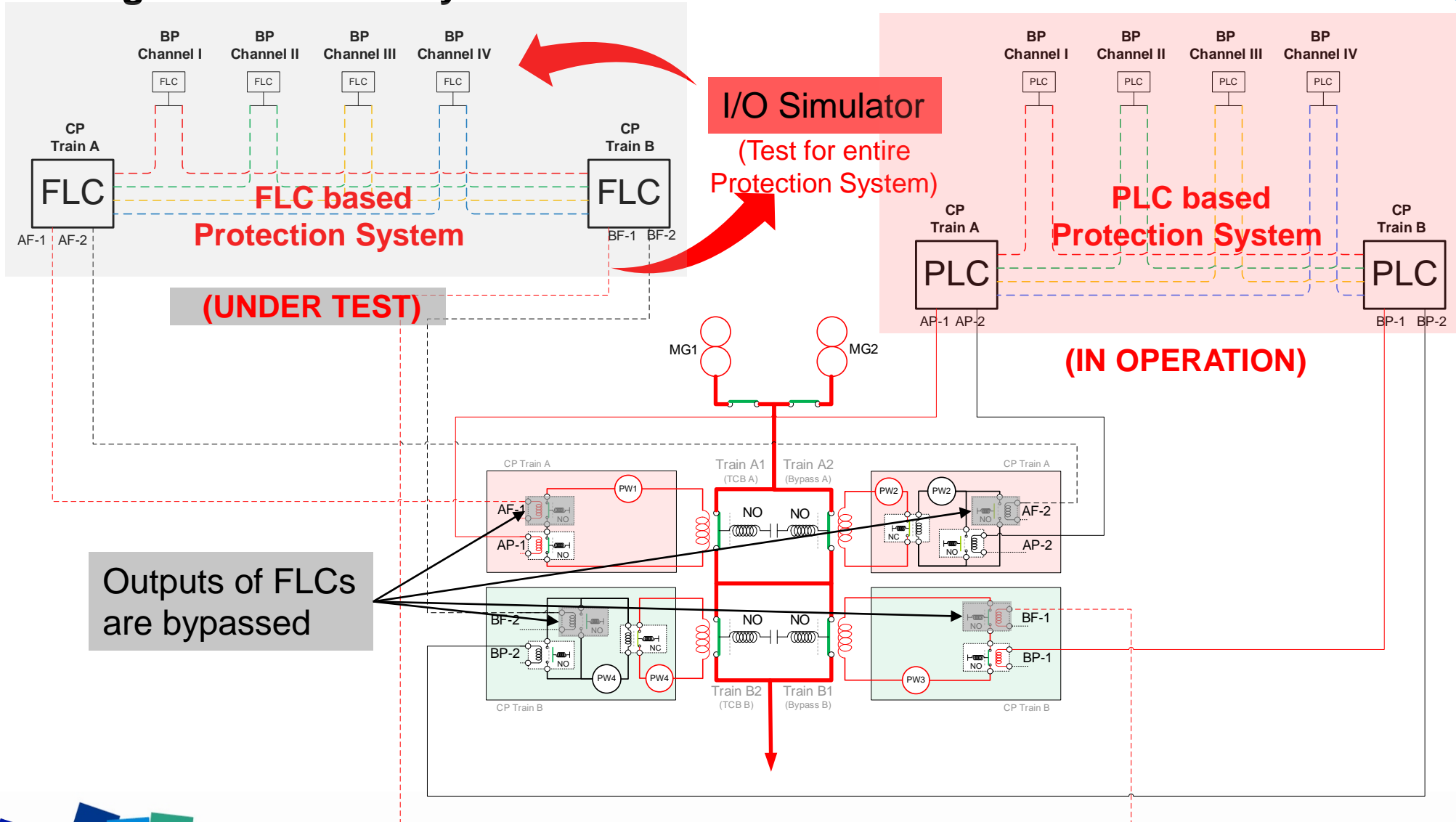
- ✓ *As is – Class 1E Protection System and Non-Class 1E DPS*
- ✓ *To be – Class 1E independent Protection System using different platform*
- ✓ *Independent protection scheme designs using different controller platforms can mitigate ATWS by CCF*



IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- Digital Protection System against CCF & SPV

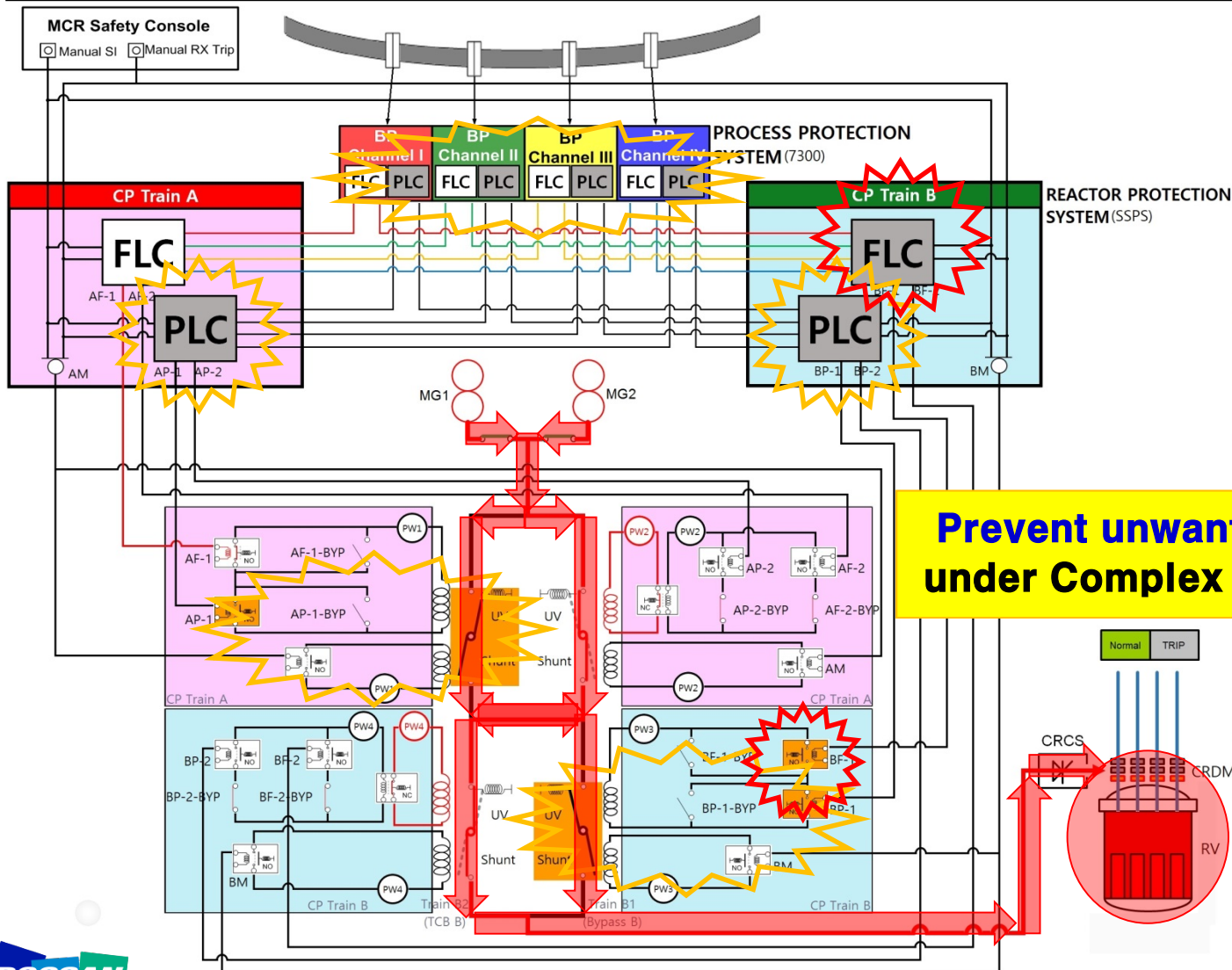
■ Digital Protection System for Surveillance Test



IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- Digital Protection System against CCF & SPV

➤ Even if complex failures occur, the unwanted reactor trip is prevented



ALARM			ESFAS
OT ΔT RCT TRIP	PRZ HI PRESS RCT TRIP	PWR RANGE HI FLUX RATE RCT TRIP	SIS
OP ΔT RCT TRIP	PRZ LO PRESS & P-7 RCT TRIP	RCS FLOW LO AT HI PWR RCT TRIP	CIS-A
CTMT PRESS HI SI RCT TRIP	SOURCE RANGE HI FLUX RCT TRIP	RCS FLOW LO AT LO PWR RCT TRIP	CIS-B
MANUAL RCT TRIP	INTMD RANGE HI FLUX RCT TRIP	SG 1,2,3 WTR LEVEL LO-LO RCT TRIP	CSS
MANUAL SI RCT TRIP	PWR RANGE HI FLUX HI SETPT RCT TRIP	TBN TRIP & P-7 RCT TRIP	FWIS
PRZ HI LEVEL RCT TRIP	PWR RANGE HI FLUX LO SETPT RCT TRIP	MSL PRESS LOW SI RCT TRIP	MSIS

CONTROL		PERMISSIVE	
C-7 of Load Interlock	C-8 Tripped Interlock	P-4 Reactor Trip Permissive	P-11 Low Pressurizer Pressure SI Block Permissive
C-3 OT ΔT Rod Stop and Turbine Runback Interlock	C-9 Condenser Available Interlock	P-6 Source Range Block Permissive	P-12 High Steam Flow SI Block Permissive
C-4 OP ΔT Rod Stop and Turbine Runback Interlock	C-11 Control Bank D Rod Withdrawal Limit Interlock	P-7 At-Power Permissive	P-13 Turbine At-Power Permissive
C-5 Low Power Interlock	C-16 Turbine Stop Loading Interlock	P-8 Three Loop Flow Permissive	P-14 Steam Generator High Level Override
		P-10 Nuclear At-Power Permissive	

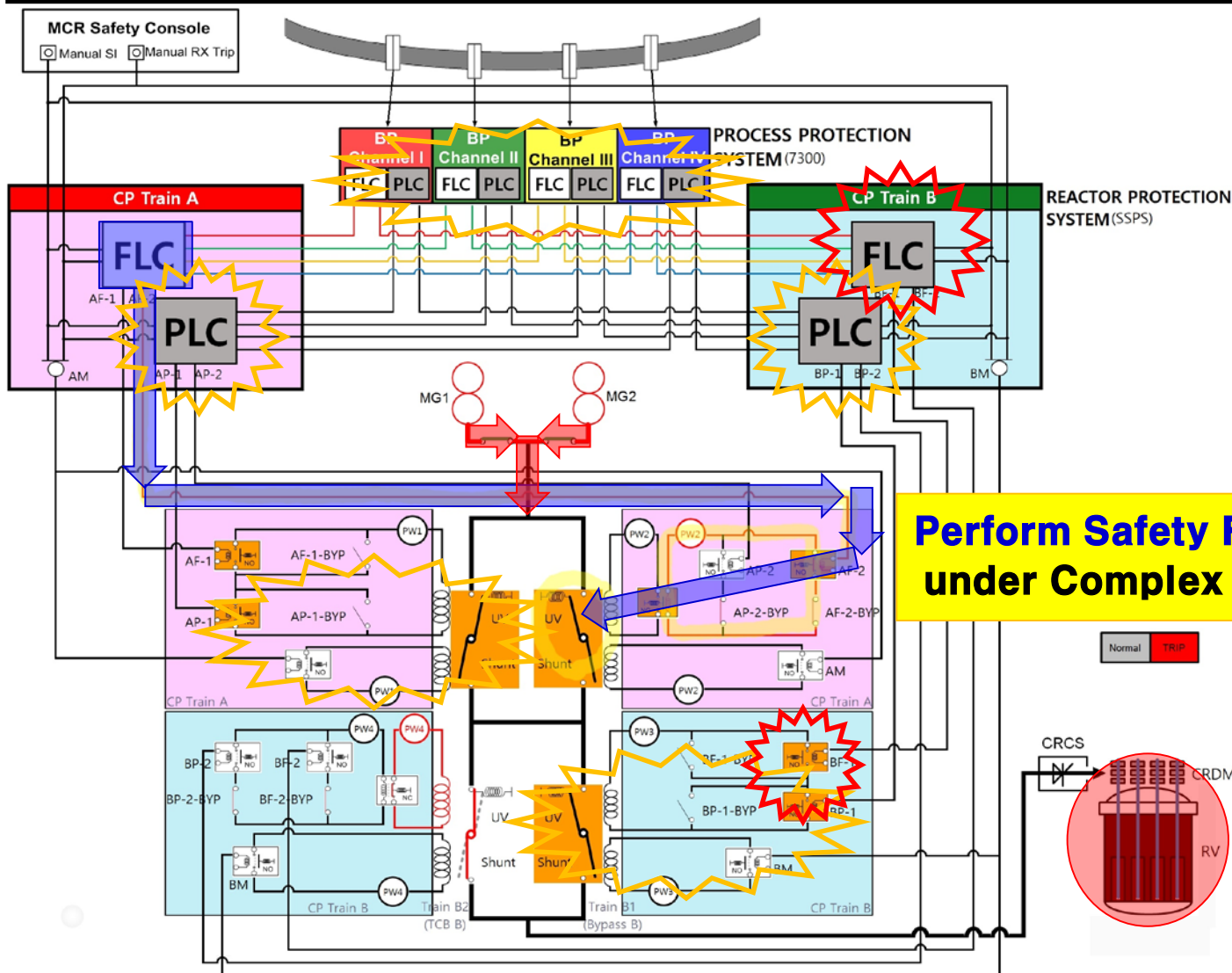
No photography of this exhibition
 Due to conservation and copyright restrictions.

Designed by DOOSAN Nuclear I&C Since 2016/11/3
 Patent No KR10-2016-0145468, US15/646611, CN201710532503.7,
 PH11-2017-000342 and BR10-2017-026123-9

IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- Digital Protection System against CCF & SPV

➤ Even if complex failures occur, the safety function is performed



ALARM			ESFAS
OT ΔT RCT TRIP	PRZ HI PRESS RCT TRIP	PWR RANGE HI FLUX RATE RCT TRIP	SIS
OP ΔT RCT TRIP	PRZ LO PRESS & P-7 RCT TRIP	RCS FLOW LO AT HI PWR RCT TRIP	CIS-A
CTMT PRESS HI SI RCT TRIP	SOURCE RANGE HI FLUX RCT TRIP	RCS FLOW LO AT LO PWR RCT TRIP	CIS-B
MANUAL RCT TRIP	INTMD RANGE HI FLUX RCT TRIP	SG 1,2,3 WTR LEVEL LO-LO RCT TRIP	CSS
MANUAL SI RCT TRIP	PWR RANGE HI FLUX HI SETPT RCT TRIP	TBN TRIP & P-7 RCT TRIP	FWIS
PRZ HI LEVEL RCT TRIP	PWR RANGE HI FLUX LO SETPT RCT TRIP	MSL PRESS LOW SI RCT TRIP	MSIS

CONTROL		PERMISSIVE	
C-7 Load Interlock	C-8 Tripped Interlock	P-4 Reactor Trip Permissive	P-11 Low Pressurizer Pressure SI Block Permissive
C-3 OT ΔT Rod Stop and Turbine Runback Interlock	C-9 Condenser Available Interlock	P-6 Source Range Block Permissive	P-12 High Steam Flow SI Block Permissive
C-4 OP ΔT Rod Stop and Turbine Runback Interlock	C-11 Control Bank D Rod Withdrawal Limit Interlock	P-7 At-Power Permissive	P-13 Turbine At-Power Permissive
C-5 Low Power Interlock	C-16 Turbine Stop Loading Interlock	P-8 Three Loop Flow Permissive	P-14 Steam Generator High Level Override
		P-10 Nuclear At-Power Permissive	

No photography of this exhibition
Due to conservation and copyright restrictions.

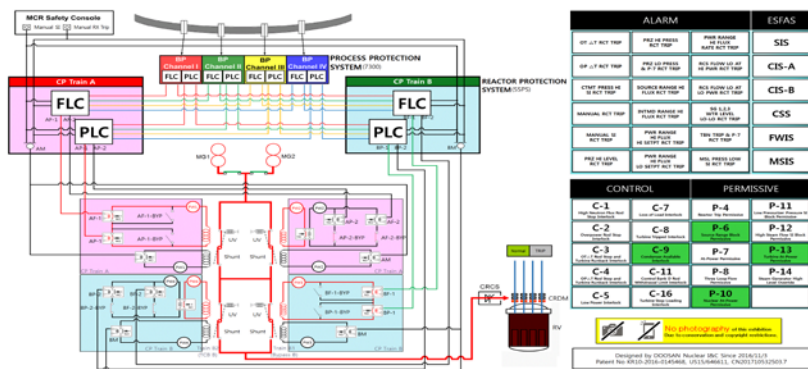
Designed by DOOSAN Nuclear I&C Since 2016/11/3
Patent No KR10-2016-0145468, US15/646611, CN201710532503.7,
PH11-2017-000342 and BR10-2017-026123-9

- 발전소 시뮬레이터를 활용한 운전이력 기반 구축

malfunction scenarios.
Ex) Pressurize crack



Network



MIMIC Display



I/O Interface Panel



Digital Protection System

IV. 아날로그 보호계통의 디지털화 기술개발 현황

- 차별화 기술개발로 수출 경쟁력 강화

Properties	Analog Protection System	Digital Protection System
Safety	- Old Regulatory Requirements	- Latest Regulatory Requirements - CCF eliminated Design
Reliability	- Single Failure can cause Reactor Trip	- Zero SPV
Maintenance Test	- Split-by-area Test	- Full scope on-line test at once
Self-Diagnosis Function	- N/A (Difficulties in proactive actions)	- On-line Diagnostics - Proactive Actions for Failed Devices
Accuracy	- Limited	- Improved Accuracy (Enhances Operational Margin)
Algorithm	- Hard to fix	- Flexible
Information Indication	- Limited	- Various Information (process variables, diagnostic information)
Spare Parts Supply	- Discontinued Spare Parts, High Cost	- Immediate Purchase with Reasonable Cost

원전 안전운영을 위한 지속 가능한 성장, NuPIC과 함께!

■ 국내 원자력 산업계의 Strong Alliance를 통한 해외 시장 개척

WEC 형 디지털 보호계통 해외 시장 개척을 위한 한수원/두산 공동 미국 PWROG(PWR 사용자 그룹) 참석 발표



“If we **can’t innovate**, we **can’t continue to operate**,” says **NEI** Chief Nuclear Officer Bill Pitesa.

V. Conclusion & Future Work

WEC형 디지털 보호계통 인허가 및 운전이력확보 주요 추진 계획 및 실적

✓ 인허가 및 운전이력확보를 통한 해외 수출 경쟁력 강화

디지털 보호계통 추진 일정 개발 내용		1차년도 (‘19.05~‘20.01)												2차년도 (‘20.02~12)												3차년도 (‘21.01~12)												4차년도 (‘22.01~04)			
		5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4				
보호 계통 설계 인허가	인허가 기준 검토																																								
	System Requirement Specification																																								
	TeR ¹ , S/W 계획단계문서																																								
	특정기술주제보고서																																								
	TR ² 신청 및 서류적합 획득																																								
보호 계통 운전 이력 확보	발전소 시뮬레이터 구축																																								
	시제품 인터페이스 모듈 구축 및 S/W 설계																																								
	시뮬레이터 인터페이스 S/W 구현 및 모듈 통합																																								
	시뮬레이터를 이용한 검 증설비 연계 시험																																								
	시뮬레이터 이용 설계기 준사고등 운전이력 기록																																								
	시뮬레이터를 이용한 검 증 결과 최종 보고서 작성																																								
	최종보고서 작성																																								

1. TeR : Technical Evaluation Report,
2. TR : Topical Report

V. Conclusion & Future Work

원전 안전운영을 위한 지속 가능한 성장, NuPIC과 함께!

감사합니다



남 채호 부장
원자력I&C기술팀
두산중공업㈜

Email : chaeho.nam@doosan.com

Phone : 82-31-270-7031

Cell : 82-10-4848-5683



Prototype of Digital Protection System and Nuclear Simulator



10th International Workshop on the Application of FPGAs in NPPs (2017.12, Gyeongju Korea, host: Doosan)



Doosan Heavy Industries & Construction