

인공지능 기반 기동 및 정지 운전지원 기술개발

운전원 인적 오류 저감을 위한 운전절차기반 기동정지 자동화시스템 개발

...

2022. 10. 19.

한국원자력연구원
자율운전연구실
김 정 택

CONTENTS



01 4차 산업혁명과 원자력

02 연구개발 필요성

03 연구개발 목표

04 연구개발 진행현황 및 성과

05 연구개발 성과 : 운전원 시연

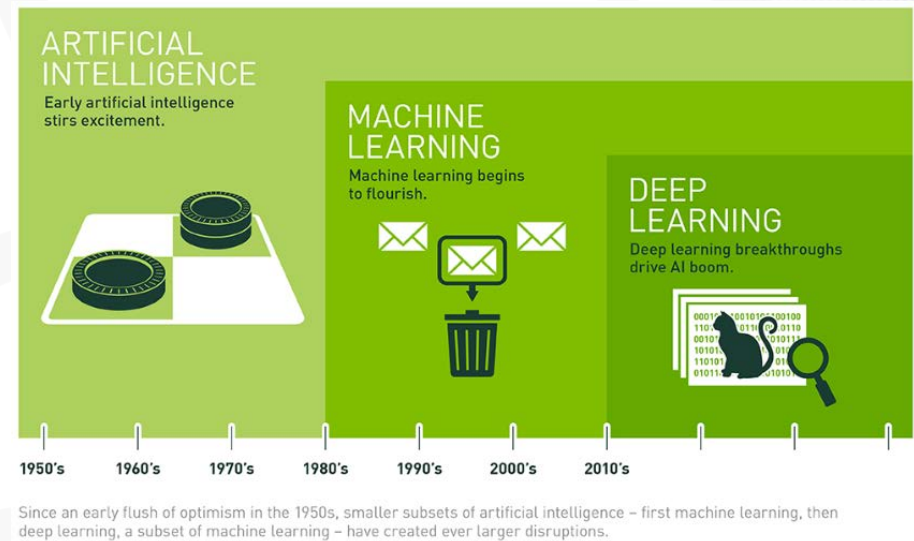
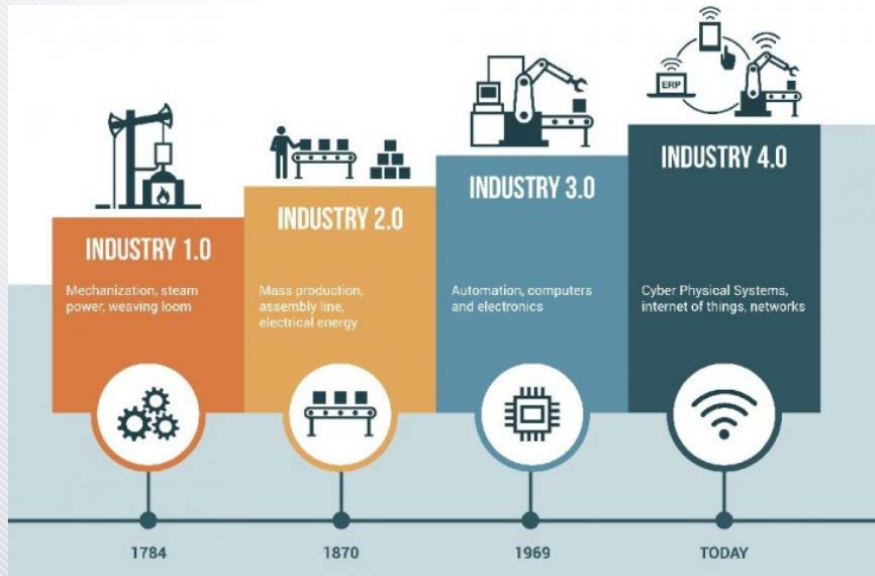
06 향후 계획

01 4차 산업혁명과 원자력

01 4차 산업혁명과 원자력

» 4차 산업혁명과 AI 기반의 새로운 시대

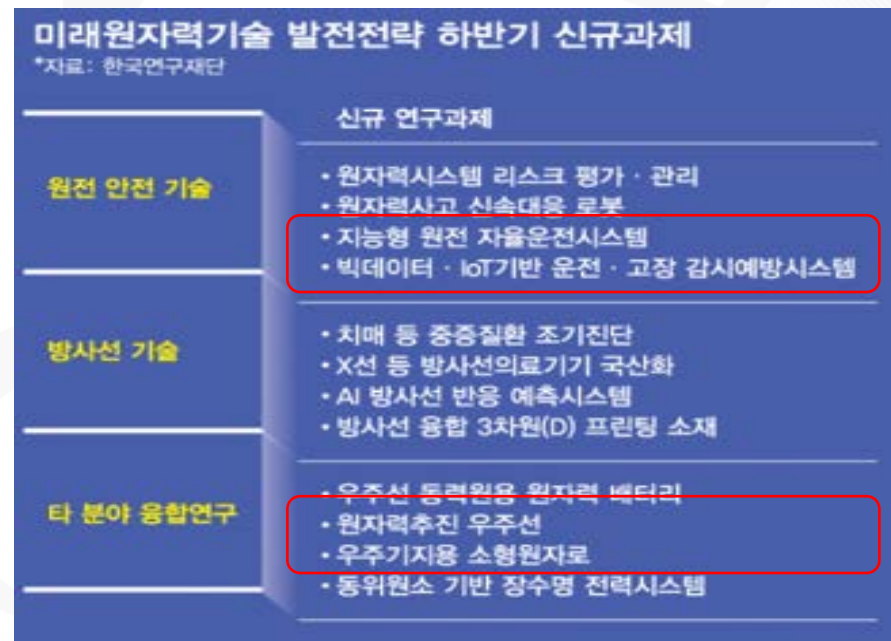
- 4차 산업혁명은 2016년 세계 경제 포럼에서 주창된 정보통신(ICT) 기술의 융합으로 이루어진 혁명 시대를 의미함
- 1950년대 정립된 AI는 1980년대까지의 두 차례의 암흑기에도 불구하고 컴퓨팅 파워 증가와 머신러닝/딥러닝 알고리즘의 진화로 AI 부흥기가 도래함



01 4차 산업혁명과 원자력

» 미래원자력기술 활용 및 수출 경쟁력 확보

- 정부의 탈원전 기조 속에서도 가동원전 안전 확보 및 해체분야 연구와 방사선 등 타 분야 융합연구에 AI, 빅데이터 등 첨단 ICT기반 기술의 접목
- 중소형 원전 **SMART** 또는 미래형 **ISMAR** 원전에서 **ICT기반 원자력 안전 혁신**
⇒ 원천적인 인적오류 및 원전사고 방지 및 경쟁력 확보



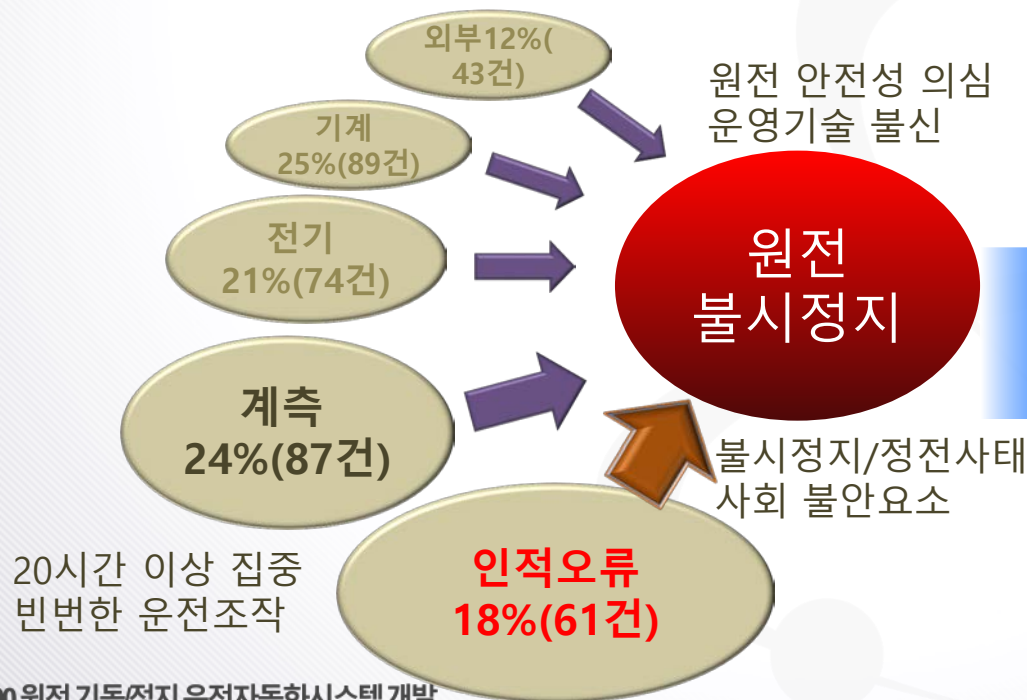
02

연구개발 필요성

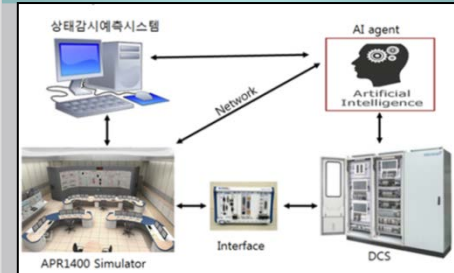
02 연구개발 필요성

» 원자력발전소 기동 및 정지 운전

- 약 20시간 이상 소요되는 100% 수동운전으로 인적오류 발생 가능성 증가
- 지난 20년간 인적실수로 인한 원전 불시정지 18% [기동/정지 운전 9% 차지]
- 운전원 조작 및 감시 빈도 감축으로 인적오류 방지 및 운전성 개선 필요



원전 인적오류 방지

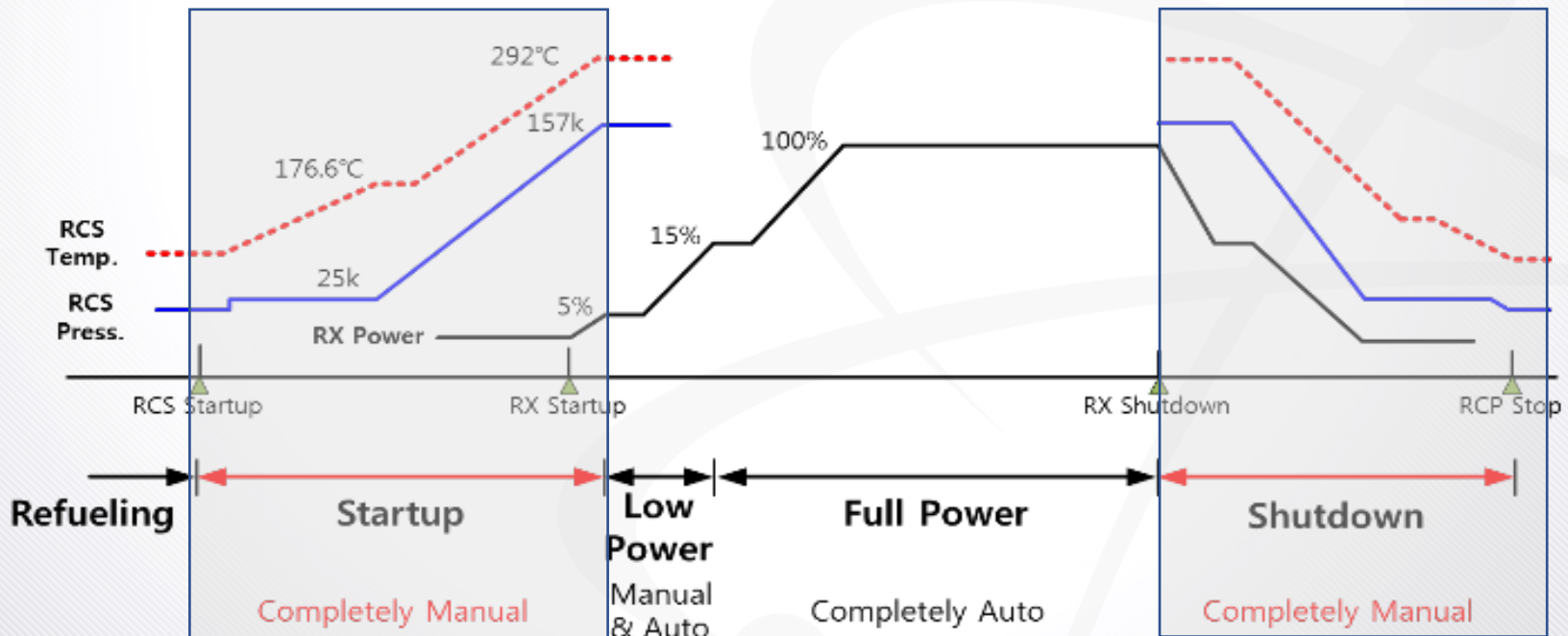


AI 기반 기동/정지 자동화
AI 기반 상태감시/예측

02 연구개발 필요성

» 원자력발전소 운전모드 및 자동화 범위

- 운전모드 중 일부 전출력(Full Power) 구간만 자동화 운전중
- **기동/정지 운전** 구간은 빈번한 운전원 조작이 필요한 숙련된 운전이 요구
- 기동/정지 운전 중 **운전원 과부하 및 판단 오류** 발생 가능성 높음

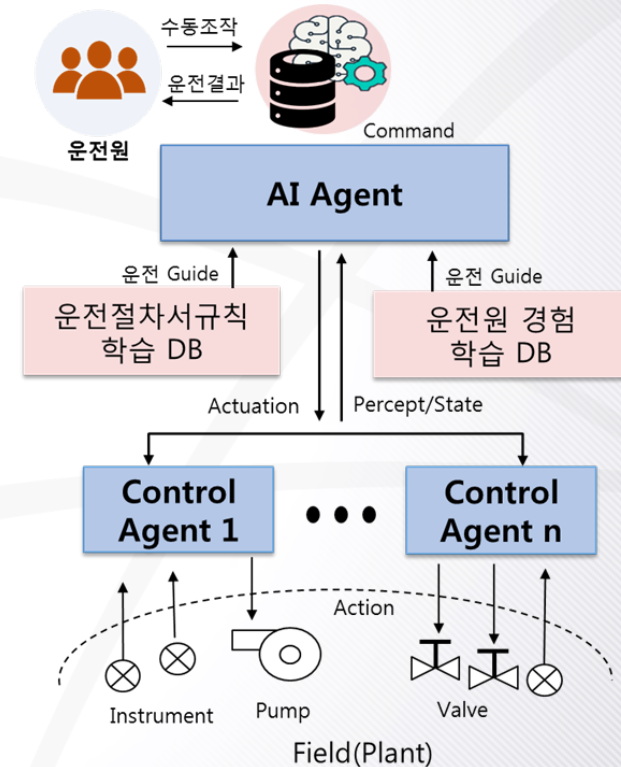
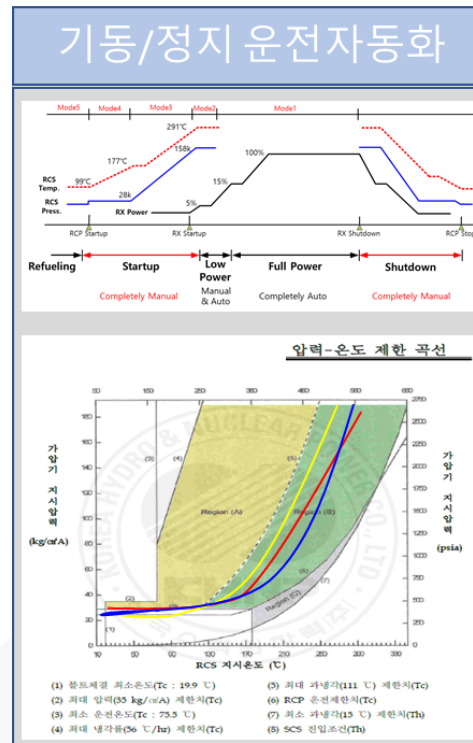


03 연구개발 목표

03 연구개발 목표

» 최종목표: 원전 기동/정지 운전자동화시스템 개발 및 성능검증

- 운전절차서 및 운전원 지식을 분석하여 **규칙기반 기동/정지 자동운전 및 자동제어 기술 개발**
- 운전 Data를 학습하여 **인공지능 알고리즘을 이용한 최적 제어논리 개발**
- 원자력발전소 시뮬레이터에 통합하여 **규칙기반 자동화 및 인공지능 제어논리 성능검증**



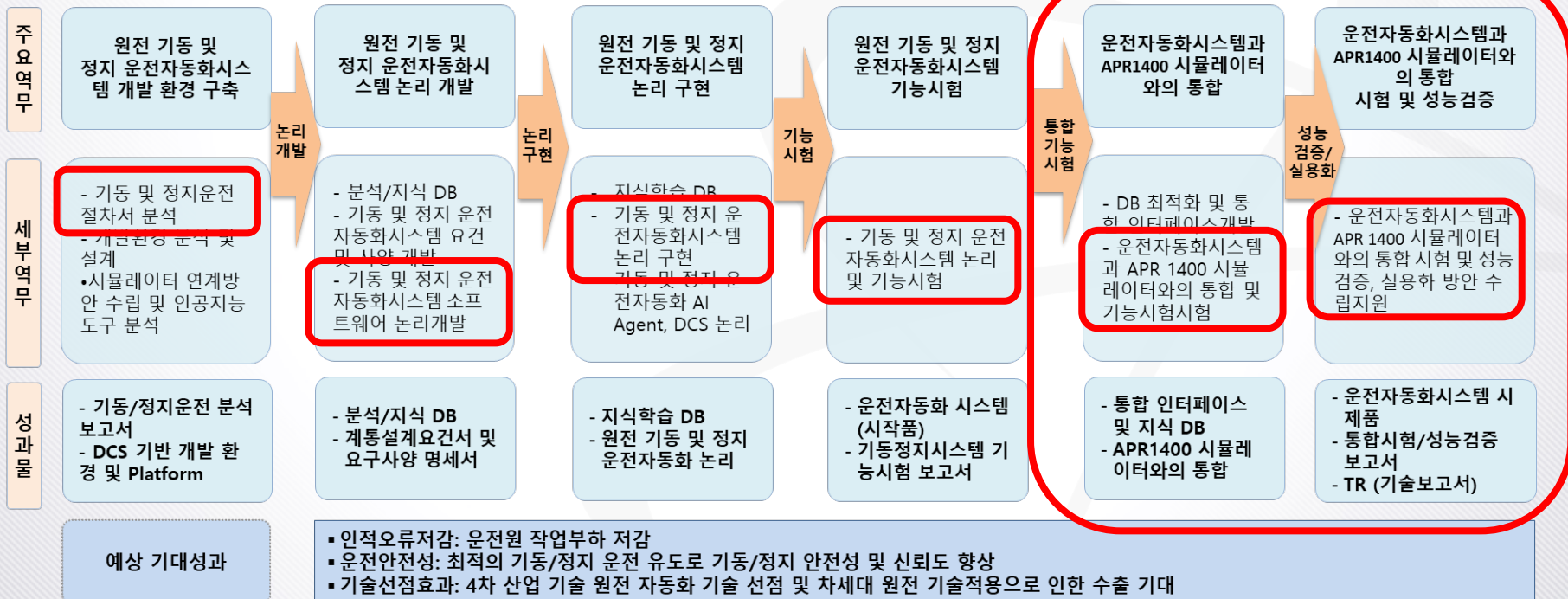
03 연구개발 목표

» 연구개발 연차별 목표

- 1단계 (2017.12~2020.12) : 원전 기동/정지 운전자동화시스템 1차 시작품 개발
- 2단계 (2021.01~2022.11) : 통합 기동/정지 운전자동화시스템 기능/성능검증

1단계 (약 3년, 37개월)

2단계 (약 2년, 23개월)



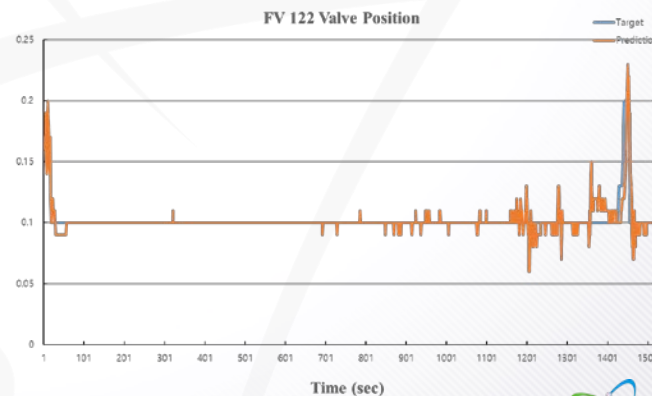
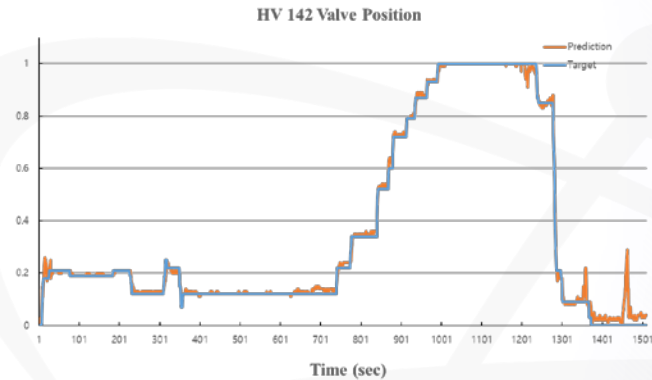
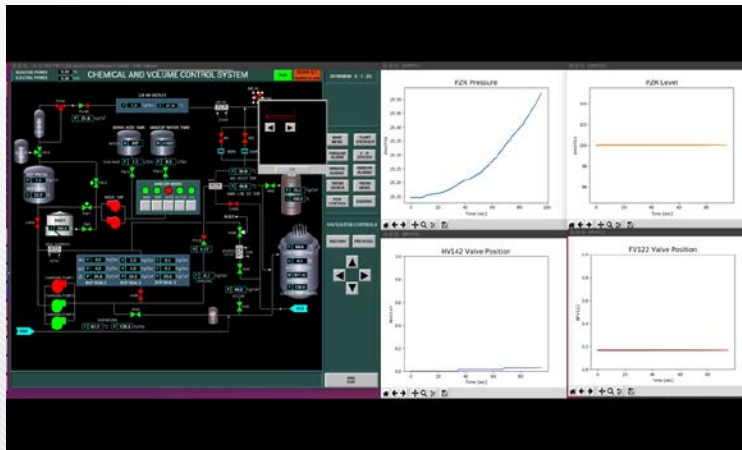
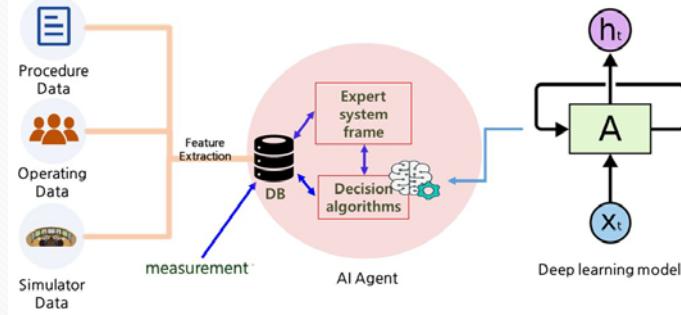
04

연구개발 진행현황 및 성과

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화 프로토타입 설계 및 개발(1단계 1~2차년)

- CNS(Compact Nuclear Simulator)기반 기동/정지 운전자동화 프로토타입
- 운전원에 따른 운전 경험을 반영한 딥러닝(Deep Learning)기반 운전 자동화
- 가열구간에서 기포형성 구간까지 CNS data를 학습하여 RHR valve 계도 제어

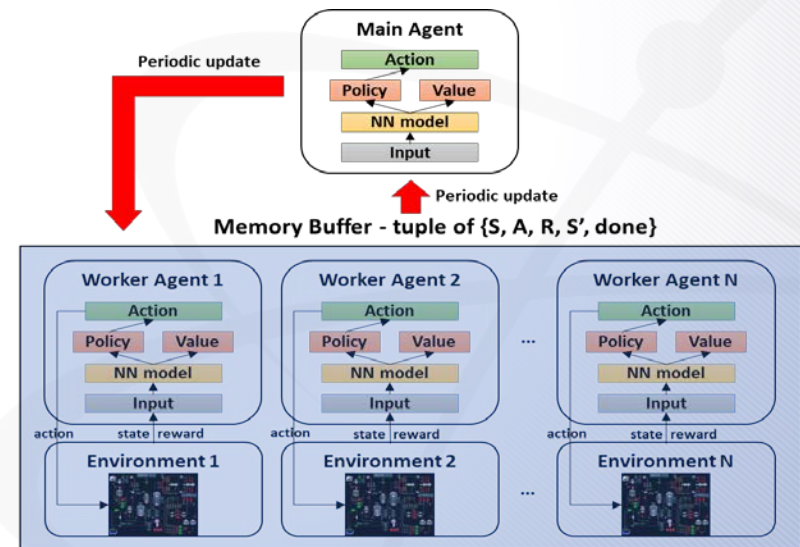
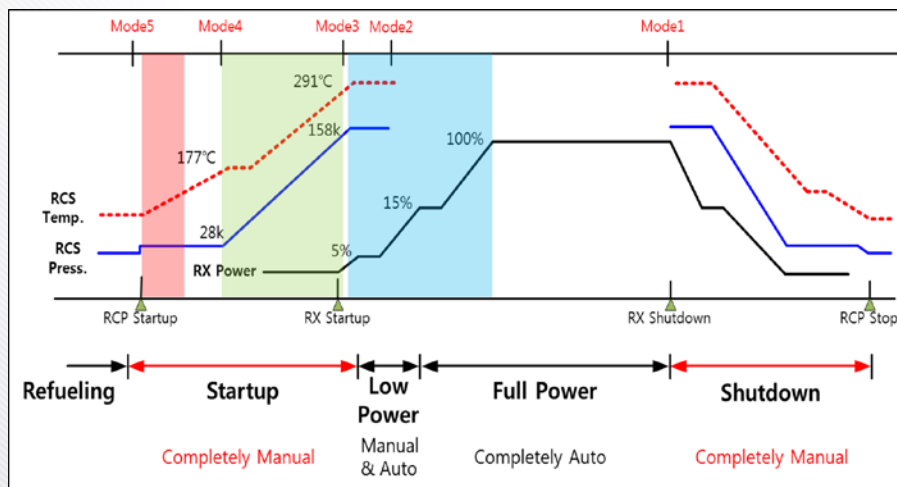


04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 - AI기반 자동화

» 딥러닝 강화학습 기반 운전자동화 구현 (CNS 시뮬레이터)

- 일부 운전 과정에 대하여 강화학습 기반 운전자동화 알고리즘 구현
 - 상온 정지 → 가압기 기포 생성 (충전수 밸브, 유출수 밸브)
 - 고온 정지 → 고온 대기 (충전수 밸브, 가압기 살수 밸브)
 - 2% 출력 → 100% 출력 (제어봉 인출, 보충수 밸브, 봉산수 밸브)

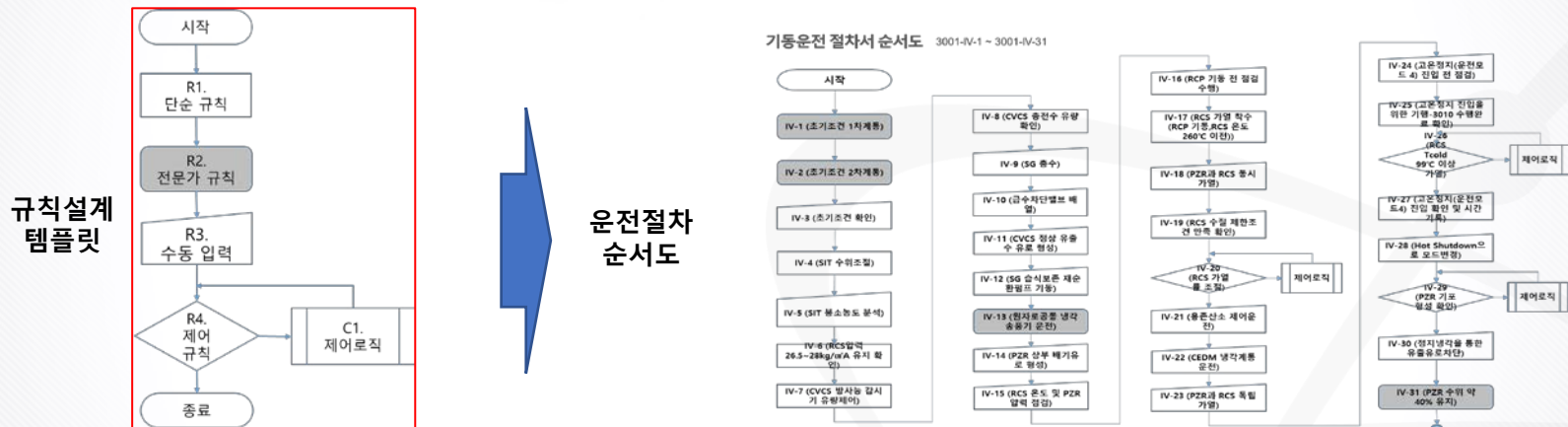


- 공통적으로 A3C (Asynchronous Advantage Actor-Critic) 강화학습 방법론 적용

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 규칙설계 (종합운전절차서 분석)

- 원자력발전소 종합운전절차서 기동 및 정지 운전 절차 분석
- 규칙설계를 위한 4가지 템플릿 기반 규칙기반 운전절차 규칙설계 및 구현



절차서	절차규칙	변수명	Tag No.	경보 (TRBL/DIS)	운전 변수 범위 (정상변수범위)
정지냉각계를 한 계열이 운전 중 AND 정지냉각계를 한 계열이 운전되어 15,710~18,927 l/min의 정지냉각유량을 형성하고 있고, 다른 계열은 운전 가능한 상태이다.	IF 정지냉각계를 한 계열 (SC 01A) = 운전 중 AND SC 651 = OPEN AND SC 653 = OPEN AND SC 655 = OPEN AND SC 310 = OPEN AND SC 601 = OPEN AND 15,710 < 정지냉각계통 유량 < 18,927 AND 정지냉각계를 다른 계열 (SC 01B) = 경보 없음 AND SC 652 = 경보 없음 AND SC 654 = 경보 없음 AND SC 656 = 경보 없음 AND SC 311 = 경보 없음 AND SC 600 = 경보 없음 THEN 절차 1-1.바 수행 ELSE IF 절차 1-1.마 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	SC 01A SC 651 SC 653 SC 655 SC 310 SC 601	9-441-M-PP01A 9-441-V-0651 9-441-V-0653 9-441-V-0655 9-441-V-0310 9-441-V-0601		0 - 400 (0 - 400) N/A N/A N/A N/A N/A
		정지냉각계통 유량 SI-FI-302A SI-FI-302B	9-441-J-FI-0302A 9-441-J-FI-0305B		0 - 25000 (15709.4 - 25000) 0 - 25000 (15709.4 - 25000)
		SC 01B SC 652 SC 654 SC 656 SC 311 SC 600	9-441-M-PP01B 9-441-V-0652 9-441-V-0654 9-441-V-0656 9-441-V-0311 9-441-V-0600	9-SI-UA-034-01/9-SI-UA-034-02 9-SI-UA-102-02/9-SI-UA-102-03 9-SI-UA-104-02/9-SI-UA-104-03 9-SI-UA-100-01/9-SI-UA-100-02 9-SI-UA-072-01/9-SI-UA-072-02 9-SI-UA-067-01/9-SI-UA-067-02	0 - 400 (0 - 400) N/A N/A N/A N/A N/A

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 기능 구현 – 필수감시자동계산기 및 계산기자동화기능 (1/2)

필수감시 자동계산기 (4종)

- ▶ 예상 임계 붕소농도
- ▶ 예상 임계 제어봉 위치
- ▶ 정지 여유도
- ▶ RCS 운전 누설량 계산

연계화면을 통한 자동계산기

- ✓ 시험절차서 기록지 작성 (Test Cases)
- ✓ 운전원 입력값 입력 창 개발
- ✓ NDR 계산값 자동화
- ✓ 시뮬레이터 입력값 화면 개발
- ✓ 필수감시 계산 자동화

Case	입력변수	입력값	입력방법	비고
1	(정지 전 일계상태) 원자로 출력	2%	수동입력	
	(정지 전 일계상태) 원자로 출력변동도	-41.4 85m	수동입력	NDR (MOC, 200 ppm)
	(정지 전 일계상태) 조절재어봉 위치	191	수동입력	MOC_Group 3
	(정지 전 일계상태) 조절재어봉 반응도	1459	수동입력	MOC_Group 3
	(정지 전 일계상태) 분봉장 제어봉 위치	381	수동입력	
	(정지 전 일계상태) 분봉장 제어봉 반응도	0	수동입력	NDR
	(정지 전 일계상태) 지논 동기출력(ppm)	0	수동입력	
	(정지 전 일계상태) 시막리온 동기출력	0	수동입력	
	(정지 전 일계상태) 측정붕소농도	200ppm	수동입력	
	(예상 일계상태) 조절재어봉 위치	210	수동입력	
	(예상 일계상태) 조절재어봉 반응도	1452	수동입력	NDR
	(예상 일계상태) 지논변동도 1시간 후 일계	-675.50	수동입력	NDR
	(예상 일계상태) 시막리온 반응도	-13.72	수동입력	NDR
	정지 후 경과시간	1	수동입력	
	연속도 (%) CX-YGXR002	250	시뮬레이터 입력장치	
2	미분 붕소제어율	-8.48	수동입력	NDR
	측정 B-10 동위원소비(C%)	93.5	수동입력	
	일계 B-10 동위원소비(C%)	95	수동입력	
	RCS 계측	177,000	초기조건	
	BAT 붕소농도 (ppm)	1800	수동입력	

필수감시 계산기 시험기록지

The screenshot shows a software interface titled 'CalculatorForm' with a subtitle '예상 임계 붕소 농도 계산' (Estimated Critical Boron Concentration Calculation). It contains several input fields and calculated values:

- 정지 후 경과시간** (Time after stop): 1
- BAT 붕소 농도** (BAT Boron Concentration): 1800
- 측정 B-10 동위원소비** (Measured B-10 Isotope Ratio): 93.5
- 일계 B-10 동위원소비** (Normal B-10 Isotope Ratio): 95
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): 191
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): 1459
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): 381
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): 0
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): 0
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): 200ppm
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): 210
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): 1452
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): -675.50
- 정지 전 일계상태** (Normal State before stop): -13.72
- 정지 후 경과시간** (Time after stop): 1
- 연속도 (%) CX-YGXR002** (Continuity (%) CX-YGXR002): 250
- 미분 붕소제어율** (Differential Boron Control Rate): -8.48
- 측정 B-10 동위원소비(C%)** (Measured B-10 Isotope Ratio (C%)): 93.5
- 일계 B-10 동위원소비(C%)** (Normal B-10 Isotope Ratio (C%)): 95
- RCS 계측** (RCS Measurement): 177,000
- BAT 붕소농도 (ppm)** (BAT Boron Concentration (ppm)): 1800

The calculated results are shown at the bottom:

- 반응도 계산 결과** (Reactivity Calculation Result): 430.7
- 예상 임계 붕소 농도** (Estimated Critical Boron Concentration): 536.97245321864
- 예상 임계 측정 붕소 농도** (Estimated Critical Measured Boron Concentration): 544.570942081039
- 붕소 조압량** (Boron Adjustment Amount): 7509.909231966204
- 붕소 희석량** (Boron Dilution Amount): 17313.1872781134

예상 임계 붕소농도 계산기 시험 결과

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 기능 구현 – 필수감시자동계산기 및 자동화기능 구현 (2/2)

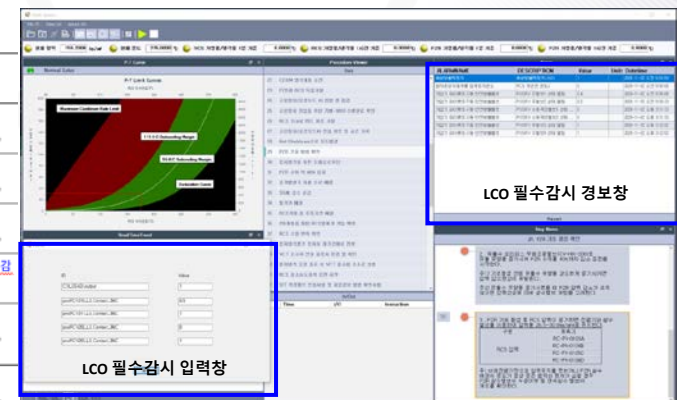
- 필수감시(운전 제한 조건; LCO) 기능 자동화
 - 7개 필수감시 운전 제한 조건 LCO 감시
- 연계화면을 통한 필수감시 자동화
 - 시험절차서 기록지 작성 (Test Cases)
 - LCO시험 입력값 입력창 개발
 - 시뮬레이터 입력값 화면 개발
 - 필수감시(LCO) 자동화 화면

나. LCO-3.4.2, 원자로냉각재계통 임계최저온도

입력변수	입력 Case	시험입력값	출력예상값	시험출력값	판정
RCS Loop1 저온관 온도 / RCS Loop2 저온관 온도 (oC)	1	296/296	296 (정상)	296	합격
	2	276.5/276.5	276.5 (경보)	276.5(경보)	합격
	3	299.6/240.6	240.6 (경보)	240.6 (경보)	합격
	4	276.5/303.8	276.5 (경보)	276.5 (경보)	합격
	5	286.7/286.7	286.7 (정상)	286.7	합격

LCO 필수감시 시험 기록지

No.	운전제한조건	시험항목	적용	입력 변수	변영 여부
1	LCO-3.2.5	축방향출력편차	1	축방향출력편차(AS)	운전제한조건 필수감시시작용
2	LCO-3.4.2	원자로냉각재계통 임계최저온도	1, 2	RCS 저온관 온도	운전제한조건 필수감시시작용
3	LCO-3.4.3	원자로냉각재계통 압력 및 온도 제한	합시	RCS 압력, 온도, 가열률, 냉각률	운전제한조건 필수감시시작용
4	LCO-3.4.10	가압기 파이롯트구동 안전방출밸브	1, 2, 3, 4	가압기 안전 밸브 상태	운전제한조건 필수감시시작용
5	LCO-3.5.1	안전주입탱크	1, 2, 3, 4	SIT 격리 밸브 상태, SIT 수위, SIT 질소 압력	운전제한조건 필수감시시작용
6	LCO-3.5.2	안전주입계통: 운전중	1, 2, 3	고온관 주입 밸브 상태	운전제한조건 필수감시시작용
7	LCO-3.5.3	안전주입계통: 정지중	4, 5, 6	고온관 주입 밸브 상태	운전제한조건 필수감시시작용



LCO 필수감시 입력창/경보출력 화면

7 개 LCO 필수감시 자동화

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 필수감시 모듈 구현

가열률 및 냉각률 계산 구현

P-T 곡선의 가열률 및 냉각률 계산 및 추적 기능의 입력 변수

No.	설명	구분
I1	원자로냉각재 평균 온도	APR1400 시뮬레이터 입력
I2	가압기 온도	APR1400 시뮬레이터 입력
I3	가압기 압력	APR1400 시뮬레이터 입력

- 1분 주기 원자로냉각재 온도 가열률/냉각률(℃) =
현재 원자로냉각재 평균 온도 - 1분 전 원자로냉각재 평균 온도

1시간 주기 원자로냉각재 온도 가열률/냉각률(℃) =
현재 원자로냉각재 평균 온도 - 1시간 전 원자로냉각재 평균 온도

- 1분 주기 가압기 온도 가열률/냉각률(℃) = 현재 가압기 온도 - 1분 전 가압기 온도
- 1시간 주기 가압기 온도 가열률/냉각률(℃) = 현재 가압기 온도 - 1시간 전 가압기 온도

가열률/냉각률 결과 표시 확인(예제: 신고리3호기 PI 데이터)

1분 주기 원자로 냉각재 온도의 가열률/냉각률	0.1640 ℃	1분 주기 가압기 온도의 가열률/냉각률	0.1378 ℃
1시간 원자로 냉각재 온도의 가열률/냉각률	0.1640 ℃	1시간 가압기 온도의 가열률/냉각률	0.1378 ℃

● 압력-온도 제한곡선에 따른 안전영역 필수감시

- 현재의 RCS의 압력과 온도의 안전영역을 상시 감시하여 비안전영역 조건 만족시 경보발생
- 필수감시 경보 알람창을 통한 경보 정보 확인 (경보 이름, 설명, 실제값, 발생시간)

- 최대 가압기 압력 = $0.0051 \times RCS\ Tavg^2 - 0.6215 \times RCS\ Tavg + 47.79$

- 최소 가압기 압력 = $0.000005 \times RCS\ Tavg^3 - 0.0018 \times RCS\ Tavg^2 + 0.1657 \times RCS\ Tavg + 12.71$

- If 최소 가압기 압력 ≤ 가압기 압력 ≤ 최대 가압기 압력

Then 안전 영역

If 가압기 압력 < 최소 가압기 압력 or 가압기 압력 > 최대 가압기 압력

Then 비안전 영역

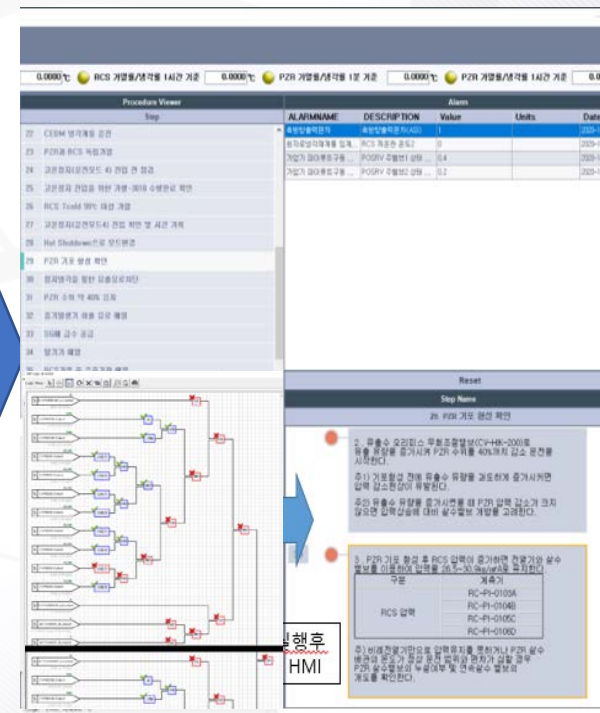
04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 절차 수행 자동화 모듈 구현

- 운영절차서 규칙설계를 Do_If-Then_Do 기반 절차기반 절차서 수행으로 규칙설계 구현
 - 절차규칙 형태 => 단순규칙, 단순 기기 작동, 수동입력, 전문가 규칙, 제어규칙(control Agent 제어기)으로 구현
- 운전절차서 운전지원 요건 분석 결과 및 한수원 운전전문가 의견을 활용하여 절차규칙 설계 : 전문가 규칙 설계
- 전문가 확인이 불가능하거나 시뮬레이터 구현 불가능한 사항은 수동입력 규칙 적용
- 종합운전절차에 따라 절차규칙 Logic 을 만족하면 다음 절차를 수행하도록 자동화 구현

절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	Tag No.	운전원 조치사항	규칙형태
3001-IV-2-1-가	초기조건 2차계통	순환수계통이 정상운전 중이다.	IF 순환수계통 = 정상운전 중 [4 CW-PPs out of 6 CW-PPs = 운전 중] THEN 절차 2-1-나 수행 ELSE IF 절차 2-1-가 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	순환수계통 (CW-PP01 CW-PP02 CW-PP03 CW-PP04 CW-PP05 CW-PP06)	9-551-M-PP01 9-551-M-PP02 9-551-M-PP03 9-551-M-PP04 9-551-M-PP05 9-551-M-PP06	순환수계통 정상운전 중 확인 만족 순환수계통 정상운전 전문가 확인 불만족 AND 운전원 조치/확인 대기 화면	전문가 규칙
3001-IV-2-1-나	초기조건 2차계통	TGBCCW 및 TGBOCW가 정상운전 중이다.	IF TGBCCW = 정상운전 중 [1 TGBCCW Pump out of 2 TGB CCW Pumps = 운전중] AND TGBOCW = 정상운전 중 [2 TGBOCW Hx out of 3 TGBOC W Hx = 운전중] -> [WH033&W H049 = OPEN, WH034&WH050 = OPEN, WH035&WH051 = OP EN] THEN 절차 2-1-다 수행 ELSE IF 절차 2-1-나 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	TGBCCW Pump (TGBCCW Pump PPO 1 TGBCCW Pump PPO 2) TGBOCW Hx (TGBCCW Hx01: WH 033&WH049 TGBCCW Hx02: WH0 34&WH050 TGBCCW Hx03: WH0 35&WH051)	9-562-M-PP01 9-562-M-PP02 9-561-V-0033 9-561-V-0049 9-561-V-0034 9-561-V-0050 9-561-V-0035 9-561-V-0051	TGBCCW 정상운전중 확인 만족 TGBCCW 정상운전중 확인 불만족 AND 운 전원 조치/확인 대기 화면 TGBOCW 정상운전중 확인 만족 TGBOCW 정상운전중 확인 불만족 AND 운 전원 조치/확인 대기 화면	전문가 규칙



04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 절차 자동화 모듈 Tool 화구현

- 절차자동화 규칙 편집기 구현 (Logic/Action Editor)
 - 해당절차 지시문에 규칙로직 및 실행조작 작성
 - 속성창을 통한 변수명, Description 입력 가능
 - 운전절차 변경 및 Logic 추가 시 쉽게 구현하도록 Logic/Action Editor를 통한 규칙설계 구현

The screenshot displays the Logic/Action Editor tool with the following components:

- Rule List (절차규칙):** A table listing rules with columns for rule name, variable name, and tag number. The first rule is highlighted with a red circle.

절차규칙	변수명	Tag No.
1. CVCS 방사능 감시기 유량제어기(CV-FIK-204) 유량을 7.6ℓ/min(2 gpm)으로 설정하고 자동으로 전환한다.	CVCS 방사능 감시기 유량제어기 (CV-FIK-204)	9-451-J-FIK-0204
- Logic Editor:** A flowchart showing the logic for the selected rule. A red circle highlights the logic flow.
- Action Editor:** A table for defining actions. A blue circle highlights the variable name and action.

Group Name	변수명	변수값
1	ctCVFIK204.lgAut	1
2	ctCVFIK204.kfSpReal	7.6

Below the rule list, the logic for the first rule is shown:

```

DO CVCS 방사능 감시기 유량제어기 (CV-FIK-204) = 7.6 ℓ/min(2 gpm) AND CVCS 방사능 감시기 유량제어기 = AUTO
IF CVCS 방사능 감시기 유량제어기 = 7.6ℓ/min(2 gpm) AND CVCS 방사능 감시기 유량제어기 = AUTO
THEN 절차 8-1 수행
ELSE IF 절차 7-1 불만족
THEN 운전원 조치/확인 대기
END IF
  
```

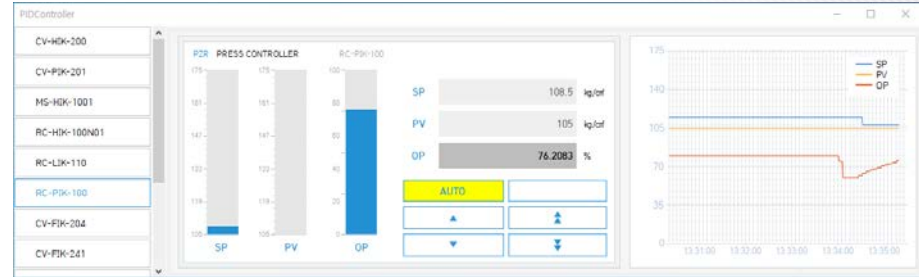
At the bottom, the text "규칙 편집기 (Logic/Action Editor) 가열/냉각 제어기 구현" is displayed.

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

Control Agent 자동제어 모듈 구현

- 자동제어 모듈 구현을 위하여 총 7개 자동제어 규칙설계 구간 구현 (종합 3001 절차서 기준)
- 운전모드 조건별 RCS 가열을 위한 가열률 조절 신규 PID 제어기 구현



절차번호	제목	절차규칙	변수명	Tag No.
3001-IV-20-1	RCS 가열률 조절	RCS 가열 시작 (Mode4 진입조건 99℃까지)	열교환기 출구유량 제어밸브 (SC 310, SC 311)	9-441-V-0310
			열교환기 우회유량 제어밸브 (SC 312, SC 313)	9-441-V-0311
			가열률 조절기 (신규 PID 제어기)	9-441-V-0312
			가열률 조절기 (신규 PID 제어기)	9-441-V-0313
3001-IV-26-1	RCS Tcold 99℃ 이상 가열	RCS 가열 시작 (Mode3 진입조건 177℃까지)	열교환기 출구유량 제어밸브 (SC 310, SC 311)	9-441-V-0310
			열교환기 우회유량 제어밸브 (SC 312, SC 313)	9-441-V-0311
			가열률 조절기 (신규 PID 제어기)	9-441-V-0312
			가열률 조절기 (신규 PID 제어기)	9-441-V-0313
3001-IV-29-2	PZR 기포 형성 확인	PZR 수위 40% 까지 자동제어	PZR 수위 (Representative PZR Level (WR) L)	9-431-J-LI-1113
			PZR 수위제어기 (RC-LIK-110)	9-431-J-LIK-0110
3001-IV-29-3	PZR 기포 형성 확인	RCS 압력 26.5~28kg/cm² A 유지	RCS 압력 (RC-PI-0103A, RC-PI-0104B, RC-PI-0105C, RC-PI-0106D)	9-431-J-PI-0103A
			전열기 (P-1, P-2)	9-431-J-PI-0104B
			전열기 조절기(P-100)	9-431-J-PI-0105C
			PZR 살수밸브 (RC 100F, RC 100E)	9-431-J-PI-0106D
			살수밸브 조절기(H-100)	9-431-M-PZR-P1
				9-431-M-PZR-P2
				9-431-J-PIK-0100
				9-431-V-0100F
				9-431-V-0100E
				9-431-J-HIK-0100

절차번호	제목	절차규칙	변수명	Tag No.
3001-IV-44-1	에 의한 정상 우회신호 정상 복귀 확인	RCS 압력증가 제어 시작 (35.15kg/cm²A <= RCS 압력 < 50.3kg/cm²A)	RCS 압력 (RC-PI-0103A, RC-PI-0104B, RC-PI-0105C, RC-PI-0106D)	9-431-J-PI-0103A
			전열기 (P-1, P-2)	9-431-J-PI-0104B
			전열기 조절기(P-100)	9-431-J-PI-0105C
			PZR 살수밸브 (RC 100F, RC 100E)	9-431-J-PI-0106D
3001-IV-49-1	RCS 온도 260℃까지 가열 및 PZR 압력 유지	RCS 가열 시작 (Mode3 진입조건 260℃까지)	열교환기 출구유량 제어밸브 (SC 310, SC 311)	9-431-M-PZR-P1
			열교환기 우회유량 제어밸브 (SC 312, SC 313)	9-431-M-PZR-P2
			가열률 조절기 (신규 PID 제어기)	9-431-J-PIK-0100
			가열률 조절기 (신규 PID 제어기)	9-431-V-0100F
3001-IV-54-1-라	PZR 압력 105kg/cm²A 압력 자동제어	PZR 압력제어기 AUTO/LOCAL 모드에서 압력을 105kg/cm²A부터 158.2kg/cm²A 까지 순차적으로 상승 자동제어	PZR 압력제어기 (RC-PIK-100)	9-431-V-0100E
				9-431-J-HIK-0100

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 기능 – 운전절차규칙 (단순규칙) (1/4)

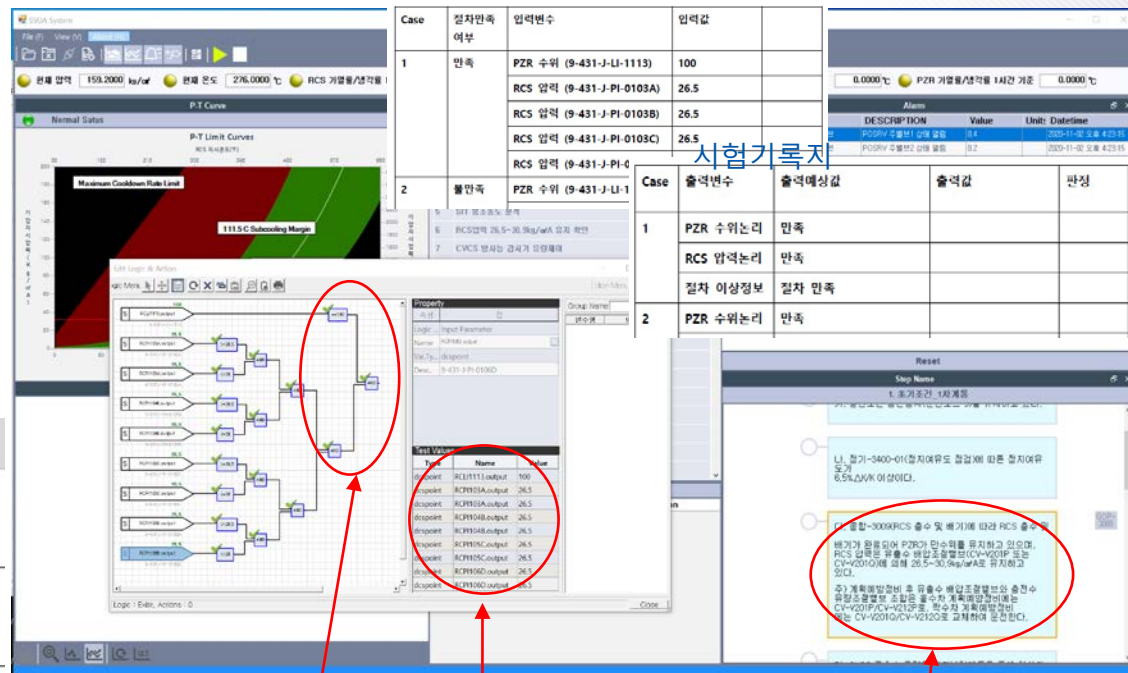
● 시험 절차번호

- “초기조건_1차계통”, 3001-IV-1-1-다

● 시험입출력 / 절차서 기록지

- 시험절차서 기록지 작성 (Test Cases)
- 시험입출력 화면 개발

절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	Tag No.
3001-IV-1-1-다	초기조건_1차계통	종합-3009RCS 중수 및 배기가 환로되어 PZR가 만수위를 유지하고 있다. RCS 압력은 중수수 배압조절 밸브(CV-V2019) 또는 CV-V2010에 의해 26.5~28kg/cm ² 로 유지하고 있다.	PZR 수위 (Representative PZR Level (WR) L) IF PZR 수위 = 만수위 (100%) AND 26.5 ≤ RCS 압력 ≤ 28 kg/cm ² THEN 절차 1-1-다 불만족 ELSE F 절차 1-1-다 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF	PZR 수위 (RCS 압력 (RC-PH-0103A, RC-PH-0104B, RC-PH-0105C, RC-PH-0106D)	9-431-J-LI-1113 9-431-J-PH-0103A 9-431-J-PH-0104B 9-431-J-PH-0105C 9-431-J-PH-0106D



시험출력

시험입력

실행 중인 지시문

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 기능 – 운전절차규칙시험 (전문가규칙) (2/4)

● 시험 절차번호

- “초기조건_2차계통”, 3001-IV-2-1-가

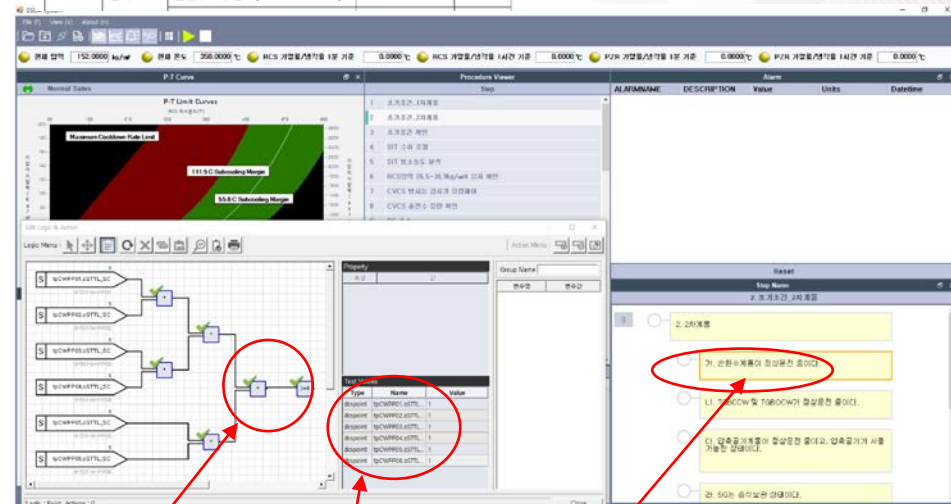
시험기록지

● 시험입출력 / 절차서 기록지

- 시험절차서 기록지 작성 (Test Cases)
- 시험입출력 화면 개발

절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	Tag No.
3001-IV-2-1-가	초기조건_2차계통	순환수계통이 정상운전 중이다.	IF 순환수계통 = 정상운전 중 (4 CW-PPs out of 6 CW-PPs ~ 운전중) THEN 절차 2-1-나 수행 ELSE IF 절차 2-1-가 불만족 THEN 운전할 조치/확인 대기 END IF	순환수계통 (CW-PP01 CW-PP02 CW-PP03 CW-PP04 CW-PP05 CW-PP06)	9-551-M-PP01 9-551-M-PP02 9-551-M-PP03 9-551-M-PP04 9-551-M-PP05 9-551-M-PP06

Case	절차만족 여부	입력변수	입력값	Case	출력변수	출력예상값	출력값	판정
1	만족	순환수계통평프(9-551-M-PP01)	ON	1	순환수계통평프논리	만족		
		순환수계통평프(9-551-M-PP02)	ON		절차 이상정보	절차 만족		
		순환수계통평프(9-551-M-PP03)	ON	2	순환수계통평프논리	만족		
		순환수계통평프(9-551-M-PP04)	ON					
		순환수계통평프(9-551-M-PP05)	ON					
		순환수계통평프(9-551-M-PP06)	ON					
2	만족	순환수계통평프(9-551-M-PP01)	ON					



시험출력

시험입력

실행 중인 지시문

실행 중인 지시문

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 기능 – 운전절차규칙 현장기기 수동작동(수동규칙) (4/4)

● 시험 절차번호

- “CVCS 정상유출수 유로 형성”, 3001-IV-11-1-다

● 시험입출력 / 절차서 기록지

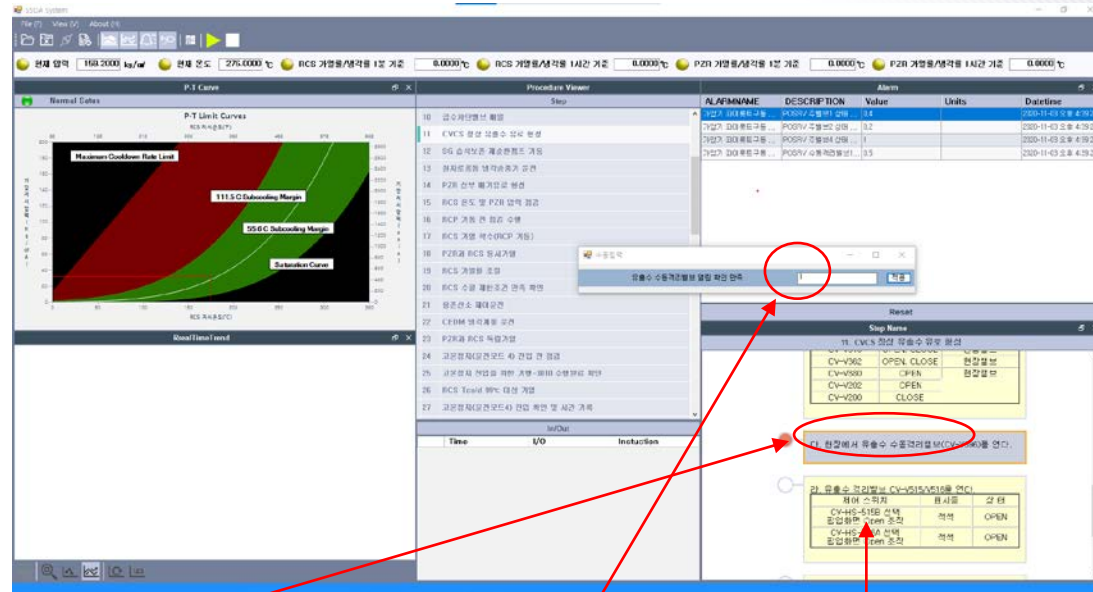
- 시험절차서 기록지 작성 (Test Cases)
- 운전원 수동입력 화면 개발
- 시험출력 지시문 표시 개발

절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	Tag No.
3001-IV-11-1-다	CVCS 정상 유출수 유로 형성 (CV-V396)를 만다.	현장에서 유출수 수동작동리벨 (CV-V396)를 만다.	DO 유출수 수동작동리벨 = OPEN (수동입력) IF 유출수 수동작동리벨 = OPEN THEN 절차 11-1-다 수행 ELSE IF 절차 11-1-다 불만족 THEN 운전원 조치 확인 대기 END IF	유출수 수동작동리벨 (CV-V396) (수동입력)	N/A

Case	절차만족 여부	입력변수	입력값	입력방법
1	만족	유출수 수동작동리벨, CV-V396	Open	수동입력

시험기록지

Case	출력변수	출력 예상값	출력값	판정
1	유출수 수동작동리벨의 논리	만족		
	절차 이상정보	절차 만족		
2	유출수 수동작동리벨의 논리	불만족		



수동입력출력 (수동입력 조건 만족시 지시문 회색으로 변함)

수동입력시험

실행 중인 지시문

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 기능 – 운전절차규칙 (제어규칙) (3/4)

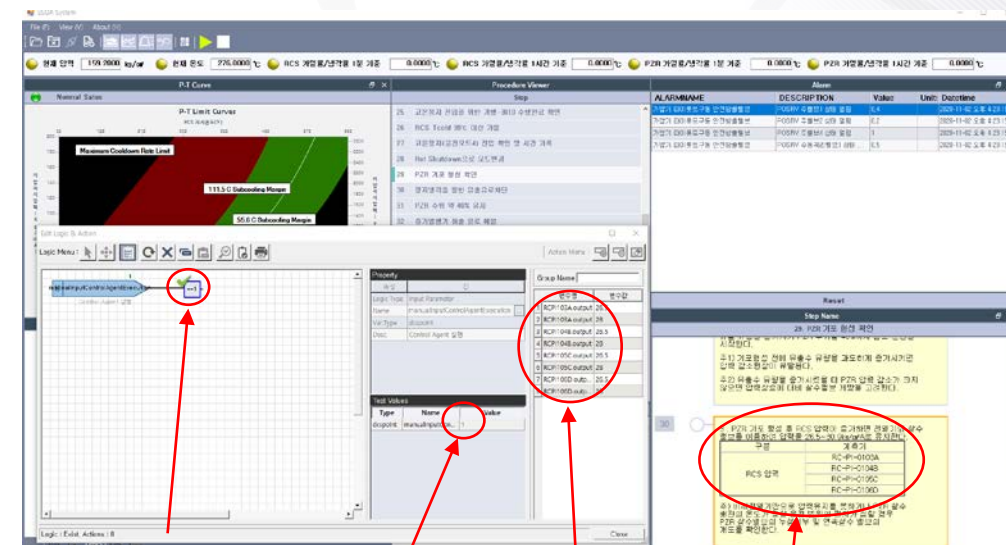
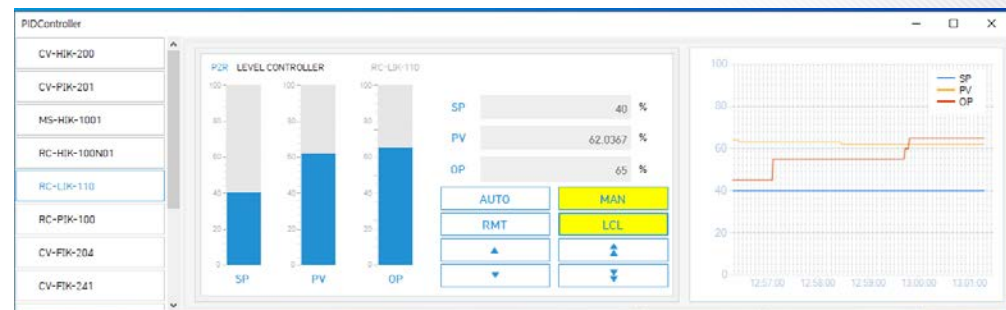
● 시험 절차번호

- “PZR 기포 형성 확인”, 3001-IV-29-3

● 시험입출력

- 시험절차서 기록지 작성 (Test Cases)
- 시험입출력 화면 개발
- Action 편집 화면 개발

절차번호	제목	절차서	절차규칙	변수명	Tag No.
3001-IV-29-3	PZR 기포 형성 확인	PZR 기포 발생 후 RCS 압력이 증가하면 전압기와 실수 발보를 이용하여 입력을 26.5~28kgf/cm ² A로 유지한다. 2) 비례전압기전으로 전압유지를 못하거나 PZR 실수 배관의 유도가 정상 운전 범위와 전자가 설정 값인 PZR 실수 발보의 누설유 유 전속실수 발보의 가도를 확인한다.	CONTROL AGENT 자동제어의 구현 DO PID RCS 압력 자동제어 (전압기, 실수발보, 사출) RCS 압력 26.5~28kgf/cm ² A 유지 IF Control Agent = 실행 (RCS 압력 26.5~28kgf/cm ² A) AND 절차 30-19-3 ELSE IF 절차 29-3 불만족 THEN 운전중 종료/확인 대기 END IF	RCS 압력 RC-PH-0103A RC-PH-0104B RC-PH-0105C RC-PH-0106D 전압기 (P-1, P-2) 전압기 조절기(P-100) PZR 실수발보 (RC 100F RC 100E) 실수발보 조절기(PH-100)	9-431-J-PH-0103A 9-431-J-PH-0104B 9-431-J-PH-0105C 9-431-J-PH-0106D 9-431-M-PZR-P1 9-431-M-PZR-P2 9-431-J-PH-0100 9-431-V-Q100F 9-431-V-Q100E 9-431-J-PH-0100



시험출력

시험입력

Action 목록

실행 중인 지시문

04 연구개발 진행현황 및 성과

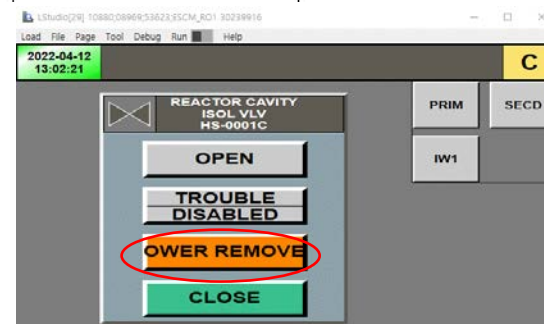
» 기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

○ 기동/정지 운전자동화시스템(SSOAS) 안정화 구현

- JOG형 밸브 OPEN(100%)/CLOSE(0%) 명령 자동화
 - 밸브에 대한 JOG OPEN(100%)/CLOSE(0%)를 수동으로 조작하던 **규칙설계를 자동화 조작 처리**
 - MSIV 우회제어밸브를 자동으로 시간간격을 두고 연속적으로 **10%, 30%, 50% OPEN** 하도록 수정함 (표 참조)
- 토글형 밸브 AUTO/MANUAL/CLOSE 명령 자동화
 - MSIV 전단배수밸브 타입 경우, 운전원이 수동으로 수행하는 밸브에 대한 조작 명령을 **OPEN → MANUAL/CLOSE → AUTO/CLOSE** 순서의 자동화 조작 처리로 개선함
- 전원구동형 밸브 POWER 체크 및 OPEN/CLOSE 자동화
 - Reactor Cavity 격리밸브 타입 경우, 밸브를 OPEN 시, 자동으로 'Power Removed'가 아닌지 체크하고 해제하여 밸브를 OPEN하도록 자동화 처리로 개선함 (그림 참조)

3001-IV-35-3-마	RCS가열 중 주중 기관 예열	MSIV 우회제어밸브(MS-V019/V020/V021/V022)를 서서히 열어 예열을 시작한다. 주) 2차계통 예열이 시작되면 주기적으로 2차계통 누설여부를 확인하여 누설 부위를 정비해야 한다.	주) Information Provision DO MSIV 우회제어밸브 = 조절 OPEN [MS-V019 = 조절 OPEN AND MS-V020 = 조절 OPEN AND MS-V021 = 조절 OPEN AND MS-V022 = 조절 OPEN] IF MSIV 우회제어밸브 = 조절 OPEN [MS-V019 = 조절 OPEN AND MS-V020 = 조절 OPEN AND MS-V021 = 조절 OPEN AND MS-V022 = 조절 OPEN] THEN 절차 35-3-바 수행 ELSE IF 절차 35-3-마 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF
----------------	------------------	---	---

3001-IV-35-3-마	RCS가열 중 주중 기관 예열	MSIV 우회제어밸브(MS-V019/V020/V021/V022)를 서서히 열어 예열을 시작한다. 주) 2차계통 예열이 시작되면 주기적으로 2차계통 누설여부를 확인하여 누설 부위를 정비해야 한다.	주) Information Provision DO MSIV 우회제어밸브 = 조절 OPEN 방법 : 3, 5, 8, 13 %(각 2초 delay 후 actuation) [MS-V021 = 조절 OPEN AND MS-V022 = 조절 OPEN AND MS-V023 = 조절 OPEN AND MS-V024 = 조절 OPEN] IF MSIV 우회제어밸브 = 조절 OPEN [MS-V021 = 조절 OPEN AND MS-V022 = 조절 OPEN AND MS-V023 = 조절 OPEN AND MS-V024 = 조절 OPEN] THEN 절차 35-3-바 수행 ELSE IF 절차 35-3-마 불만족 THEN 운전원 조치/확인 대기 END IF
----------------	------------------	---	--



04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

○ APR1400 시뮬레이터 연계 논리 개선 : 계통간의 연계 반영 단계적 동작 자동화

○ 가열 운전 절차서 3001, 3002 기능시험 결과

- Valve 단계적 Open/Close 자동화 : 15 개 절차 수정
- Setpoint 설정치 출력 단계적 자동화 : 5개 절차 수정
- 수동 운전 → Do 수행 자동화 : 15개 절차 수정
- 변수 오류 및 Logic 평가 개선 : 40 여개 절차 수정

○ 냉각 운전 절차서 3004, 3005 기능시험 결과

- Valve 단계적 Open/Close 자동화 : 6 개 절차 수정
- 단계적 설정치 출력 자동화 : 4개 절차 수정
- 수동 운전 → Do 수행 자동화 : 11개 절차 수정
- 변수 오류 및 Logic 평가 개선 : 20 여개 절차 수정

<p>3001-IV-54-1-라</p> <p>라. PZR 압력제어기(RC-PIK-100)의 설정치를 정상 압력까지 서서히 상승시킨다.</p>	[완료]	<p>DO PID PZR 압력제어기를 정상압력 158.2kg/m²A까지 자동제어 (제어기 RC-PIK-100 사용) (수동입력)</p> <p>-PZR 압력제어기 AUTO/LOCAL 모드에서 압력을 105kg/m²A부터 158.2kg/m²A 까지 순차적으로 상승 자동제어</p> <p>IF PZR 압력제어기 설정치 = 서서히 상승 (수동입력)</p> <p>THEN 절차 55 수행</p> <p>ELSE IF 절차 54-1-라 불만족</p> <p>THEN 운전원 조치/확인 대기</p> <p>END IF</p> <p>KAERI: Control Agent 자동제어 규칙에서 수동입력 규칙으로 규칙설계 변경함, PI 컨트롤 히스테리시스에서 수동으로 SP 변경하면서 수동으로 종료</p> <p>김정택</p> <p>DO PID PZR 압력제어기를 정상압력 158.2kg/m²A까지 자동제어 (제어기 RC-PIK-100 사용)</p> <p>- 1st : RC-PIK-100 SP = 125 kg/m²A 이후</p> <p>IF PZR Press = 125 kg/m²A -- 2 kg/m²A 2nd actuation</p> <p>- 2nd : RC-PIK-100 SP = 135 kg/m²A 이후</p> <p>IF PZR Press = 135 kg/m²A -- 2 kg/m²A 3rd actuation</p> <p>- 3rd : RC-PIK-100 SP = 148 kg/m²A 이후</p> <p>IF PZR Press = 148 kg/m²A -- 2 kg/m²A 4th actuation</p> <p>- 4th : RC-PIK-100 SP = 156 kg/m²A 이후</p> <p>IF PZR Press = 156 kg/m²A -- 2 kg/m²A</p> <p>- 5th : IF PZR Press >= 157 kg/m²A</p> <p>Do RC-PIK-100 SP = 158.2 kg/m²A 이후</p>	<p>3001-IV-55</p> <p>물수준도 2300ppm 이상 유지하기 위한 자동화</p> <p>1. RCS 압력이 137.1kg/m²A 이상이 되면 계통-3441-01 (안전주입계통)에 따라 안전주입유로의 물수준도를 2,800 ppm 이상으로 유지하기 위한 재순환 운동을 실시한다.</p>	[완료]		<p>3001-IV-18-1</p> <p>PZR과 RCS 동시가열</p> <p>주의사항</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 가열 중 PZR 가열률이 111 °C/hr를 초과해선 안 된다. 2. PZR 기포가 형성되어 있을 때 PZR내 냉각재 온도는 RCS고온관보다 27.8~188.9°C로 높게 유지되어야 한다. 3. PZR 모든 전열기는 NO P/NO T 도달 시까지 가능한 한 연속적으로 운전한다. <p>운전중인 RCP 02A/02B의 가압기압수밸브를 Open한다.</p>	<p>[완료]</p> <p>지도 :</p> <p>운전중인 RCP 02A/02B의 가압기압수밸브 = OPEN</p> <p>수동입력으로 변경</p> <p>9-431-V-0100F</p> <p>9-431-V-0100E</p> <p>넣어줌</p>	<p>주의사항) Information Provision</p> <p>DO 운전중인 RCP 02A/02B의 가압기압수밸브 = OPEN [가압기 압수밸브제어기 출력 = 100% (수동입력)]</p> <p>IF 운전중인 RCP 02A/02B의 가압기압수밸브 = OPEN</p> <p>THEN 절차 18-2 수행</p> <p>ELSE IF 절차 18-1 불만족</p> <p>THEN 운전원 조치/확인 대기</p> <p>END IF</p> <p>KAERI: 규칙변경-> 가압기 압수밸브제어기 출력을 주변 공정 변수 고려하면서 서서히 100%로 올리는 제어행위 (수동입력)</p> <p>운전중인 RCP 02A/02B의 가압기압수밸브 = OPEN [가압기 압수밸브제어기 출력 = 100% (수동입력)]</p> <p>DO CV-0442, CV-0443 and H-0100 Controller = Manual and OP = 100% 로 변경</p> <p>김정택 do H-0100 Controller = Manual and OP = 100%(20, 50, 80, 100% open 각각 Step 별 3초 time delay)</p>
--	------	--	---	------	--	---	---	---

Setpoint 설정치 출력 단계적 자동화

단계적 Valve Open 출력 자동화

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

AI Agent 기능 – 기기동작 자동화 시뮬레이터 DB 연계 기능

● 시험 절차번호

- “PZR 상부 배기유로 형성”, 3001-IV-14-1-나

● 시험입출력 / 절차서 기록지

- 시험입력 : 변수입력창 Action 목록의 PX-V005, 006 개방 신호
- 시뮬레이터 상태에 따라 자동작동
- 시험출력 : 시뮬레이터화면 밸브 (PX-V005, 006) 상태 개방 상태 (Red) 표시

APR1400 시뮬레이터



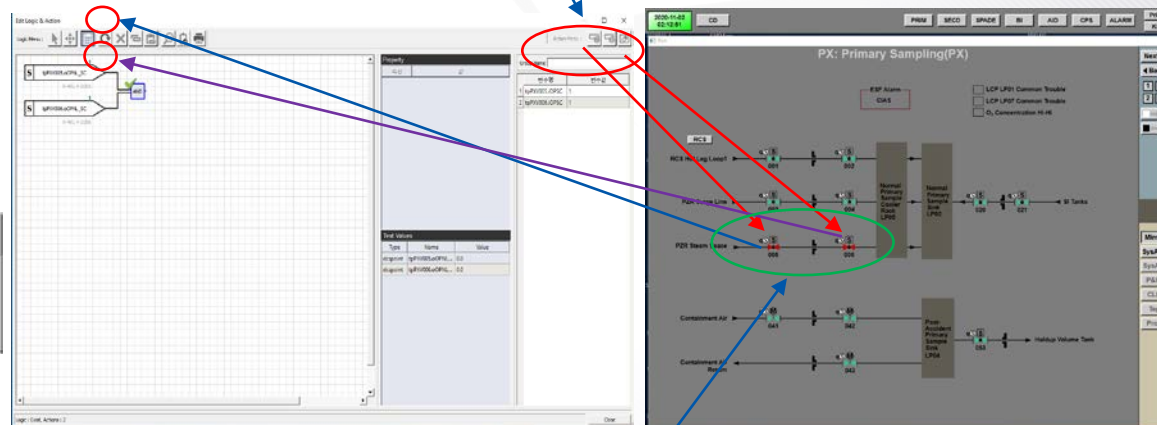
신호명	AI 에이전트 출력상태	시뮬레이터 상태	일치여부	판정
PZR 상부 1차측 시료채취 원자 로건을 격리밸브(PX-V005)	Open			
PZR 상부 1차측 시료채취 원자 로건을 격리밸브(PX-V006)	OPEN			
RCP (RC 02A)	START			

시험기록지

Action 신호 출력

Action 목록(시험입력)

절차번호	제목	절차서	절차공식	변수명	Tag No.
3001-IV-14-1-나	PZR 상부 배기유로 형성	PZR 상부 1차측 시료채취 원자 로건을 격리밸브 (PX-V005, 006)를 개방한다.	IF PZR 상부 1차측 시료채취 원자로건을 격리밸브 = OPEN THEN 절차 15-1 수행 ELSE IF 절차 15-1-나 불만족 THEN 운전원 조치확인 대기 END IF	PZR 상부 1차측 시료채취 원자로건을 격리밸브 (PX-V005, PX-006)	9-401-V-0005 9-401-V-0006



AI 에이전트

MMI (시험출력)

APR1400
시뮬레이터

한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

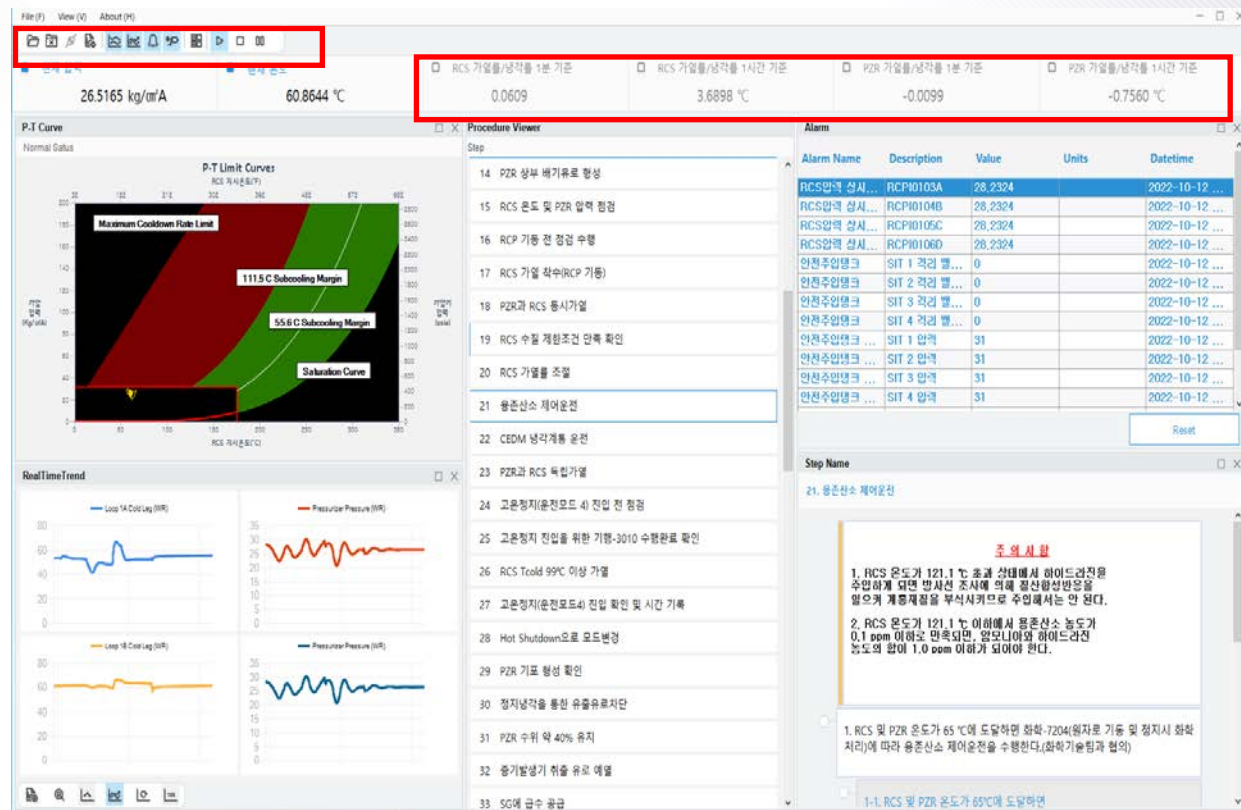
기동/정지 자동화시스템 AI Agent 운전 연계화면 모듈 구현

● AI Agent Main 화면

- P-T Curve 화면
- Trend 화면, 절차서 수행 화면
- 필수감시기능 경보 알람창 (압력/온도 안전구간 상시감시)
- 절차서 만족 평가 실행 화면

● 운전연계화면

- 가열률/냉각률 계산값 표시 (1분 or 1시간)
- 자동화운전 시작/정지 기능 버튼
- 운전원 자동계산기 실행 버튼 (SDM, ECP 등)



기동/정지 자동화시스템 AI Agent Main 화면

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

» 기동/정지 운전자동화시스템 – Control Agent 기능

- 기동 및 정지 운전 중 제어 자동화 구간에 대한 자동제어 로직 수행 기능
 - 수동 조작기기 단순 조작 명령
 - 제어규칙에 대한 제어자동화 수행
 - RCS 온도 가열률/냉각률 제어자동화 수행
 - RCS 온도/기기동작에 따른 S.P 조절 등 자동화 수행
 - APR1400 시뮬레이터 연계 수행
- AI Agent와의 운전 연계화면 기능
 - 수동 조작기기 명령 수행 여부 확인
 - AI Agent의 제어 출격신호 Control Agent 제어자동화 연계화면(DCS 제어블록) 처리



04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

» Control Agent 기능 구현 및 시험

DCS
모사 컴퓨터



Control Agent



APR1400
시뮬레이터

- 단순 제어기기 조작 기능
 - 펌프/밸브 Open / Close 기능
 - APR1400 시뮬레이터 연계 확인
- 제어자동화 수행
 - 제어규칙 PID 자동제어기 기능
 - APR1400 시뮬레이터 연계 확인
- AI 에이전트 연계기능
 - 수동 조작기기(펌프/밸브) 명령 확인
 - 제어자동화 주요입력(SP, PV, OP 등) 확인

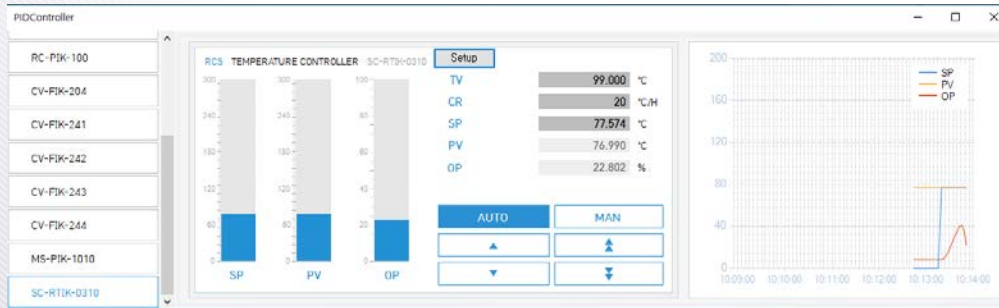
	Low	High	Value	Final	Delay	Ramp
0	100	100	100	100		
0	100	100	100	100		
0	100	100	100	100		
0	100	100	100	100		

04 연구개발 진행현황 및 성과

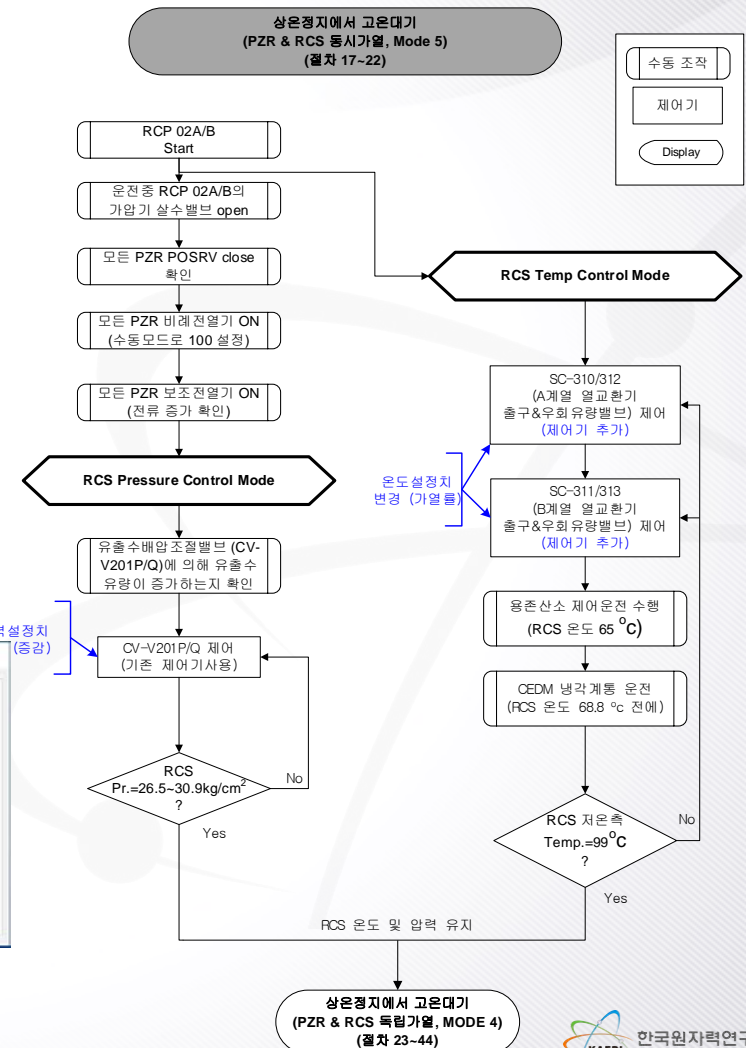
기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

Control Agent 자동제어 모듈 구현

- 3001-IV-18-4 : RCS 압력 자동제어 (기존 자동제어기 사용)
 - 제어대상 : 유출수 배압 조절밸브
 - 제어조건 : 26.6~28kg/cm² 로 유지 (PIK-201 사용)
- 3001-IV-20-1 : RCS 가열률 자동제어
 - 제어대상 : 열교환기 출구유량 제어밸브, 열교환기 우회유량 제어밸브
 - 제어조건 : Mode 4 진입조건 99 °C까지, 가열률 : 55°C/hr 이하



RCS 가열률 자동제어기



» Control Agent 자동제어 모듈 구현

- 상온경지에서 고온대기**
(PZR & RCS 독립가열, Mode 4)
(절차 23~44)
- 수동 조작
제어기
Display
- PZR 용전산소 수질 제한치 만족 확인
- 운전중 RCP 02A/B의 가압기 살수밸브 close
- 운전 모드 4 진입 전 점검
- ESF 작동계통 정상상태로 복귀
- 경보모드를 Hot Shutdown 모드로 변경
- RCS Pressure Control Mode
- PZR Level Control Mode
- 정지냉각계통을 통한 유출유로 차단
- 총선유량조절밸브 (CV-V212P/Q) 제어 (제어기 추가)
- 유출수 오리피스 우회조절밸브 (CV-V200) 제어 (밀접하게 Open ?)
- PZR Level = 40% ?
- Yes
- No
- PZR 기포형성 확인
- PZR 살수밸브 제어
- PZR 비례전열기 제어 (밀접하게 on ?)
- RCS Pr.=26.5~30.9kg/cm² ?
- Yes
- No
- RCS Temp Control Mode
- SC-310/312 (A계열 열교환기 출구&우회유량밸브) 제어 (제어기 추가)
- SC-311/313 (B계열 열교환기 출구&우회유량밸브) 제어 (제어기 추가)
- RCS 저온측 Temp.=177°C ?
- Yes
- No
- 고온대기 (MODE 3)
(절차 45~)
- PZR 살수밸브 막간 열어서 확인 by AI Agent
- 온도설정지 변경 (가열률)
- 발브개도 변경 by AI agent
- 한국원자력연구원

04 연구개발 진행현황 및 성과

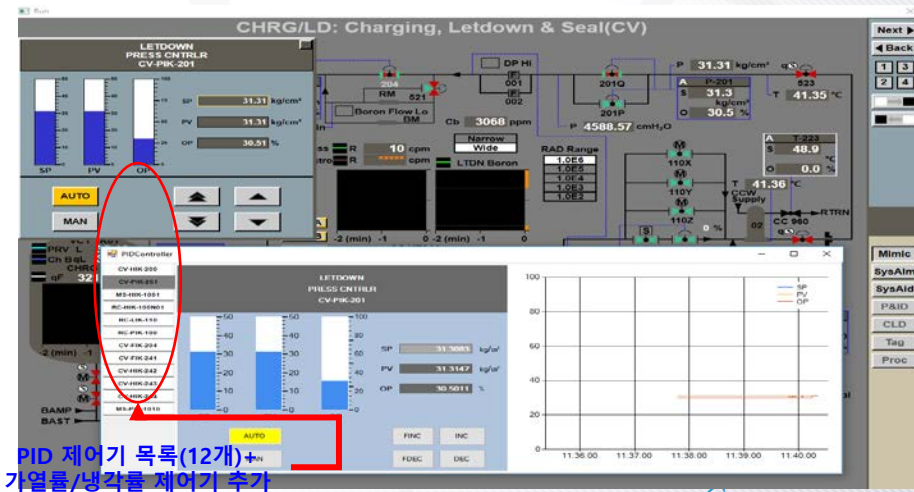
기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

Control Agent 운전 연계화면 모듈 구현

Control Agent 연계화면 구현

- PID, Trend Display window
- PID 제어기 목록(13개) 제공
 - 유출수 배압조절기 (CV-PIK-201) – 우측 그림
 - 방사능 감시기 유량제어기(CV-FIK-204)
 - 유출수 오리피스 우회조절밸브 유출유량 조절기(CV-HIK-200) ...
 - 신규 가열률/냉각률 제어기 추가

- 12개 PID 제어기 시뮬레이터 연계 모듈 개발
- AI Agent와 Control Agent 통합 연계 구현



PID 제어기 목록(12개) +
가열률/냉각률 제어기 추가

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

» Control Agent 기능 – 시뮬레이터 DB 연계 기능

● 시험절차번호

- “CVCS 방사능 감시기 유량제어”,
3001-IV-7-1

● 시험입출력 / 절차서 기록지

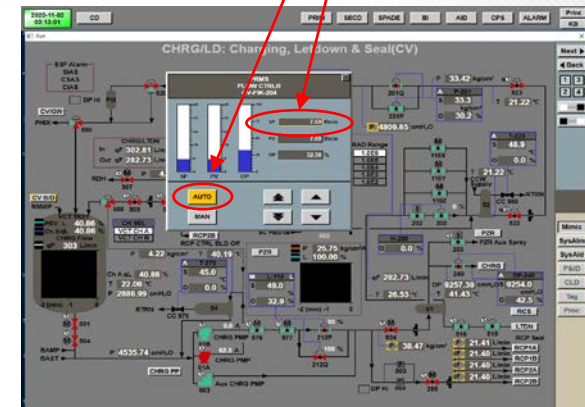
- 시험입력 : 연계화면 CV-FIK-204
유량 설정치 7.6, Auto로 설정
- 시험출력 : 시뮬레이터화면 제어기



Control 에이전트

제어기 명	신호명	Control 에이전트 출력 값/상태	시뮬레이터 값/상태	일치여부	판정
CVCS 방사능 감시기 유량제어기	유량 SP	7.6	7.6		
Auto/Manual		Auto	Auto		
가압기 수위제어	가압기 수위 SP	40	40		

시험기록지



APR1400
시뮬레이터

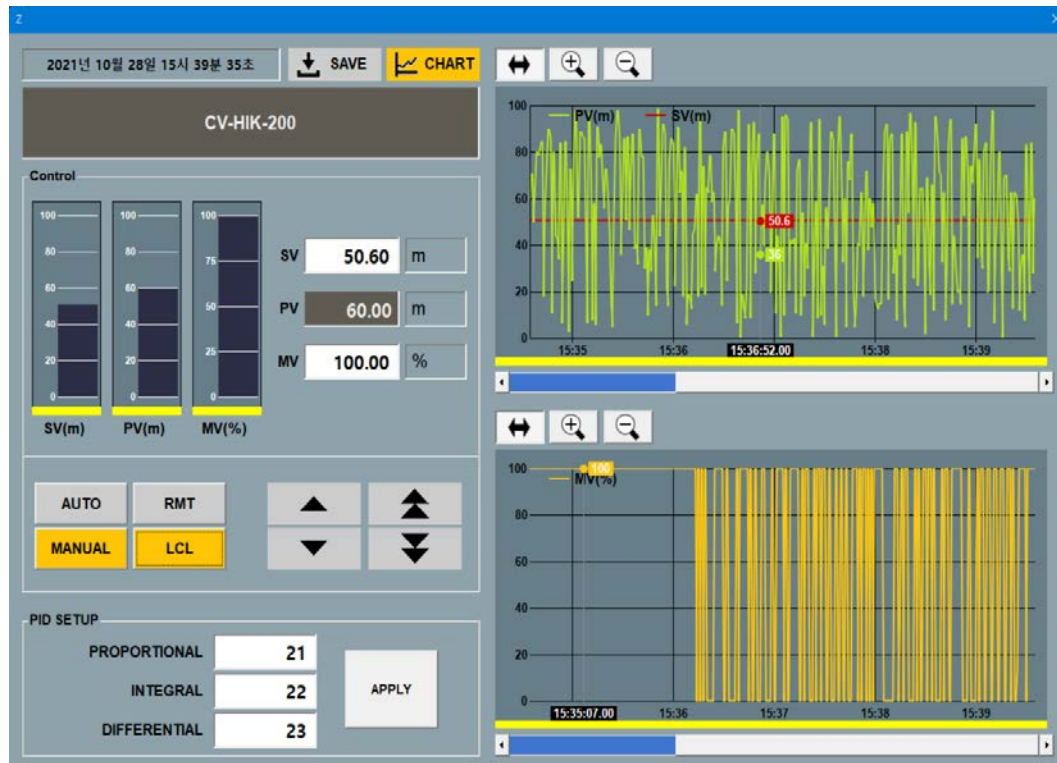
절차번호	제목	절차서	절차규격	연수명	Tag No.
3001-IV-7-1	CVCS 방사능 감시기 유량제어	CVCS 방사능 감시기 유량제어기 (CV-FIK-204) 유량을 7.6 (m³/hr)로 설정하고 자동으로 전환한다.	CVCS 방사능 감시기 유량제어기 (CV-FIK-204) = 7.6 (m³/hr)로 설정하고 자동으로 전환한다. (CV-FIK-204) 유량을 7.6 (m³/hr)로 설정하고 자동으로 전환한다. (CV-FIK-204) 유량을 7.6 (m³/hr)로 설정하고 자동으로 전환한다.	CVCS 방사능 감시기 유량제어기 (CV-FIK-204)	9-451 J-RK-2004

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

» APR1400 분산제어용 Control Agent 제어기 구현

- 가열률/냉각률 신규제어기용 P, I, D 계수값 설정 창 추가
- Heatup 또는 Cooldown 온도 제어를 위한 설정창 (target, heatup rate) 추가
- 제어된 결과 확인을 위해 setpoint, Process value, Manipulated value 를 확인할 수 있도록 트렌드 화면 추가



○ 가열 및 냉각 운전 자동화 시나리오

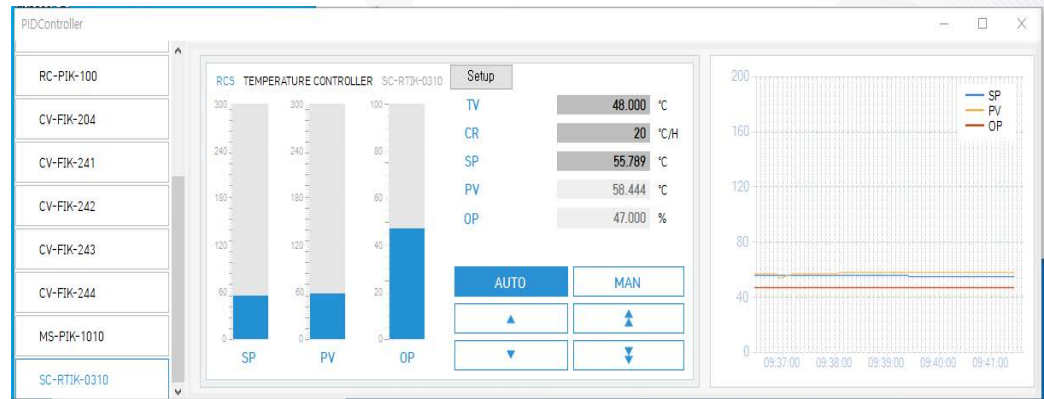
- AI Agent
 - target value와 heatup/cooldown rate 전송
- Control Agent
 - Heatup/cooldown rate에 따라 온도제어
 - target value에 도달하면 온도 유지

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

» Control Agent 기능 – 가열률/냉각률 제어기 기능 구현(PID) (1/2)

- 기능시험 범위
 - 개발된 PID 제어기의 user interface (제어기 화면) 기능 적합성
 - ‘상온정지 상태에서부터 고온대기 상태운전’ 절차에 따른 RCS 온도 및 RCS 압력 자동제어 기능 적합성
- PID 제어기 user interface 기능 시험 결과
 - 가열률/냉각률 제어기 기능
 - 설정치 모드 : Local/Remote
 - Local : 직접 설정 여부
 - Remote : AI Agent 로부터 설정 여부
 - 출력 모드 : Auto/Manual
 - Auto : 제어기 연산 결과 출력 여부
 - Manual : 직접 설정 여부
 - PID Setting 모드 : P/I/D value
 - PID set : PID 값 직접 설정 여부



가열률/냉각률 PID 제어기 user interface

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

» Control Agent 기능 – 가열률/냉각률 제어기 기능 및 시험 (PID) (2/2)

● RCS 온도 및 RCS 압력 자동제어 기능

➢ 기능 시험 항목

	제어수단	범위
RCS 온도제어	잔열제거펌프의 열교환기 출구측 조절밸브	상온에서 99°C까지 시간 당 28°C 이내로 가열
RCS 압력제어	유출유량 조절밸브	냉각재계통의 압력을 23 ~ 28kg/cm ² 로 유지

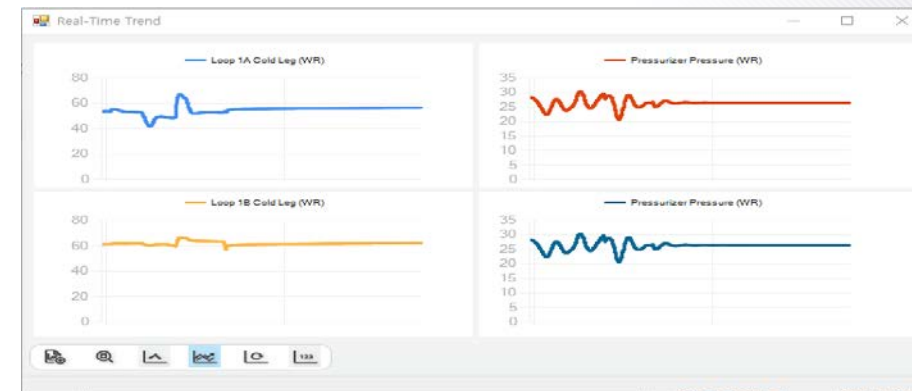
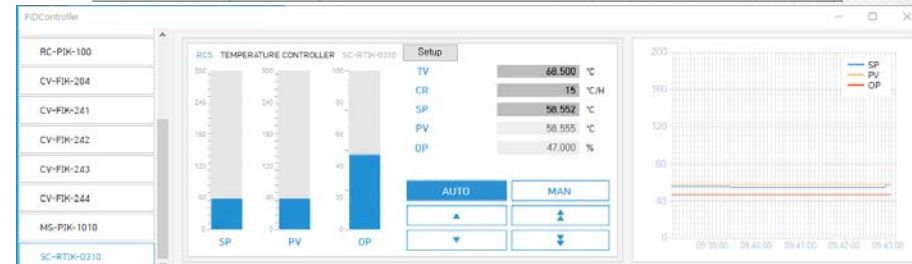
➢ 시험 결과

- RCS 온도제어

- 가열율 설정치 (시간당 20°C)에 따라 RCS 가열되는 것 확인
- RCP 기동에 따라 온도 변화 발생되지만, RCS 출구측 밸브 조절을 통해 온도 제어 가능

- RCS 압력제어

- 압력 설정치 (28.0 kg/cm²)에 따라 RCS 압력 제어 확인
- Back Pressure 밸브 S.P 조절에 따라 압력 변화 발생함



가열률 제어 출력에 따른 온도 및 압력제어 시험 결과

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 운전자동화시스템 논리기능 및 통합 성능검증 시험

» 기동/정지 자동화시스템 논리/기능 통합 시험 구성도



04 연구개발 진행현황 및 성과

» 운전자동화시스템 논리 및 기능시험

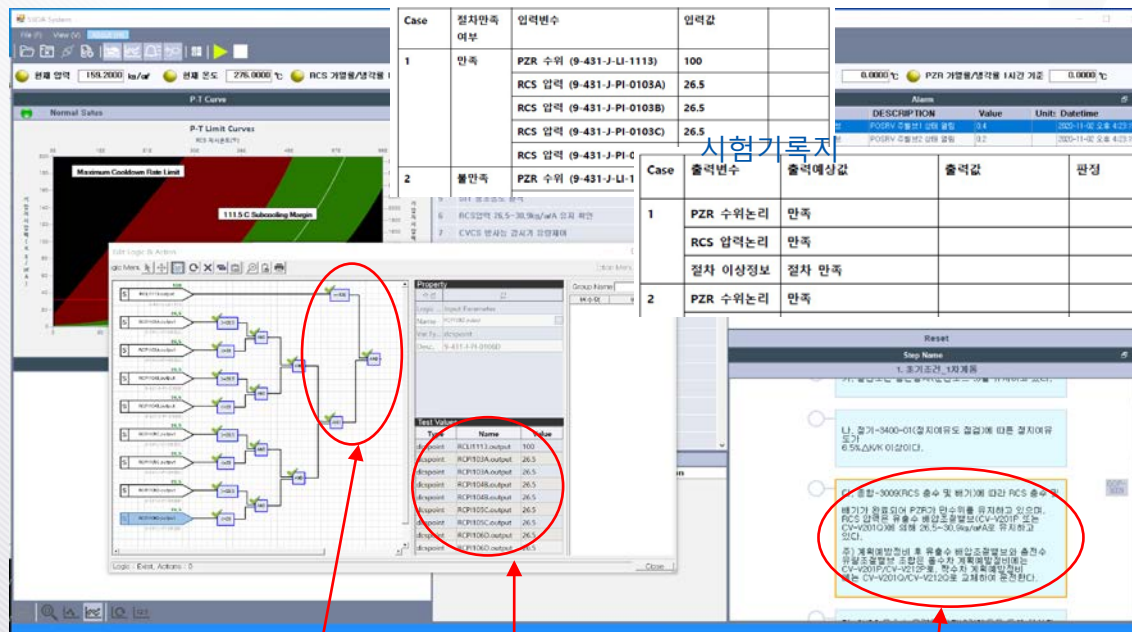
» AI Agent Logic 기능 시험

- 연계화면 기능
 - 발전소 상태 확인 화면 기능
 - 절차수행 화면 표시 기능
 - 필수감시 및 기타 경보 화면 확인 기능
 - 규칙설계를 위한 로직 뷰어 또는 편집기 기능



AI Agent

Interface

APR1400
시뮬레이터

시험출력

시험입력

실행 중인 지시문

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 기동/정지 운전자동화시스템 논리 구현

» 통합 기동/정지 운전자동화시스템 기능시험

● 통합 연계기능 사전시험

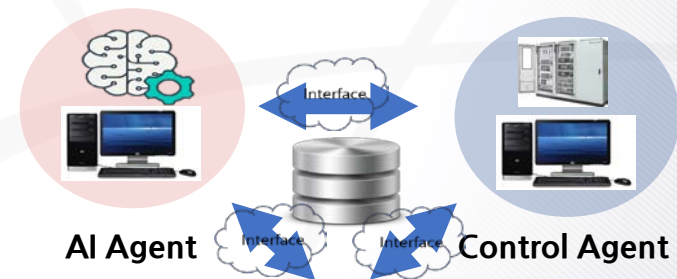
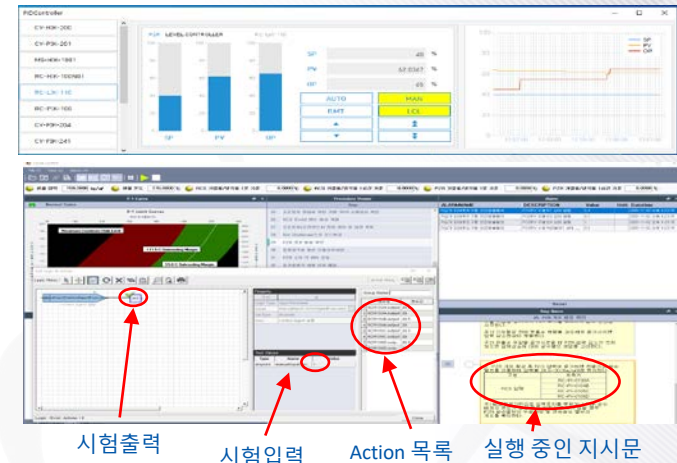
- AI 에이전트 - Control 에이전트 - ARP1400 시뮬레이터
- 통합 연계기능 확인 시나리오 수행

● 필수감시 기능

- 주요 기술지침서, 주의 및 제한사항의 상시 모니터링 기능 확인
- 초기조건/주의사항 확인을 위한 운전원 수동 계산 입력기 기능 확인

● 기동운전절차 자동화기능 통합시험

- 단순/전문가 규칙 자동화
- AI Agent/Control Agent 연계 제어규칙 자동화
- RCS 가열률/냉각률 제어 자동화 및 계통 영향 연계시험
- 수동입력규칙 자동화



ARP1400
시뮬레이터

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 통합 운전자동화시스템 논리 및 기능시험

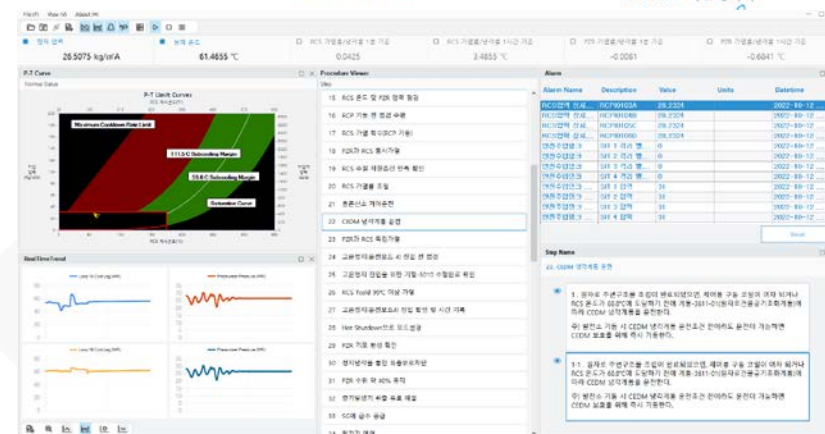
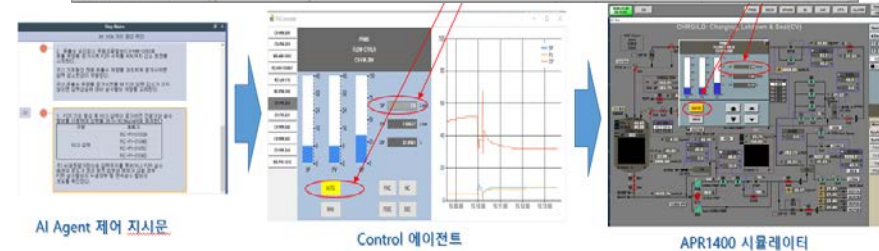
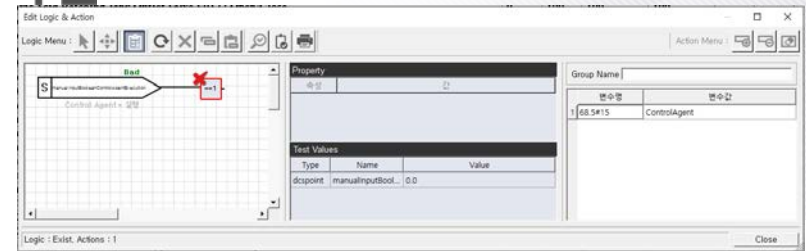
» 통합 기동/정지 운전자동화시스템 기능시험

● AI Agent/Control Agent/APR 1400 시뮬레이터 연계시험

- 데이터 송수신 시험
- MMI 화면 입출력 기능시험
- AI Agent에서의 운전 절차서 수행 기능 시험
- AI Agent에서 Control Agent로의 입출력 송수신 시험
- AI Agent에서 Control Agent로 출력된 제어 명령 수행
- APR 1400 시뮬레이터에서의 제어 명령 수행 결과 확인

➢ 통합 성능검증 시험

- ✓ 통합 시험 환경 구축 및 확인(CRI 시뮬레이터)
- ✓ 통합 기능 시험 수행
 - ✓ 종합 3001-IV-1-1(초기조건) ~ 3001-IV-52(RCS 압력 50.3 Kg/Cm²) : 가열, 기포생성, 압력 조절 절차수행 시험
 - ✓ 종합 3002-IV-5-1(붕산 희석) ~ 3002-IV-14(조절본 인출) : 가열 및 부분강, 제어봉 그룹 인출 시험
 - ✓ 종합 3004-IV-1(붕소균일화) ~ 3002-IV-20(저온관 온도 유지) : 정지 및 부분강 제어봉 그룹 삽입 시험
 - ✓ 종합 3005-IV-1(정지여유도 계산) ~ 3002-IV-21(유출유량조절) : 냉각, Rx 정지, 34.8 Kg/cm² 감압



통합 기능 절차서 수행 시험 화면

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 시작품 논리기능 및 통합 시험

- 원전 인허가 기반 운전자동화시스템 시험 계획서/절차서/보고서 작성
- 운전자동화시스템 주요 모듈 시에이전트 및 Control 에이전트 소프트웨어 시험
- 기동/정지 운전자동화시스템 논리/기능/통합 성능 검증 시험

기동/정지 운전자동화시스템 논리 및 기능확인
계획서
(System Test Plan for Startup and Shutdown Operation Automation System)

Rev. 01

한국원자력연구원

이 문서는 최종본은 한국원자력연구원에 있으며 한국원자력연구원의 동의 없이는 복사 또는 제3자에게 배포를 할 수 없다.

작성 자 : 일 시 : 2020. 08. 17
한국원자력연구원 / 김철환

작성 자 : 일 시 : 2020. 08. 17
한국원자력연구원 / 권기훈

검 토 자 : 일 시 : 2020. 08. 24
한국원자력연구원 / 권기훈

승 인 자 : 일 시 : 2020. 08. 31
한국원자력연구원 / 권기훈

발 행 일 : 2020. 08. 31

기동/정지 운전자동화시스템 논리 및 기능확인계획서 Rev.01 1/11 페이지

기동/정지 운전자동화시스템 논리 및 기능 시험
절차서
(Functional Test Procedure for Startup and Shutdown Operation Automation System)

Rev. 00

한국원자력연구원

이 문서는 최종본은 한국원자력연구원에 있으며 한국원자력연구원의 동의 없이는 복사 또는 제3자에게 배포를 할 수 없다.

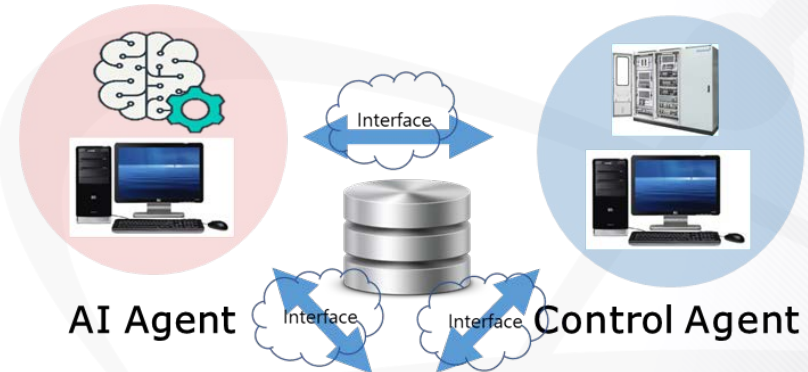
작성 자 : 일 시 : 2020. 08. 24
한국원자력연구원/김철환, 박정

검 토 자 : 일 시 : 2020. 08. 26
한국원자력연구원/김철환, 박정

검 토 자 : 일 시 : 2020. 08. 26
한국원자력연구원/김철환, 박정

승 인 자 : 일 시 : 2020. 08. 30
한국원자력연구원/김철환, 박정

발 행 일 : 2020. 08. 30



APR1400
시뮬레이터

표 7.3 시험 기록지 (Typical 예시 1)

CASE X

입력 종류	시험 입력값	출력 변수	출력 기대값	시험 출력값	완성 (P/F)
			Simulator 출력값	시험대상에서의 출력값 (회전 등)	
입력 변수 1	입력에 대한 응답 시험입력으로 확인 가능한 기술	시험입력으로 기대되는 출력 변수 기술	실제 측정된 출력값		
입력 m 변수					

변수명	변수값	동행도(시뮬레이터) 상태	예상 결과 만족 여부	AI Agent 상태 (결과 만족상태)	정정 (P or F)
가동 - XXXXX	가동기 30	수행 후 40	가동 만족	---	
	Thor	70 80			
	Charging VV 상태	off on			
	LD 펄스 상태	on			

04 연구개발 진행현황 및 성과

기동/정지 운전자동화시스템 개발 설계 문서 작성

기동/정지 자동화시스템 통합 논리 및 기능시험 계획서 및 절차서

- 운전자동화시스템 설계요건서, 설계사양서 등 설계문건 개발
- 운전자동화시스템 논리 및 기능시험, 통합시험 계획서 개정 (Rev.01)
 - AI 에이전트/Control 에이전트 상세 구현내용 따른 시험항목 개정
 - 운전자동화시스템 시험수행 전략 반영
- 운전자동화시스템 논리 및 기능시험, 통합시험을 위한 절차서 및 시험결과서 작성(Rev.00)
 - 운전자동화시스템 상세 시험범위 및 시험항목 기술
 - 시험수행 전략에 따른 시험 기록지 템플릿 개발 및 시험결과 기록

기동/정지 운전자동화시스템 논리 및 기능확인
계획서
(System Test Plan for Startup and Shutdown
Operation Automation System)

Rev. 01

한국원자력연구원

이 문서의 소유권은 한국원자력연구원에 있으며 한국원자력연구원의 동의
없이서는 복사 또는 제삼자에게 배포를 금함

작성 자 : 일 시 : 2020. 08. 1

한국원자력연구원 / 김장영

작성 자 : 일 시 : 2020. 08. 1

한국원자력연구원 / 전기준

검 토 자 : 일 시 : 2020. 08. 2

한국원자력연구원 / 공종훈

승 인 자 :

한국원자

발 행 일 : 20

기동/정지 운전자동화시스템

기동/정지 운전자동화시스템 논리 및 기능 시험
절차서
(Functional Test Procedure for Startup and
Shutdown Operation Automation System)

Rev. 00

한국원자력연구원

이 문서의 소유권은 한국원자력연구원에 있으며 한국원자력연구원의 동의
없이서는 복사 또는 제삼자에게 배포를 금함

일 시 : 2020. 08. 24

김정택, 허성

일 시 : 2020. 08. 26

김장영

일 시 : 2020. 08. 26

공종훈

일 시 : 2020. 08. 30

구서룡

기동/정지 운전자동화시스템 논리 및
기능시험보고서
(Functional Test Report for Startup and
Shutdown Operation Automation System)

Rev. 00

한국원자력연구원

이 문서의 소유권은 한국원자력연구원에 있으며 한국원자력연구원의 동의
없이서는 복사 또는 제삼자에게 배포를 금함

작성 자 : 일 시 : 2020. 12. 16

한국원자력연구원/김장영, 공종훈, 유재환

검 토 자 : 일 시 : 2020. 12. 16

한국원자력연구원/장영석

검 토 자 : 일 시 : 2020. 12. 19

한국원자력연구원/장영석

승 인 자 : 일 시 : 2020. 12. 19

한국원자력연구원/구서룡

발 행 일 : 2020. 12. 18

표 7.3 시험 기록지 (Typical 예시 1)

CASE X

입력 종류	시험 입력값	출력 변수	출력 기대값	시험 출력값	판정 (P/F)
				Simulator 출력값 시험대상에서 의 출력값 (화면 등)	
입력변수_1	입력에 대한 응답 으로 확인 가능한 변수 기술	시험입력으로 기대되는 출력 값	실제 측정된 출 력값		
입력 m 변수					

CS.1.2 시험 입력 및 결과 기록

절차명	절차번호	AI Agent 시험번호 및 입력값			AI Agent 결과/상태	Control 에 이전트 결과/상태	사용자/이전트 결과/상태	절차종료 (OK)	절차 중단 사유	판정 (P/F)
		입력변수명	입력값 Name Tag	수동입력						
초기화 전 17개 검토	3001-IV-1-1-가	불연속 운전모드	CRKOPER		5	NA	5	O	none	none
	3001-IV-1-1-나	정지여유도		7.5%±K/K	7.5%±K/K			O		
	3001-IV-1-1-다	PZR 수위	9-431-2-4-1113		100		100	O		
		RCS 입력	9-431-3-4-0103A		28.06		27.07			
			9-431-3-4-0104B		28.06		27.08			
			9-431-3-4-0105C		28.06		27.07			
			9-431-3-4-0106D		28.06		27.09			
	3001-IV-1-1-라	CVCS 유출수 유량	9-451-3-4-0102		345.1		354.96	O		
	3001-IV-1-1-마	정지보전검출 유량	9-441-3-4-0302A		17025		17024			
			9-441-3-4-0305B		17025		17024	O		
	정지보전검출	9-441-3-4-0301B		On		On				

04 연구개발 진행현황 및 성과

» 운전원 조작빈도 분석 및 정량적 평가

- 조작빈도 분석 결과 규칙기반 운전자동화에 따라 48.5%의 운전자동화를 가능
- 운전자동화에 의한 운전원 작업부하 경감을 47.26% [약 1/2 작업부하 경감효과]

구분		측정방법	비고
직무빈도	감시직무빈도	(자동화 적용후 감시직무 횟수)/(기존 감시직무 횟수)	감시, 확인, 기록, 판단
	수동조작빈도	(자동화 적용후 수동조작 횟수)/(기존 수동조작 횟수)	제어, 계산
운전원 작업부하		(자동화 적용후 작업부하)/(기존 작업부하)	직무별 부하가중치(난이도) 적용

절차서	운전자동화 이전		운전자동화 이후		자동화율
			수동	자동	
3001	전체 항목수	198	64	134	67.68%
	감시직무빈도	124	38	86	69.40%
	수동조작빈도	74	26	48	64.90%
3002	전체 항목수	171	126	45	26.32%
	감시직무빈도	66	40	26	39.40%
	수동조작빈도	105	86	19	18.10%
합계	전체 항목수	369	190	179	48.5%
	감시직무빈도	190	78	112	58.9%
	수동조작빈도	179	112	67	37.4%

절차서	총 작업부하	자동화 담당부하	잔여 작업부하	작업부하 경감을
3001	1023.53	665.9	357.6	65.07%
3002	836.30	213.0	623.3	25.47%
합계	1859.83	878.9	980.9	47.26%



05 연구개발 성과 : 운전원 시연

» 기동/정지 운전자동화시스템 운전원 시연

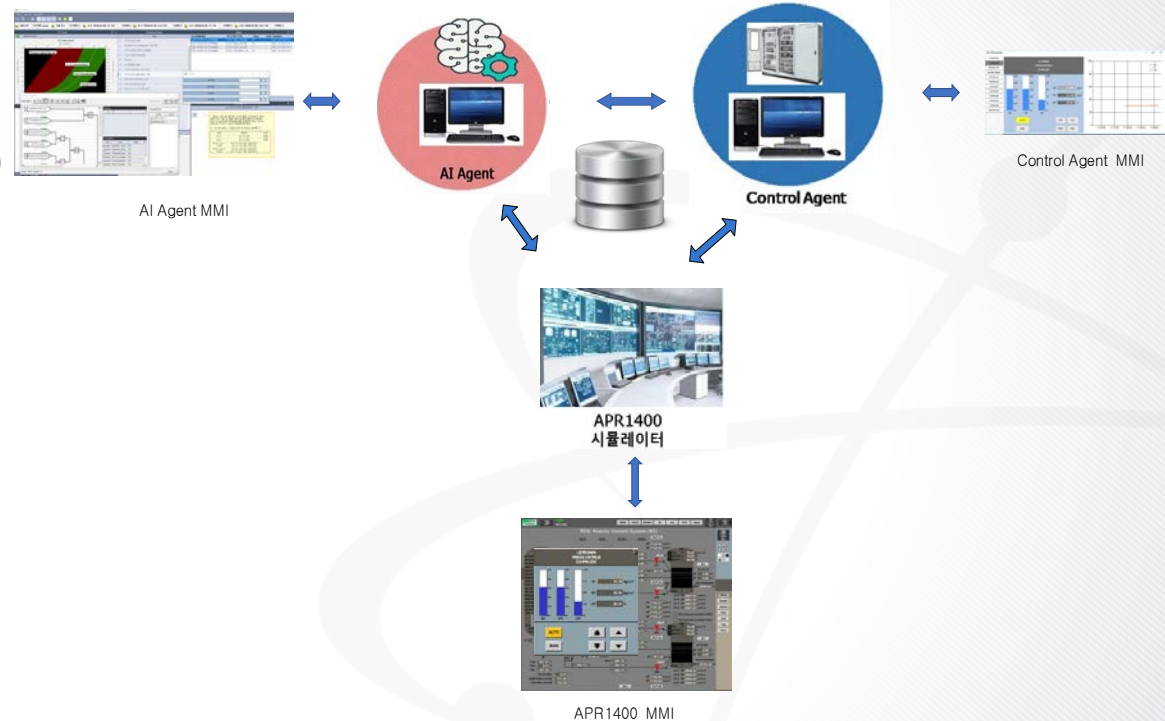
» 기동/정지 운전자동화시스템(OAS) 현장 운전원 시연

● CRI 현장설치 구성

- AI 에이전트 (PC/화면)
- Control 에이전트(PC/화면)
- APR1400 시뮬레이터

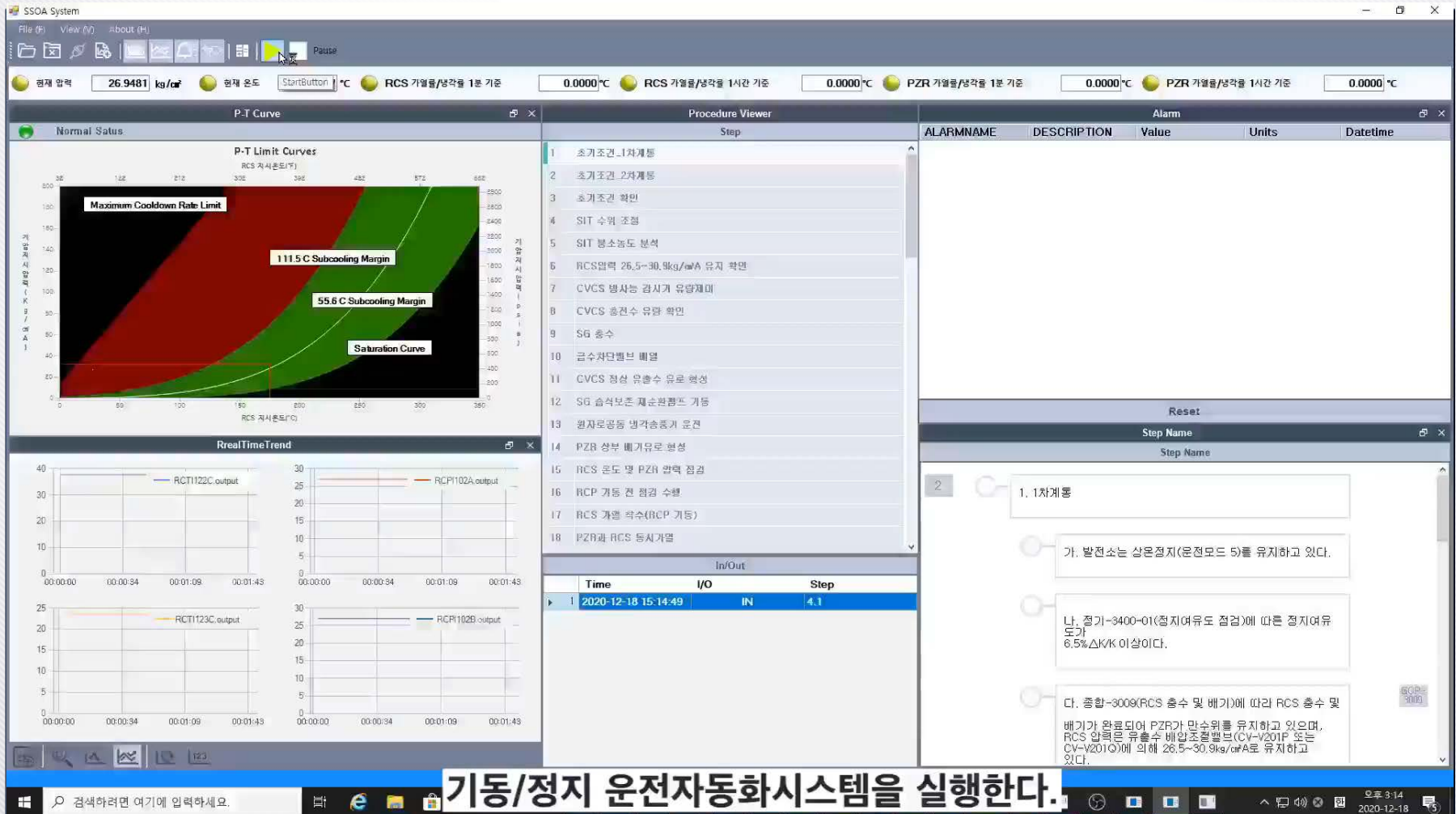
● CRI 현장시연 시나리오(안)

- 1. AI 에이전트 / Control 에이전트 개별 기능시험
- 2. 기능시험 동영상 Play
- 3. 기동운전 일정구간 시연 (3001-IV-1 ~ 3001-IV-23)



05 연구개발 성과 : 운전원 시연

기동/정지 운전자동화시스템 기동운전구간 시연 영상



기동/정지 운전자동화시스템을 실행한다.

05 연구개발 성과 : 운전원 시연

» 기동/정지 운전자동화시스템 시연 운전원 의견 요약

- 초기조건 확인 등 단순작업 등은 자동화 좋음, CPS와 통합하여 적용하면 좋을 것임. CPS Upgrade 시 통합 추가하면 좋겠음.
- 가열/냉각/가압기 저압/증기발생기 저압 설정치 자동 Reset 기능 유용
- 가열/냉각 제어중 RCS 압력제어 자동화 필요/현장의견 반영, 발전부와 협력 필요
- 기동/정지 자동화시스템의 사용을 위해 계통의 운영 사전 교육이 필요함.

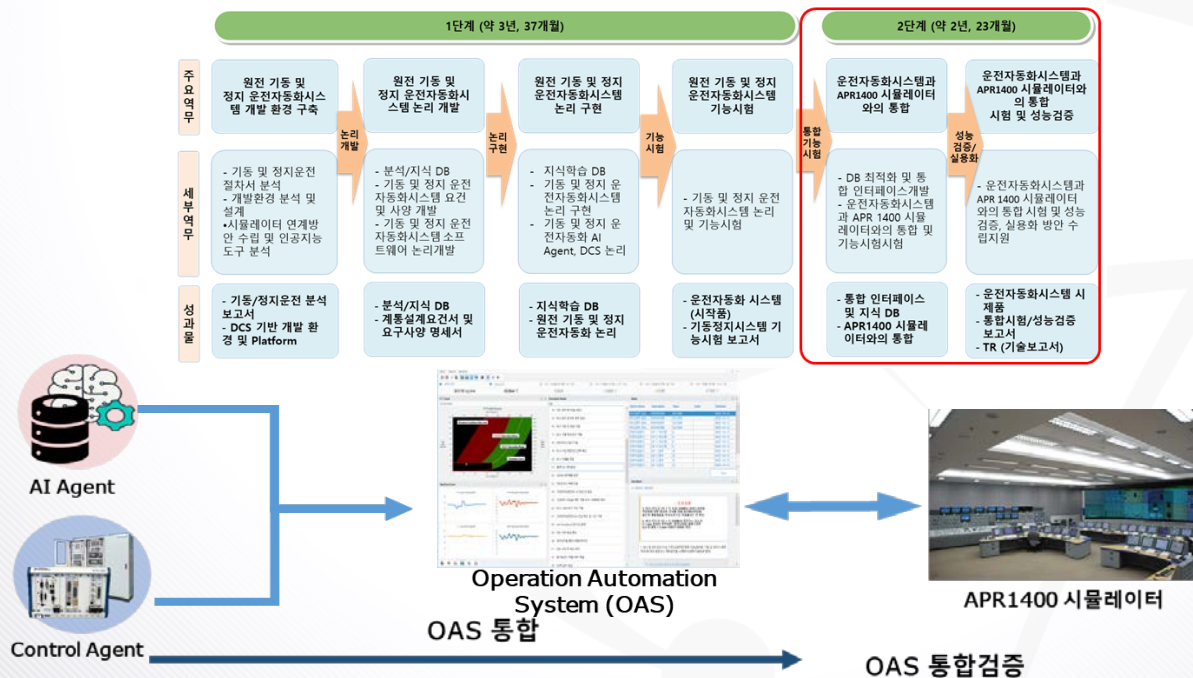
다음은 주관적인 의견을 묻는 설문지입니다. 질문에 맞게 본인의 의견을 기술해주시기 바랍니다.

질문	답변
1 운전자동화시스템에서 보완이 필요한 사항이 있었습니까? 있다면, 그렇게 생각한 이유는 무엇입니까?	자동화관련 부분, 초기조건 자동화 등 시스템은 완성했습니다. 보완할 것인데, 각 장치의 조치가 자동화 되어 다른 부분이 영향을 미치는 부분도 자동화가 되었으면 좋겠습니다. 그리고 자동제어 절차의 경우 상세 발령을 운전하고 있는 발전부 검토를 직접할 수 있으면 합니다.
2 본인의 경험을 참고하여, 이 운전자동화시스템에 추가로 필요한 기능을 제안하고 싶은 것이 있습니까?	자동화가 시작되는 시점을 추진해야 할 필요한 기능은 보완으로 보완됩니다.
3 향후 발전소에 적용된다면, 어떤 계통을 가장 많이 확인할 것 같습니다? 또, 그렇게 생각한 이유는 무엇입니까?	냉각 및 가열조절 (냉각 및 가열 관련) 해당내용은 자동화로 확인해야 되는 부분과 자동화가 되면 강령이 포함될 것 같고 다른 많은 냉각할 수 있는 장점이 될 것입니다.
4 향후 발전소에 적용된다면, 어떤 운전원에게 제공되는 것 이 필요하다고 생각합니까? (SS, SRO, RO, EO, TO) 또, 그렇게 생각한 이유는 무엇입니까?	RO, TO, EO 이유: 대용량 중화처리장비 또는 실제조작을 하는 운전원에게 모두 필요한 것으로 보입니다. (중화처리장비 모든 운전원들 조작함에 있음)
5 운전자동화시스템에 대한 주관적인 평가를 자유롭게 기술 해주시시오.	모든 자동화를 하는 것보다 중화처리의 루틴만으로 냉각 및 가열 관련, 만약에 한해서 한계제어 (RCP 운전대행력, LTOP 개항만 자동 제어 등) 일부 운전원들의 조작으로 작업해야 되는 부분 절차에 중점적으로 관심하여 시작 을 포함 높이는 쪽을 생각하겠습니다. 초기조건 자동화는 좋았습니다.

06 연구개발 향후 계획 및 Summary

» 통합 기동/정지 운전자동화시스템 상용화 및 인허가 추진

- 발전소 시뮬레이터 통합와 기동/정지 운전자동화시스템(OAS) 통합 시험
- 기동/정지 운전자동화시스템(OAS) 실용화 방안 수립 및 인허가 추진
 - 단계적 실용화 : 일부기능 CPS와 통합 적용(절차확인 및 단순 규칙 우선 적용)
 - ISMR, SMART 100 등 신규 원전 설계적용





THANK YOU