

하나로 불시 정지 및 비정상 현상에 대한  
원인 분석 및 조치

The Cause Analysis and Follow-up Action for Reactor  
Trip and Unanticipated Operational Occurrences in  
HANARO

*KAERI*

## 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2010년도 “하나로 운전” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2010. 00. 00.

주 저 자 : 강 인 혁

공 저 자 : 이 충 성

인 원 호

김 희 곤

이 민 우

황 정 식

이 번 현

박 주 훈

임 경 환

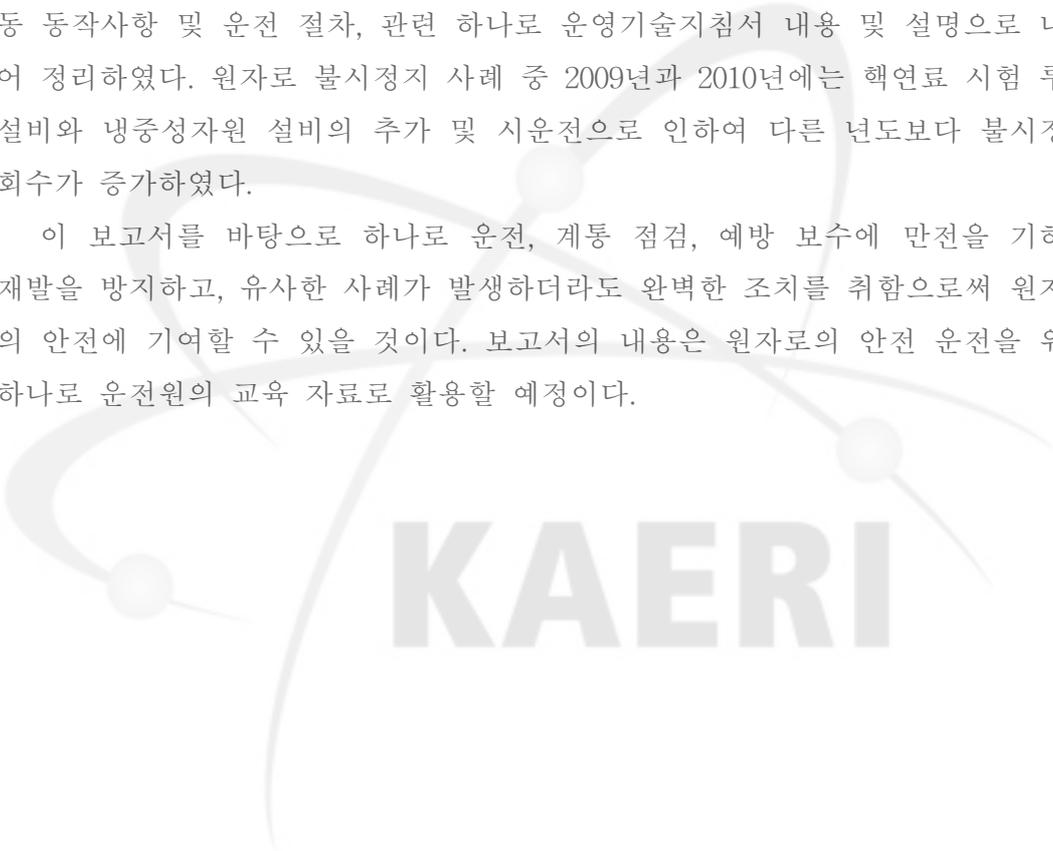
KAERI

## 요 약 문

연구용 원자로인 하나로는 1995년 첫 임계를 달성하였다. 본 보고서는 2006년부터 2010년까지 운전하면서 발생한 원자로의 불시정지 및 비정상 사례를 연도별 순으로 구분하여 자료를 수집, 분석하였다.

원자로 불시정지 및 비정상 발생 원인을 살펴보면 제어봉 고장, 1/2차 냉각계통 고장 및 누수, 핵연료 손상, 정전, 기타계통 및 추가된 설비로 인하여 발생한 경우가 대다수였다. 발생한 사건들을 증상, 현황 및 원인, 조치 사항 및 결과, 자동 동작사항 및 운전 절차, 관련 하나로 운영기술지침서 내용 및 설명으로 나누어 정리하였다. 원자로 불시정지 사례 중 2009년과 2010년에는 핵연료 시험 루프 설비와 냉중성자원 설비의 추가 및 시운전으로 인하여 다른 년도보다 불시정지 회수가 증가하였다.

이 보고서를 바탕으로 하나로 운전, 계통 점검, 예방 보수에 만전을 기하여 재발을 방지하고, 유사한 사례가 발생하더라도 완벽한 조치를 취함으로써 원자로의 안전에 기여할 수 있을 것이다. 보고서의 내용은 원자로의 안전 운전을 위한 하나로 운전원의 교육 자료로 활용할 예정이다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features the word "KAERI" in a bold, sans-serif font. Above the text is a stylized graphic consisting of several curved lines and circles, resembling a nuclear reactor or a scientific instrument. The entire logo is rendered in a light gray color.

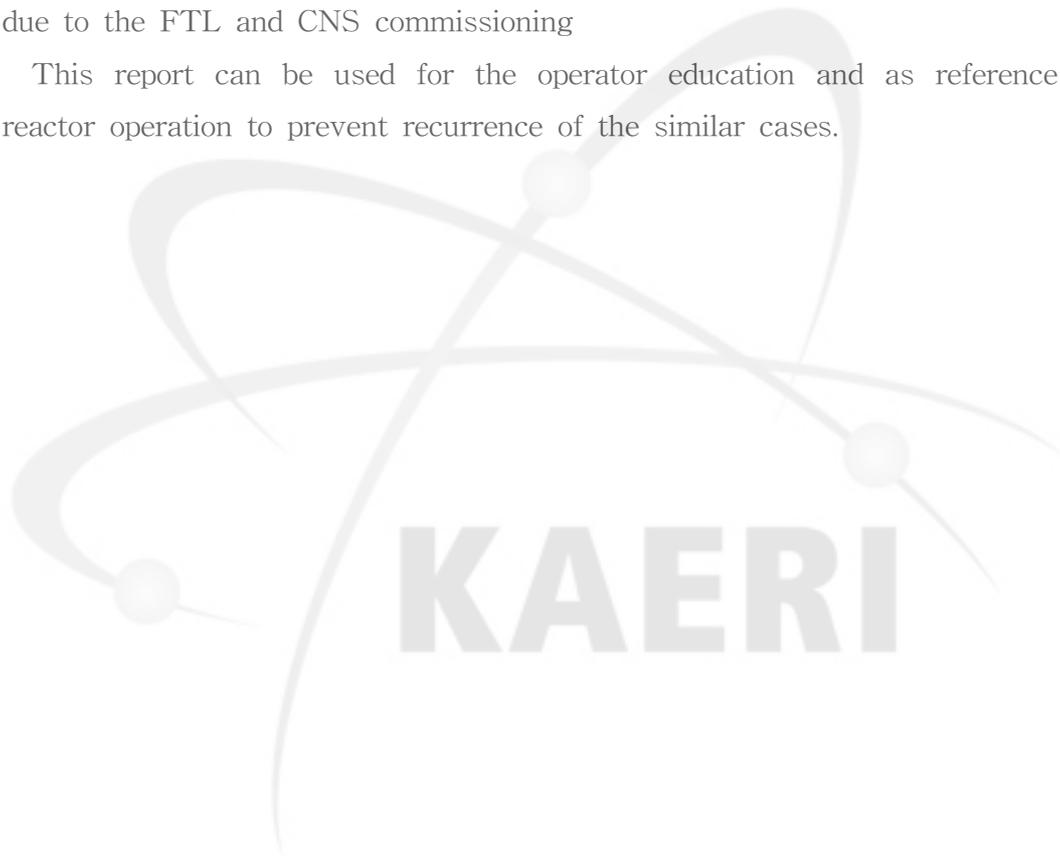
KAERI

## SUMMARY

HANARO achieved first criticality in 1995. In this report, the reactor trip and unanticipated operational occurrences in HANARO from 2006 to 2010 are described and analysed.

Most of the reactor trip and unanticipated operational occurrences, are caused by control rod trouble, leakage in the primary and secondary cooling system, blackout, abnormal of FTL(Fuel Test Loop) and CNS(Cold Neutron Source) system. Particularly most of reactor trips occurred in 2009 and 2010, due to the FTL and CNS commissioning

This report can be used for the operator education and as reference of reactor operation to prevent recurrence of the similar cases.

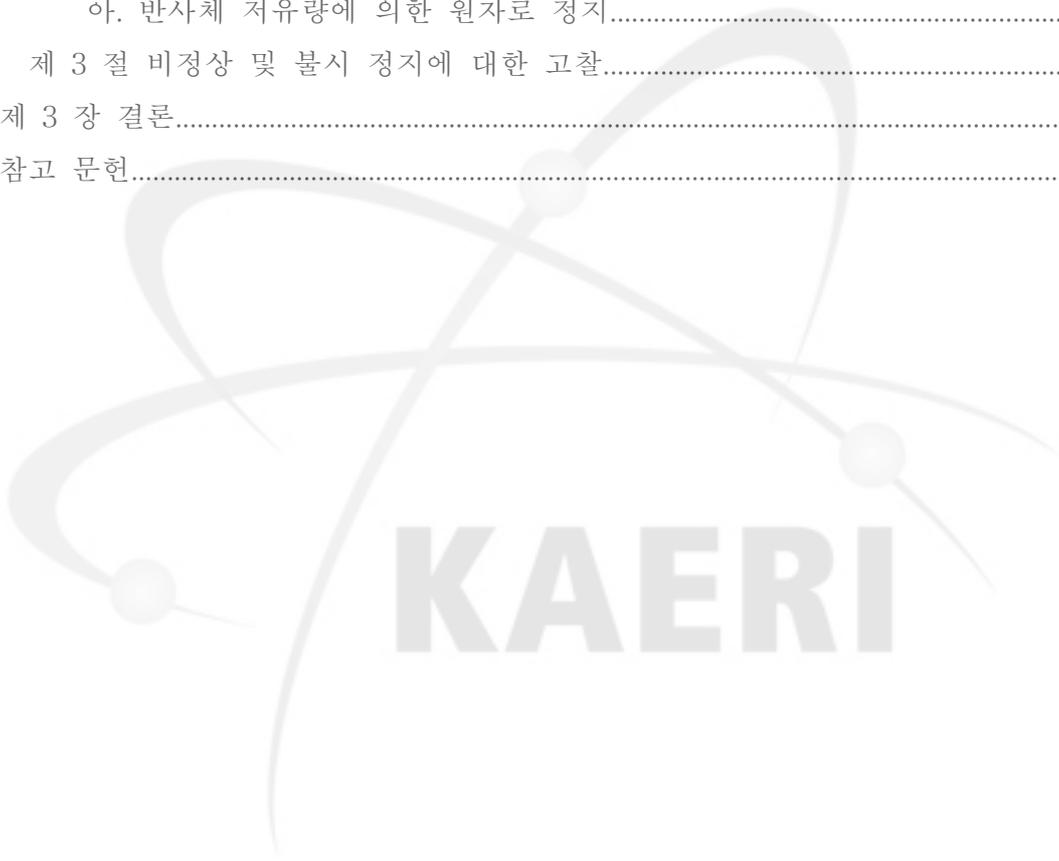


## 목 차

제출문.....	i
요약문.....	ii
Summary.....	iii
목차.....	iv
제 1 장 서론.....	1
제 2 장 본론.....	3
제 1 절 원자로 계통/설비 비정상 사례.....	3
1. 2006년 사례.....	3
가. 주제어반 A 채널 트립 경보 발생.....	3
나. 원자로 제어계통 A 채널 Log Power 비정상.....	4
다. 1차 냉각펌프 #1 Seal 누수.....	5
라. 운전 중 원자로 수조 수위의 간헐적 저수위 경보 후 복구현상 발 생.....	6
마. 2차 열교환기 출구유량 0 지시.....	10
바. 1차 정화펌프 베어링 하우징 오일누유.....	11
사. 원자로 보호계통 B 채널 중성자 출력 고경보 발생.....	11
아. 1차 냉각펌프 #1 오일 저수위경보 발생.....	13
자. 사용후 냉각펌프 #1 Seal 냉각라인 누수.....	13
차. 제어봉 #1 인출 시 Encoder 에러의 간헐적 발생.....	14
2. 2007년 사례.....	15
가. 제어봉 #2 고장 경보 발생.....	16
나. 원자로 출구온도 - 1 지시값 비정상.....	17
3. 2008년 사례.....	18
가. RCI 삼중수소 농도 증가로 인한 출력 감발.....	18
나. 2차 냉각펌프 토출 & 약품펌프 배관과의 결합 Pipe 누수.....	19
다. DC 24V A 채널 전원 공급기 비정상 경보.....	20
라. 원자로 출구온도 신호처리기 지시값 비정상.....	21
마. RCI 덕트 감시기 고경보 발생.....	22
바. 핵연료 파손 감시계통 지발 중성자 값 상승.....	25
사. 비상냉각수 공급계통의 수위스위치 극저수위 경보 발생.....	26

아. 1차 배관(PCS Pipe) 누수 경고 발생.....	27
4. 2009년 사례.....	29
가. 원자로 보호계통 C 채널 중성자 중출력 경고 발생.....	29
나. 핵연료(KHH-028) 손상.....	30
다. OWS 선형출력 지시치 비정상.....	32
라. 순간정전발생.....	32
마. 제어봉 #2 인출 비정상.....	33
바. 1차 냉각펌프 #2 오일 레벨 저수위 경고 발생.....	35
사. 핵연료 누설 비정상.....	36
아. 제어봉 #2 고장 경고 발생.....	36
5. 2010년 사례.....	37
가. 원자로 건물 일부 정전.....	37
나. 스마트 캡슐 조사시험 시 연결부 결함발생.....	38
다. 제어봉 #2 고장 경고 발생.....	39
라. 2차 냉각계통 Basin 레벨 저-저 수위 경고 발생.....	40
마. 1차 냉각계통 Pipe 누설 경고 발생.....	41
바. 제어봉 #2 고장으로 인한 출력 감발.....	43
제 2 절 원자로 불시 정지 사례.....	45
1. 2006년 사례.....	45
가. 연구원내 정전으로 인한 원자로 정지.....	45
나. 수조상부 고방사선으로 인한 원자로 정지.....	46
2. 2007년 사례.....	47
가. 외부전원 상실로 인한 순간정전으로 원자로 정지.....	47
나. 제어봉 MOFR에 의한 원자로 정지.....	49
3. 2008년 사례.....	50
가. 제어봉 MOFR에 의한 원자로 정지.....	50
4. 2009년 사례.....	52
가. 중성자 고출력에 의한 원자로 정지.....	52
나. 중성자 대수출력 고증가율로 인한 원자로 정지.....	53
다. 중성자 고출력에 의한 원자로 정지.....	54
라. 중성자 고출력에 의한 원자로 정지.....	55
마. 냉중성자원 수소계통 고압력에 의한 원자로 정지.....	56

5. 2010년 사례.....	58
가. 냉중성자원 수소 고압력에 의한 원자로 정지.....	58
나. 냉중성자원 수소 고압력에 의한 원자로 정지.....	59
다. 원자로 제어계통 정지(MLC Board 이상).....	59
라. 냉중성자원 수소 고압력에 의한 원자로 정지.....	62
마. 원자로 출구 고온도에 의한 원자로 정지.....	63
바. 냉중성자원 수소 고압력에 의한 원자로 수동 정지.....	64
사. 제어봉 MOFR에 의한 원자로 정지.....	65
아. 반사체 저유량에 의한 원자로 정지.....	67
제 3 절 비정상 및 불시 정지에 대한 고찰.....	68
제 3 장 결론.....	71
참고 문헌.....	72



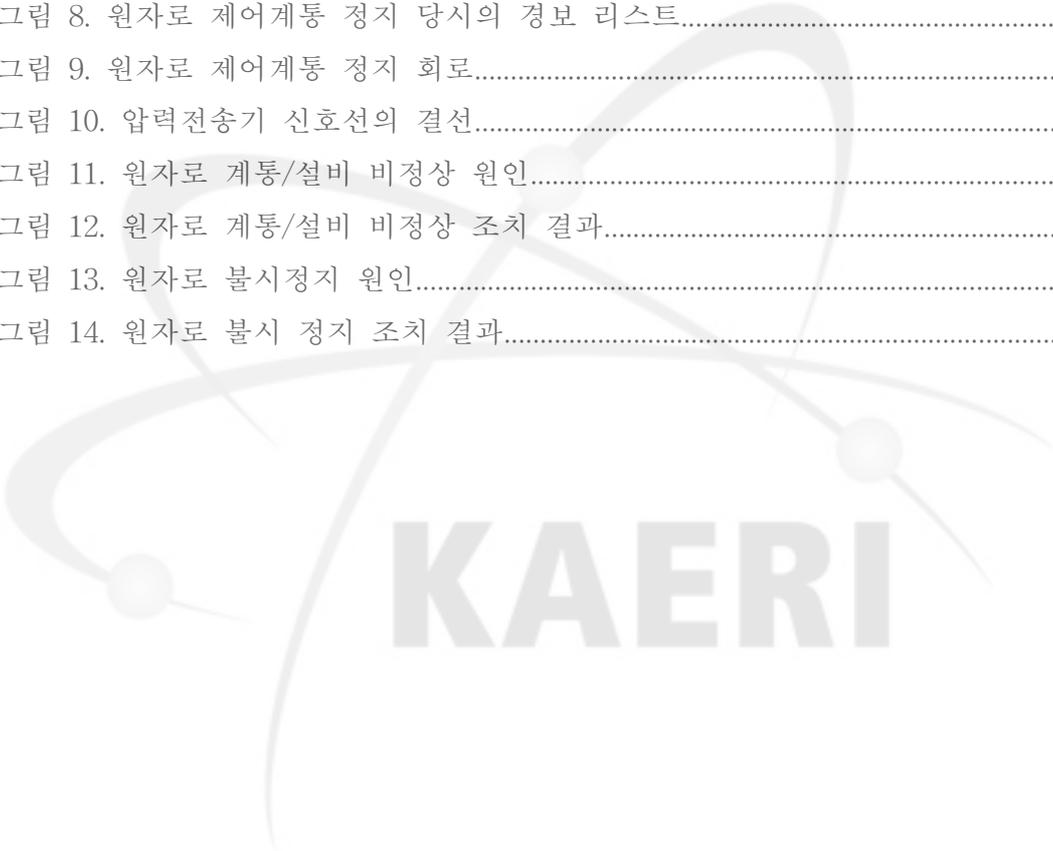
## 표 목차

표 1. 저항/전류 변환기 교체 후 교정 결과.....	8
표 2. 노이즈 차폐선 재 결선 및 저항/전류 변환기 교체 후 시험 결과.....	8



## 그림 목차

그림 1. 하나로 불시 정지 횟수.....	1
그림 2. 1차 핵연료 굽힘.....	31
그림 3. 2차 핵연료 굽힘.....	31
그림 4. 노심 구조물(1).....	31
그림 5. 노심 구조물(2).....	31
그림 6. Shroud Top 과 SOR1 접촉전.....	32
그림 7. Shroud Top 과 SOR1 접촉후.....	32
그림 8. 원자로 제어계통 정지 당시의 경보 리스트.....	60
그림 9. 원자로 제어계통 정지 회로.....	60
그림 10. 압력전송기 신호선의 결선.....	62
그림 11. 원자로 계통/설비 비정상 원인.....	68
그림 12. 원자로 계통/설비 비정상 조치 결과.....	69
그림 13. 원자로 불시정지 원인.....	69
그림 14. 원자로 불시 정지 조치 결과.....	70



KAERI

## 제 1 장 서론

하나로는 1995년 2월에 첫 임계에 도달한 이후로 핵연료 및 재료의 조사 실험, 동위원소 생산, 재료 및 핵연료 조사 시험, 중성자 빔을 이용한 연구, 중성자 방사화 분석, 중성자 도핑(NTD : neutron transmutation doping) 반도체 생산에 이용되고 있다. 최근 핵연료 조사시험 루프(FTL : fuel test loop)와 냉중성자원 설비(CNS : cold neutron source)를 설치하여 상업용 원자로에 쓰이는 핵연료 개발과 냉중성자를 활용한 연구에 활용할 하고 있다.

하나로는 2004년 12월부터 30MW로 운전 중이며 운전 주기는 1998년부터 2002년 6월(17주기)까지는 1주일을 기본으로 하여 주초 2~3일 동안 핵연료 검사와 계통 점검 및 유지 보수 작업을 수행한 후 3~4일간의 원자로 운전을 반복하였다. 2002년 6월(18주기)부터 2003년 8월(26주기)까지는 1주일 동안 핵연료 검사 및 계통 점검을 수행하고 2주일간 원자로 운전을 하였다. 2003년 8월(27주기)부터 2005년 1월(35-2주기)까지는 18일 운전 10일 정지하는 방식으로 운전되었으며, 2005년 2월(36주기)부터 2009년 12월(61주기)까지는 23일 운전 / 12일 정지하는 방식으로 운전하였다. 2010년 1월(62주기)부터 2010년 3월(63주기)까지는 26일 운전 및 10일 정지, 2010년 3월(64주기)부터 2010년 6월(65주기)까지는 27일 운전 및 7일 정지, 2010년 6월부터는 28일 운전 및 10일 정지로 바뀌었다. 정지 기간에는 핵연료 검사 및 재장전, 계통 유지보수 등을 수행한다.

그림 1은 1997년 이후 원자로 불시 정지 횟수를 보여준다.

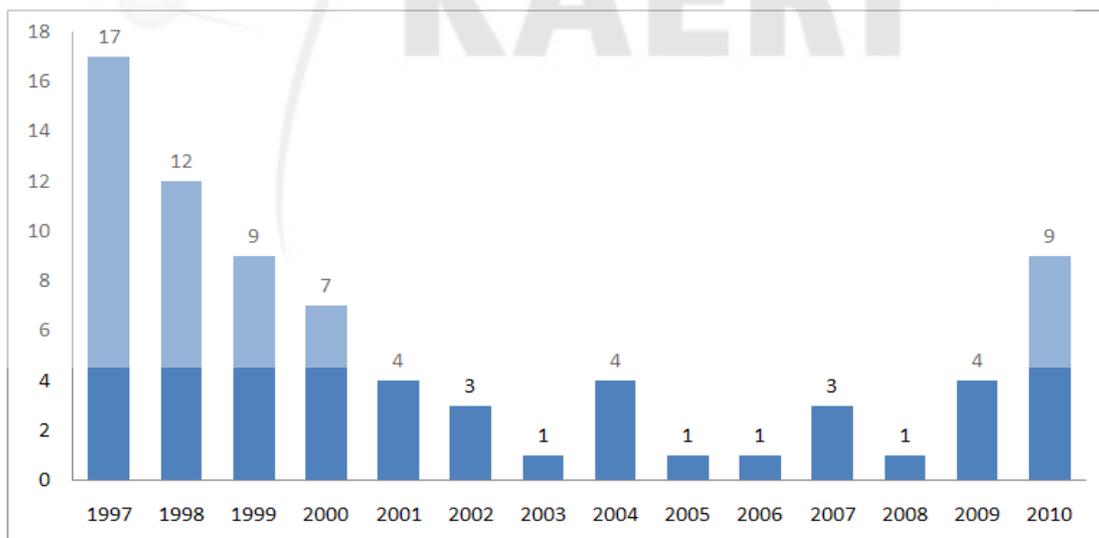


그림 1. 하나로 불시 정지 횟수

1997년 이후 불시 정지 횟수가 줄다가 2009년부터 증가하는데 이는 노내에 핵연료 조사시험 장치와 CNS 설비가 하나로에 설치되어 시운전을 수행하는 과정에

서 예기치 않은 원자로 정지가 발생하는데 기인한다.

본 보고서는 2006년부터 2010년까지 5년간 운전 기간 중 발생한 원자로 비정상사례와 불시 정지 사례를 정리하였다. 불시 정지와 비정상 사례를 분석하여 앞으로 유사한 일이 발생하지 않도록 하나로 운전, 계통점검, 예방 보수에 반영할 예정이다.



## 제 2 장 본론

### 제 1 절 원자로 계통/설비 비정상 사례

#### 1. 2006년 사례

##### 가. 주제어반 A 채널 트립 경고 발생

운전주기 및 날짜 : 40주기 운전, 2006. 01. 14

##### (1) 증상

(가) OWS상 G02.6의 'Coolant Flow High A 채널 경고가 발생하였다.

##### (2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW로 운전 중, 원자로 보호계통 A 채널 1차 고유량 트립 경고 발생하였다.

(나) 확인 결과 유량 센서 내 Air Vent가 제대로 되어 있지 않았다.

##### (3) 조치사항 및 결과

(가) 원자로 정지 후 유량센서를 Air Vent 시킨 후, 유량이 정상적으로 지시되는 것을 확인하였다.

##### (4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 하나로 유량 측정 채널의 고장.

① 유량 측정 채널기기의 고장 또는 1차 냉각 계통 유량의 비정상적으로 인하여 고유량(110 % F.P), 저유량(70 % F.P) 및 저-저유량 (60 % F.P) 등에 의한 채널 정지가 발생할 수 있다.

② 2개 이상의 채널이 동시에 비정상이면 원자로가 자동으로 정지된다.

③ 원자로 보호계통과 제어계통은 서로 독립적으로 설치 및 사용되므로 보호계통 유량 관련 기기의 고장으로 인한 원자로 제어계통의 영향은 없다.

##### (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 일차 냉각계통은 노심을 항상 안전한 온도 범위내로 유지하기 위하여 노심에 냉각수를 순환시키는 계통이다. 일차 냉각계통의 주순환 유로는 냉각수 순환 경로에 따라 노심내의 유동관, 침니, 2개의 유출관, 2대의 펌프 및 열교환기를 거쳐 1개의 공통 유입관, 그리고 유입 플레넴으로 구성되며, 원자로가 들어 있는 원자로 수조 및 일차 정화계통과 연결되어 있다. 우회순환 유로의 냉각수는 공통 유입관상에 연결된 우회 유로를 통하여 원자로 수조의 바닥 근처로 방출된 후 원자로 외벽을 따라

상승하여 침니 상단에 도달되면 대부분 침니 개구부를 통하여 유출관으로 유입된다. 냉각계통의 설계유량은 780 kg/sec 이며, 이중 주순환 유로를 통해 703 kg/sec이 노심을 통과하고, 77 kg/sec는 우회관로를 통하여 순환한다. 또한, 일부의 냉각수가 우회회로를 통하여 수조로 방출되더라도 일차 냉각계통은 핵분열 생성물에 대한 3차 방벽으로서의 기능도 수행한다. 특히 침니 상단에서의 하향유로는 노심에서 생성된 N16과 같은 방사화 생성물이 수조 표면으로 상승하는 것을 억제한다.

(나) 냉각수 고유량 정지변수는 일차 냉각계통 배관과단사고에 대비하기 위한 것으로서 운전형태에 상관없이 동작되는 정지변수이다. 이 변수에 대응되는 사고의 상세 유형 수조 내 일차 냉각계통 원자로 입구 측 배관과단 사고와 수조 밖 일차 냉각계통 원자로 입구 측/유량계 후단의 배관과단 사고가 있다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

나. 원자로 제어계통 A 채널 Log Power 비정상

운전주기 및 날짜 : 40주기 운전, 2006. 01. 10/27

(1) 증상

(가) 원자로 제어계통 A 채널의 Log Power가 비정상적으로 지시하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 1월 10일 원자로출력 30 MW로 운전 중 원자로 제어계통 A 채널 Log Power 지시값이 95 % 상태에서 85 % 정도를 지시하다가 시간이 지나면서 5.8 %를 지시하였다.

(나) 1월 27일 원자로를 정지하기 직전에는 약 2 %를 지시하다가 원자로 정지 후 Under 상태가 되었다.

(다) 확인 결과 전치 증폭기(Preamplifier)고장이었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 원자로 제어계통 A 채널 신호처리기 내부 +/- 15 V DC 전원 공급상태 점검 결과 이상 없었다.

(나) 원자로 제어계통 A 채널 Test SW 점검 결과 모두 정상이었다.

(다) 원자로 제어계통 A 채널의 Log amp board(A5)를 운전 여유분으로 교체하였다.

- (라) 원자로 제어계통 A 채널 채널의 현장 신호증폭기 내부 Discriminator and Bandpass Filter PCA (A8)의 Offset voltage 점검 결과 이상이 없었다.
- (마) 원자로 제어계통 A 채널 신호증폭기 내부의 전치 증폭기를 교체하였다.(비정상에서 정상으로 회복).
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
  - (가) 원자로 제어 알고리즘은 3개의 채널이 모두 정상일 때는 3채널의 신호 (선형출력, 대수출력, 대수출력 변화율)중 중간 값을 선택 사용하고 한 채널이 고장일 경우는 해당 채널을 제어 알고리즘에서 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않는다. 한 채널이 제어알고리즘에서 제외되면 나머지 2채널의 신호 중 높은 값을 선택하여 사용한다.
  - (나) 2개 이상의 채널이 동시에 고장 나면 원자로는 자동으로 정지된다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
  - (가) 중성자출력 연동에 따른 원자로 정지는 저출력연동과 고출력연동의 2가지가 있다. 저출력연동은 1 %F.P 이상의 출력에서만 냉각수 저-저 유량과 일차 냉각계통 저-저 압력 정지변수가 동작되도록 한다. 1 %F.P 미만의 출력에서는 물론 이들 정지변수를 자동적으로 우회시킨다. 고출력 연동은 55 %F.P 이상의 출력에서만 냉각수 저유량과 일차 냉각계통 저압력 정지변수가 동작되도록 한다. 마찬가지로 55 %F.P 미만의 출력에서는 저유량 및 저압력 정지변수를 우회시킨다. 저출력 연동은 중성자 대수출력 신호를 이용하고, 고출력 연동은 중성자 선형출력 신호를 이용한다.
  - (나) 원자로 보호계통 정지변수에는 중성자 출력 준위 저-저출력(1 %F.P)과 저출력(55 %F.P)이 있다. 중성자 출력 선형신호와 출력준위 정지 핸드스위치가 병렬로 연결되어 있어 출력준위 정지 핸드스위치가 1 %F.P Valid로 선택되어 있으면 저-저출력과 저출력 정지가 모두 유효하며, 55 %F.P Valid로 선택되어 있으면 저출력 정지만이 유효하고, 115 %F.P Valid로 선택되어 있으면 저저출력과 저출력 정지가 모두 우회된다.
- (6) 절차서 반영 필요사항
  - (가) 없음

다. 1차 냉각펌프 #1 Seal 누수

운전주기 및 날짜 : 40주기 운전, 2006. 01. 27

(1) 증상

- (가) 1차 냉각펌프 #1 Seal 누수 경보가 발생하였다.
- (2) 현황 및 원인
  - (가) 원자로 정지 후, 1차 냉각펌프 #1에서 Seal leakage경보가 발생하였다.
  - (나) 현장 확인 결과 Mechanical Seal 누수임을 확인하였다.
- (3) 조치사항 및 결과
  - (가) 예비품으로 교체하여 펌프 기동하고 누수가 없음을 확인하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
  - (가) 1차 냉각 펌프는 원자로 수조 수위가 저-저수위(11.7m)이고 동시에 유량계(331-FT-034)의 지시가 저유량(492 kg/s)이면 자동으로 정지된다.
  - (나) 1차 냉각수 우회 유량 밸브(331-HV-037)와 1차 정화계통 밸브(333-HV-002)는 원자로수조 저-저 수위 (11.7 m) 에서 자동으로 닫힌다.
  - (다) 1차 정화 계통 펌프가 원자로 수조 수위 저-저수위(11.7 m)에서 자동 정지된다.
  - (라) 원자로 수조 수위가 저-저 수위 (11.7 m)가 되면 정지봉 펌프 흡입관의 공기 유입으로 원자로는 자동 정지된다.
  - (마) 배수조 펌프의 자동 운전 모드에서 원자로 배수조가 고수위(1.19 m)이상이고 동위원소 생산시설에 있는 액체 폐기물 저장 탱크 수위가 고-고수위 미만일 때 수위 스위치(346-LS-014)에 의해 제1번 펌프(346-P01)가 기동하며, 계속해서 배수조 수위가 고-고수위(1.30 m)에 이르면 수위 스위치(346-LS-015)에 의해 제 2번 펌프(346-P02)기동한다. 또한 배수조 수위가 저수위(0.6 m)에 이르면 펌프는 자동 정지한다.
  - (바) 원자로 수조 수위가 극저수위(4.80 m)에 도달되면 제어실 주제어반 JP-3의 WIN18과 OWS(G51/4/5/6/7)에 경보가 발생하여 비상 보충수 주입 격리밸브 (346-LV001/002/003/004)가 자동으로 열려 비상 보충수 공급이 시작되고, 저-저-저-수위 (4.90 m)에 도달되면 OWS에 경보가 발생 (G51/1/2/3/8)되고 비상 보충수 주입이 중지된다.
  - (사) 원자로 수조 수위가 극저수위(4.8 m)에 도달되고 원자로 배수조 수위가 고수위(1.19m)이상 이거나 고-고수위(1.30 m) 이면 액체폐기물 이송밸브(LV007)가 닫히면서 액체폐기물이 원자로 수조 내로 유입된다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
  - (가) 누설 부위가 확인되었을 때 누설율이 1 GPM 이하이면 최소한 4 시간

에 1회씩 누설율을 확인해가며 최대 4주간 운전을 계속할 수 있다. 그러나, 누설율이 1 GPM을 초과하거나 누설율의 증가가 1일 2배 이상이면 원자로를 정지하여야 한다. 또한, 총 누설량이 액체 폐기물 처리 능력 및 저장 능력을 초과할 때에도 즉시 원자로를 정지하여야 한다.

(나) 미확인 누설의 경우는 1시간 이내에 경보기의 오작동 여부를 확인하고, 경보기가 정상적이며 원자로를 즉시 정지하여야 한다. 단, 경보기의 오동작으로 확인된 경우는 다음에 따른다.

(다) 누설검출기중 어느 하나 이상이 운전 불가능 상태가 되면 원자로 수조 수위 및 원자로실 배수조 수위를 최소한 12시간에 1회씩 확인해가며 최대 4주간 운전을 계속할 수 있다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

라. 운전 중 원자로 수조 수위의 간헐적 저수위 경보 후 복구현상 발생

운전주기 및 날짜 : 40주기 운전, 2006. 02. 03

(1) 증상

(가) 원자로 수조수위의 비정상적인 저수위 경보가 수차례 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 수조 수위가 변함이 없음에도 불구하고, 저수위 경보가 발생하였다.

(나) 과거 수조수 전송기와 관련된 문제는 원자로 정상 환기팬을 기동할 경우에만 수조수위 신호가 언더 슈팅을 하는 불안정한 현상을 여러 차례 보인 적이 있었다.

(다) 확인 결과 분전반 판넬에서 노이즈 차폐선 처리가 비정상적으로 되어 있었다.

(라) 신호를 보내는 발신부와 이 신호를 받는 수신부 사이의 노이즈 차폐선은 둘 중 한곳에만 접지가 되어야 하나 MLC와 분전반 판넬 두 곳 모두에서 2중으로 되어 있었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 운전 정지 후 원자로 수조 상부에서 수위 전송기를 신호선과 분리하여 재교정한 결과 편차가 발생하지 않았다.

(나) 수조 상부 계측기로부터 분전반 판넬 및 MLC 까지의 신호선의 이상 유무를 전체적으로 점검하였다.

- (다) MLC 에서만 접지가 되도록 체결 상태를 재구성 하였다.
- (라) 이 수위 전송기에 설치된 저항/전류 변환기의 노후화로 인한 노이즈를 예상하여 새로운 저항/전류 변환기로 교체 후 교정한 결과 정상이었다.

기준입력 (% of Span)	교정 전(mA)	교정 후(mA)	비고
0%	3.89	4.00	12.10 - 12.20m 에서도 정상 확인
50%	12.03	12.00	
100%	20.09	20.01	

표 1. 저항/전류 변환기 교체 후 교정 결과

- (마) 노이즈 차폐선 재 결선 및 저항/전류 변환기 교체 후 현장 시험 실시하였다.(아래 표는 환기팬의 기동 및 정지를 반복하면서 동일한 현상이 발생하는지 확인한 것임).

정상환기 기동여부	횟수	교체 전(meter)	교체 후(meter)	비고
기동 시	1차	12.20 → 12.09	변화 없음	정상 확인
	2차	12.20 → 12.11		
	3차	12.20 → 12.08		
정지 시	1차	12.20 → 12.07	변화 없음	
	2차	12.20 → 12.17		
	3차	12.20 → 12.13		

표 2. 노이즈 차폐선 재 결선 및 저항/전류 변환기 교체 후 시험 결과

- (바) 정상 환기가 계속 가동 중인 상황에서 약 8일(2월 13일 - 20일)동안 수위변화 관찰결과 특이 사항 없었다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
  - (가) 원자로 수조 수위 비정상 감소
    - ① 원자로 수조 수위가 저 수위(12.15 m)에 도달 시 자동 모드에서 원자로 수조 밸브(722-LV005)가 열린다.
    - ② 원자로실 배수조 수위 1.19 m에서 배수조 펌프 1 대(346-N-P01 또는 P02)가 자동으로 기동하고, 수위 1.30 m에서 나머지 1 대의 펌프도 자동으로 기동(G52.1, G52.2)되어 동위원소 생산시설 액체 폐기물 저장 탱크로 이송된다.
    - ③ 배수조 수위가 0.6 m에 도달하면, 운전중인 배수조 펌프가 정지한다. 핵

연료 시험 루프 제 2기기실 씬프 수위가 증가하면 핵연료 시험 루프 폐기물 저장 및 이송 계통 절차(HANTAP-05-OD-ROP-OP-65)에 따라 조치한다.

- ④ 원자로 수조 수위가 11.7 m(저-저 수위)에 도달하면, 아래 사항이 발생한다.
- ㉠ 정지봉 펌프의 흡입구 노출로 인한 원자로 정지된다.
  - ㉡ 1차 정화 펌프(333-P01)가 정지된다.
  - ㉢ 노심 우회 밸브(331-HV037)가 닫힌다.
  - ㉣ 1차 정화 계통의 원자로 수조측 밸브(333-HV002)가 닫힌다.
  - ㉤ 1차 냉각 펌프(331-P01/02) 2대가 동시에 정지된다.(단, 1차 냉각수 고유량 또는 저 유량시)
  - ㉬ 원자로 수조 고방사능 및 1차 고방사능이 원자로 정지 설정치(6,600 cps)를 초과하여 정상 환기 계통이 정지되고 비상 환기 계통이 자동으로 기동된다.
  - ㉭ 원자로 수조가 극저 수위(4.80 m)까지 감소되면 비상 보충수 공급 밸브(346-LV001/002/ 003/004)가 열리고, 액체 폐기물 이송 밸브(346-LV007)가 자동으로 닫혀 비상 보충수가 약 11.4 kg/sec로 원자로 수조에 공급된다.
  - ㉮ 이때, 원자로실 배수조 수위가 1.19 m 이상이면 원자로실 배수조 펌프(346-P01/02)가 자동 기동되어 재순환 모드로 전환되어 원자로실 배수조의 물이 약 13.1 kg/sec로 원자로 수조에 공급된다.
  - ㉯ 제어반 미믹패널(661-JP-14)에 비상 보충수 공급 밸브(346-LV001/002/003/004)의 열림 표시등과 액체 폐기물 이송 밸브(346-LV007)의 닫힘 표시등이 점등된다.
  - ㉺ 제어실 OWS에 비상 보충수 공급 밸브의 열림 상태 표시등(G50.1/2/3/4)이 점등된다.
  - ㉻ 만일, 극저(4.80 m) 수위 상태에서 5초 후에도 저-저-저 수위(4.9 m)로 증가되지 않고 액체 폐기물 이송 밸브(346-LV007)가 닫혀 있지 않으면, 제어실 주 제어반(JP-03)에 “EWS MOV 고장 경고(WN20)”와 “OWS 경고(G53.6)”가 발생한다.
  - ㉼ 비상 보충수 공급으로 원자로 수조가 저-저-저 수위(4.90 m)로 증가되면 비상 보충수 공급 밸브(346-LV001/002/003/004)가 자동으로 닫혀 비

상 보충수 공급이 중단되고, 액체 폐기물 이송 밸브(346-LV007)가 열린다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 원자로 수조의 수심은 11.70 m 이상으로 유지하여야 한다.

(나) 원자로 수조수의 수심이 제한치 미만으로 감소되면 즉시 원자로를 정지하고, 수조수의 수위를 복원시킨다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

마. 2차 열교환기 출구유량 0 지시

운전주기 및 날짜 : 42주기 운전, 2006. 03. 16

(1) 증상

(가) 2차 열교환기 출구유량 0 지시하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 0 MW에서 2차 냉각펌프 기동 후, 2차측 열교환기 출구 유량이 지시되지 않았다.

(나) 확인결과 유량계 차압은 형성되고 있으나 전류신호가 발생되지 않았다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 예비품으로 교체 후, 유량 신호 전송 및 정상 동작을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 2차 냉각계통 유로는 정상 운전 중이어야 한다.

① 50 % 용량의 냉각 펌프 (PO1,PO2,PO3), 냉각탑 (AO1)

(나) 2대의 2차 냉각펌프가 정상 운전 중임에도 불구하고 열교환기 2차측 입구온도가 33 ℃ 이상이면, 즉시 원자로 출력을 50 %F.P 이하로 감소시켜 2차 냉각수 온도를 정상 운전 범위내로 복원하여야 한다.

(다) 1대의 2차 냉각펌프만 운전 가능한 경우에는 즉시 원자로를 정지시켜야 한다.

(라) 모든 2차 냉각펌프 유로가 운전 불가능하면 즉시 원자로를 정지시켜야 한다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

바. 1차 정화펌프 베어링 하우징 오일누유

운전주기 및 날짜 : 41주기 운전, 2006. 03. 15

(1) 증상

(가) 1차 정화펌프 베어링 하우징에서 오일이 누유되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) 1차 정화펌프 베어링 하우징에서 오일 누유가 확인되었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 예비품으로 교체 후, 축 정렬 실시한 후, 펌프를 기동하여 전동기의 진동이 기준치(4 mm/sec) 이하임을 확인하였다.

(나) 오일 및 1차 냉각수 누수 없음을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

사. 원자로 보호계통 B 채널 중성자 출력 고경보 발생

운전주기 및 날짜 : 44주기 운전, 2006. 05. 29 / 06. 02 / 07.17

(1) 증상

(가) 30 MW 도달 후 원자로 보호계통 B 채널 중성자 고출력(G05.1/2) 고경보가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW에 서 원자로 보호계통 B 채널 중성자 고출력 고경보가 발생하였으나 20분후 자동 해제되었다.

(나) 중성자 대수출력과 선형출력은 OWS상 정지 설정치 이하임을 확인하였다.

(다) 7월 17일건은 자동 해제가 되지 않아, 이를 해제하기 위해 복귀버튼을 눌러도 경보해제가 되지 않았다.

(라) 원자로 제어계통에서 비정상 경보가 발생하지 않아 원자로 보호계통 B 채

널 중성자 고출력 고경보를 대수출력의 이상으로 판단하였다.

- (마) 원자로 보호계통 B 채널의 대수신호 피복선과 접지와 절연 저항이 파괴된 것을 확인하였고 이로 인해 원인 모를 외란에 저항력이 낮아져 오동작이 발생한 것으로 추측하였다.

(3) 조치사항 및 결과

- (가) 원자로 보호계통과 원자로 제어계통은 모든 선형출력을 정지 변수로 사용하고 있고 선형출력이 문제였다면 이 출력으로 제어하는 원자로 제어계통에서도 비정상 경보가 발생하였을 것이지만 그렇지 않았기 때문에 대수출력의 이상으로 판단하였다.
- (나) 원자로 정지 후 신호처리기(RU06B)에서 로그 신호를 받아 출력 비례 전류 신호를 MLC로 입력하고, 정지 설정값 초과 시 점점 신호를 출력하는 A3 보드를 예비품으로 교체하였다.
- (다) 중성자 계측기를 교환(원자로 보호계통 B, 원자로 제어계통 A)하여 정상 작동함을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

- (가) 중성자 신호 측정 채널기기의 고장으로 인하여 중성자 고출력 (115 %F.P), 중성자 대수출력 고증가율(8 %P.P/sec), 중성자검출기 공급 저전압 등에 의한 채널정지가 발생할 수 있다. 2개 이상의 채널이 동시에 비정상이면 원자로 정지가 발생한다. 원자로 제어용 중성자 측정 기기가 독립적으로 설치, 사용되고 있기 때문에 원자로 보호계통 중성자 측정기기의 고장은 원자로 제어계통에 아무런 영향을 미치지 않는다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

- (가) 각각의 중성자출력 측정채널에는 선형출력신호에 대한 정지점점과 대수출력신호에 대한 정지점점이 제공되어 있다. 비정상적 출력상승 사고 시 선형출력신호와 대수출력신호가 2중으로 정지 기능을 수행한다. 적용되는 출력사고의 유형은 대수출력 고 증가율 설정치를 초과하지 않는 느린 출력상승 사고이다.
- (나) 중성자출력 측정채널에 2개의 고출력 정지점점 외에 대수출력증가율을 위한 정지점점이 제공되어 있다. 이 정지 변수는 빠른 속도의 비정상 출력 상승 사고에 대비하기 위한 1차 정지변수로서 사용된다.
- (다) 중성자검출기의 안정된 동작과 성능유지를 위해서 바이어스 전압이 항상 정상적으로 공급되어야 한다. 이 정지변수는 바이어스 전압이 비정상적으로

낮을 경우 원자로를 정지시켜 검출기의 성능저하로 인한 오동작을 사전에 방지하기 위함이다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

아. 1차 냉각 펌프 #1 오일 저수위 경보

운전주기 및 날짜 : 45주기 운전, 2006. 07. 13

(1) 증상

(가) 1차 냉각 펌프 #1 오일 저수위 경보가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW로 운전 중, 1차 냉각펌프 #1 펌프 오일 저수위 경보가 발생하여 현장 확인 결과 오일이 정상 수위보다 낮지 않음을 확인하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 오일을 보충하고, 현상대로 유지하다가 펌프 보수 시 정밀 진단을 하기로 하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 1차 냉각 펌프 1대 고장나면 원자로보호시스템의 저 유량 또는 저 압력 정지 변수에 의해 원자로가 정지한다.

(나) 1차 냉각 펌프 2대 고장나면 원자로제어시스템에 의해 원자로가 정지되지 않으면 원자로보호시스템의 저 유량 또는 저 압력 정지 변수에 의해 원자로가 정지한다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

자. 사용후 냉각펌프 #1 Seal 냉각라인 누수

운전주기 및 날짜 : 45주기 운전, 2006. 10. 11

(1) 증상

(가) 사용후 냉각펌프 #1 Seal 냉각라인에서 누수가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 계통 점검 시 사용 후 냉각계통에서 누수가 발생하여 확인해 보니,

Mechanical Seal에서 누수됨을 확인하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 예비품으로 교체하여 펌프 기동 시, 누수가 없음을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 펌프 P01/P02의 토출 압력이  $660 \pm 10$  % kPa(g)인지 압력계 PI-014/015에서 확인한다.

(나) 펌프 P01/P02의 입구 측에 있는 스트레이너 YS-001/002의 압력차가  $35 + 10$  % kPa(g) 이하인지 압력계 PDI-018에서 확인한다.

(다) 원자로 장기 정지시 사용 후 저장조 냉각 열교환기 X01의 출구측 (G59.5) 온도가  $40$  °C 이상일 경우에는 2차 냉각 펌프를 기동하여  $40$  °C이하로 유지시킨다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

차. 제어봉 #1 인출 시 Encoder 에러의 간헐적 발생

운전주기 및 날짜 : 45주기 운전, 2006. 12. 01

(1) 증상

(가) 제어봉 #1 인출 시 Encoder 에러가 간헐적으로 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 제어봉 점검 중, #1 인출 시, Encoder 에러가 발생하였다.

(나) 모터와 동일 축 상에 연결된 Rotary Encoder의 Feedback 신호가 비정상적으로 발생함을 확인하였다.

(다) 제어봉 클러치 전원 공급용 전원 공급기가 이상있음을 확인하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 모터를 교체하고, 전원 공급장치를 수리하여 정상적으로 동작함을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 제어봉의 고장이 발생되면 제어 알고리즘은 자동으로 고장난 제어봉을 알고리즘으로부터 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않는다.

(나) 2개 이상의 제어봉이 동시에 고장이면 원자로는 원자로 제어계통에 의해 자

동 정지된다.

- (다) 고장난 제어봉은 최종 위치에서 더 이상 움직이지 않는데 만약 고장난 제어봉이 어떤 원인에 의해 3.0 mm 이상 움직이면 이중 고장으로 간주하여 원자로 제어계에 의한 원자로 정지가 발생된다.
  - (라) 1개 제어봉이 기계적인 고장 또는 기타 원인으로 인하여 고장임이 판명되면 현재의 출력보다 높게 원자로 출력을 상승시키지 않아야 하고 만일 원자로 출력이 50 %F.P를 넘는 경우에는 50 %F.P 이하로 유지시켜야 한다.
  - (마) 2개 이상의 제어봉 고장이 발생하였음에도 불구하고 제어 알고리즘에 의한 자동정지가 발생되지 않았다면 원자로 제어계의 수동정지 스위치를 작동시켜 즉시 원자로를 정지시켜야 한다.
  - (바) 원자로 제어계에 의한 원자로 정지 후 1시간 이내 보수가 불가능한 경우는 원자로 보호계를 수동정지시켜야 한다.
  - (사) 품질등급 확인 후 Q,T등급의 경우 QAP-BS-15.1 개정1 부적합 사항 관리 절차서에 따라 부적합 사항 보고서를 발행하여 절차에 따라 처리한다.
  - (아) 고장난 제어봉의 보수를 완료하여 정상상태로 복원시키기 전까지는 원자로를 재기동하지 않아야 한다.
  - (자) HANTAP-05-OD-ROP-TA-05, 6.3.1.3에 의거 비정상 상태 발생시 전 후의 경위와 조치 등에 관한 상세한 내용을 비정상보고서에 기록을 유지한다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 제어봉은 모두 4개로 구성되며, 18-봉 핵연료 집합체가 장전되는 내부노심의 원통형 유동관 외부로 통하여 노심 내에 삽입되거나 인출된다. 제어봉의 기능은 원자로 정상 운전 시 노심에 제어봉 일부가 삽입되어 원자로를 임계로 유지시키며, 또한 원자로 출력을 조절한다. 제어봉의 인출에 따른 양의 반응도 삽입시 반응도 삽입 속도를 0.33 mk/sec 이하로 제한함으로써 노심에 과도한 반응도가 삽입되는 것을 방지한다. 정상적인 인출 및 삽입시의 구동은 단계전동기(Stepping Motor)로 이루어지며, 제어봉 장치에 의한 원자로 정지 시에는 자기 클러치가 풀림으로써 제어봉이 노심 내로 자유 낙하하여 원자로 출력을 급속히 감소시킨다.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- (가) 없음

## 2. 2007년 사례

#### 가. 제어봉 #2 고장경보 발생

운전주기 및 날짜 : 49주기운전, 2007. 06. 14

##### (1) 증상

(가) 원자로 출력 30 MW 운전 중 제어봉 #2 고장으로 주제어반 경보(WN11)발생하였다.

##### (2) 현황 및 원인

(가) 제어봉 #2 고장으로 인해 출력을 감발하였다.

(나) 현장제어반 고장경보 발생 없음을 확인하였다.(제어봉 하드웨어 장치 정상임을 확인하였다.)

(다) 제어컴퓨터에서는 2번 제어봉 고장 발생 확인하였지만 고장원인은 없었다.

(라) 하드웨어 또는 소프트웨어 비정상 없이 고장경보가 발생하는 경우는 전선을 타고 들어오는 외부 잡음이나 현장제어반의 광변환기(optical-isolator) 비정상일수 있다.

##### (3) 조치사항 및 결과

(가) 2번 제어봉이 정상임을 확인하고 원자로 출력을 0.1 %F.P까지 감발하고 수동모드 전환 후 2번 제어봉을 정상 복귀시켜, 원자로 출력을 30 MW 상승시켰다.

##### (4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 제어봉의 고장이 발생되면 제어 알고리즘은 자동으로 고장난 제어봉을 알고리즘으로부터 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않는다.

(나) 2개 이상의 제어봉이 동시에 고장이면 원자로는 제어계통에 의해 자동 정지된다.

(다) 고장난 제어봉은 최종 위치에서 더 이상 움직이지 않는데 만약 고장난 제어봉이 어떤 원인에 의해 3.0 mm 이상 움직이면 이중 고장으로 간주하여 원자로 제어계통에 의한 원자로 정지가 발생된다.

##### (5) 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 제어봉 구동장치는 제어 알고리즘에서 계산된 구동 명령신호에 따라 정확하게 제어봉을 구동하여야 한다.

(나) 원자로 정지조건 발생시 자유낙하에 의하여 신속히 노심속으로 제어봉을 삽입 시켜야 한다.

(다) 기계적인 고장 또는 기타 원인으로 인하여 2개 이상의 제어봉 구동장치가 운전불가능 상태임이 제어 컴퓨터에 의해 발견되면 즉시 원자로를 정지 하

여야 한다. 그리고 원자로의 재기동은 고장 제어봉을 운전가능 상태로 복원한 후 수행하여야 한다.

(라) 1개 제어봉이 기계적인 고장 또는 기타 원인으로 인하여 운전불가능상태인 경우에는 현재의 출력 이상으로 원자로 출력을 상승시키지 않아야하고, 만일 원자로 출력이 50 %F.P을 초과한 경우에는 50 %F.P 이하로 유지시켜야 한다.

(마) 원자로 제어시스템의 정지변수 작동에 의한 대기상태 도달 후 1시간 이내에 정지원인을 제거하여 원자로를 재기동 할 수 없으면 제어 독작용에 의하여 원자로 재기동이 불가능하므로 원자로를 정지상태로 유지한다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

나. 원자로 출구온도-1 지시값 비정상

운전주기 및 날짜 : 49주기 운전, 2007.06.19

(1) 증상

(가) 30 MW 운전중 원자로 출구온도-1 신호처리기(680-TU-11C) 지시값이 다른 채널보다 3 °C 높게 지시하고 있고 시간이 경과할수록 편차가 커지는 경향을 보였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 증상 확인 결과 신호처리기의 노화 문제로 판단하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 680-PB-11C를 “정상”에서 “시험”위치로 전환하고 교정된 예비품 신호처리기로 교체후 680-PB-11C를 “시험”에서 “정상” 위치로 전환하여 원자로 출구 온도-1 정상 지시함을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전 절차

(가) 기기의 고장으로 인하여 고온도(49 °C)에 의한 채널정지가 발생할 수 있다.

(나) 2개 이상의 채널이 동시에 비정상이면 원자로 정지가 발생된다.

(다) 원자로 제어시스템 온도 측정기기는 독립적으로 설치, 사용되고 있기 때문에 원자로 보호시스템 온도 관련 기기의 고장으로 인한 원자로 제어시스템의 영향은 없다.

(5) 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 1차 냉각 계통의 펌프사고 또는 2차 냉각계통의 냉각 기능상실 사고시 예

상되는 핵연료 사고를 사전에 방지하기 위해 사용되는 정지변수로서 원자로 출구 측 1차 냉각 계통 배관상에 저항 온도 검출기가 각각 3중으로 설치된다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

### 3. 2008년 사례

#### 가. RCI 삼중수소 농도 증가로 인한 출력감발

운전주기 및 날짜 : 52주기 운전, 2008. 03. 05

(1) 증상

(가) 원자로 기동 27 MW 도달 후 삼중수소 농도 증가하였다.(14,000 Bq/m<sup>3</sup> → 187,000 Bq/m<sup>3</sup>, 삼중수소 농도 유도방출한도 Rx : 5.069E7 Bq/m<sup>3</sup> RCI : 3.885E8 Bq/m<sup>3</sup>).

(2) 현황 및 원인

(가) 2월 29일 반사체 펌프 점검을 위하여 RCI 배기구로 밀폐구조물배기 밸브를 30 % 열었다.

(나) 3월 2일 30% open → 100% open하여 3월 4일 반사체 냉각펌프 #1을 기동 점검하였다.

(다) 3월 5일 기동 운전중 RCI 삼중수소 농도가 증가하여 밀폐구조물 배기밸브 100% open을 확보하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 원자로 출력 30 kW 감발 후 반사체 해치를 열어 배기 밸브가 열려 있음을 확인하고, 밸브를 닫아 RCI 삼중수소농도 감시기를 확인하였다.

(나) 농도 확인 후 운전시의 평균값으로 감소함을 확인하였으며 30 MW로 출력을 상승시켜 정상 운전을 하였다.

(다) 추후 작업 시 작업 담당자 흡기 및 배기밸브 닫힘을 반드시 확인하도록 하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 유도방출한도 이상으로 환경에 배출되는 경우 즉시 원자로를 정지하고 비상환기설비를 가동한다.

(나) 비상환기설비에 의한 방사성 기체유출물이 유도방출한도를 초과하는 경우 비상환기 설비의 작동 정지시킨다.

- (다) 채널 이상 발견 시에는 가능한 빠른 시간 내에 방사선 관리팀에 요청하여 채널을 복원시키고, 그 기간 동안 최소 12시간에 1회 이상 기체 시료를 채취하여 분석한다.
  - (라) 운전 중 방사성 기체유출물이 유도방출한도를 초과하면 사고 고장보고에 따라 교육과학 기술부, 원자력 안전기술원에 보고한다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 없음.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- (가) 방사선 감시계통(HANTAP-05-OD-ROP-OP-19)에 RCI 삼중수소 농도에 대한 반영 필요.

나. 2차 냉각 펌프 토출 & 약품펌프 배관과의 결합 Pipe 누수  
 운전주기 및 날짜 : 52주기 운전, 2008. 03. 06

- (1) 증상
- (가) 2차 냉각펌프 배관 토출 측과 약품주입 밸브 배관 연결 용접부위 2곳에서 누수가 발생하였다.
- (2) 현황 및 원인
- (가) 3월 6일 계통 점검 중 2곳(약 0.5 cm)의 누수(711-V215,207 후단)가 발견되었다.
  - (나) 2차 냉각계통 약품주입 배관과 2차 냉각계통 배관 연결 부분이 부식되어 있음을 확인하였다.
- (3) 조치사항 및 결과
- (가) 2차 냉각펌프 점검 시 냉각펌프 정지하여야 하나, 2차 냉각 펌프 정지 시 원자로를 정지해야 한다.
  - (나) 확인 누설의 경우이므로 응급조치로 고무 밴드로 감고 클램프로 조였으며, 2차 펌프 전기 공급 판넬 부위로 분무된 물줄기로 인한 피해를 막기 위해 비닐을 설치하였다.
  - (다) 제어실에서 2차 펌프실 감시를 위하여 임시 카메라 설치 후 24시간 감시하였다.
  - (라) 원자로 계획정지 후 누수 부위는 탄소강을 소켓 형태로 기계 가공하여 용접을 하여 펌프 기동 후 정상 압력에서 누수가 없음을 확인하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차

- (가) 2차 냉각 유량 상실로 인한 ‘출구 저 압력’ OWS 경보(G43.1 ~ 3) 발생한다.
- (나) 2차 냉각수 펌프 출구 저 압력 경보 발생 후 대기 중인 펌프 자동기동한다.
- (다) 운전 중인 2차 냉각계통 펌프의 출구 저 압력 경보가 발생하면 원자로가 안전하게 정지 하였는지 확인 후 배수조 수위(G52.4), 냉각탑 수조 수위(G41.1) 및 2차 냉각수 유량(G44.4)과 온도(F44.1 ~ 3) 변화를 감시하여 배관 손상 여부를 확인한다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
  - 없음.
- (6) 절차서 반영 필요사항
  - 없음.

다. DC 24 V A 채널 전원 공급기 비정상 경보  
 운전주기 및 날짜 : 52주기운전, 2008. 03. 13

- (1) 증상
  - (가) 제어실 계측기실의 DC 24V A 채널 전원 공급기에서 비정상 경보가 발생하였다.
- (2) 현황 및 원인
  - (가) OWS G82.5에 “DC CHANNEL ABNORMAL” 및 24 V 분전반(MLC룸)에 접지 경보가 발생하였다.
- (3) 조치사항 및 결과
  - (가) 절연저항 및 부하측 단락 결선 검사결과 이상이 없었다.
  - (나) 핵연료 시험 루프 시운전 또는 현장계기의 접지로 인해 발생됨을 확인하여 시운전의 현장계기의 접지 제거 후 경보를 해제하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
  - (가) 460 V AC 전원 상실 또는 충전기 고장으로 인하여 축전지는 축전지 셀 전압이 1.75 V(단자 전압 21 V)로 떨어질 때까지 부하에 24 V 직류전력을 공급한다.
  - (나) 460 V AC 전원 상실 시 축전지로부터 전원이 공급되는지 충전기 판넬 전면의 직류 전압계 선택스위치를 “Batter”로 하고 전압계를 통해 전압을 확인하여 입력 상실 원인 찾아 조치한다.
    - ① 충전기/정류기 고장시 판넬 내부의 정류기 모듈에서 고장이 발생하였는

지 확인한다.

② 정류기 모듈이 모두 고장난 경우 출전지로부터 전원이 공급되는지 확인한다.

③ 축전지 고장시 단자 전압이 21 V이하이면 축전지 차단기(CB4) 및 제어실의 24 V 분전반에 위치한 축전지 전원 입력 차단기를 개방한다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

라. 원자로 출구온도 신호처리기 지시값 비정상

운전주기 및 날짜 : 52주기 운전, 2008. 03. 21

(1) 증상

(가) 원자로 출구온도 신호처리기(680-TU-11A, 12C) 지시값이 다른 채널보다 2.5 ~ 3.0 °C 높게 지시하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) TU-11A(LOOP#1 출구) 및 12C(LOOP#2 출구)의 온도 지시치 2.5 ~ 3.0 °C 편차가 발생하여 운전 정지 시까지 지속적으로 편차가 발생하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 온도 지시값을 채널별로 비교 검토 결과 단순 고장으로 판명하여 원자로 정지 후 점검하기로 하였다.

(나) 운전 정지 후 현장 측온저항체(RTD)의 접속단자에서 저항치 직접 측정하였으나 이상없음 확인하였다.

(다) 원자로 보호계통 판넬 신호지시기의 접속단자로 입력되는 저항치를 측정한 결과 비정상인 두 대에서 온도 편차만큼 저항치 입력되고 있음 확인하여, 신호지시기 입력저항 비정상임을 확인하였다.

(라) 측온저항체(RTD)와 신호지시기 사이에는 현장 신호를 끊고 모의 신호를 입력하여 정기점검을 하기위한 Test 스위치가 있고, 이 스위치에 사용되는 접점들의 접촉저항이 증가해 발생하였다.

(마) 6 sets의 Test 스위치를 원자로 보호계통 판넬로부터 모두 탈거 후 접점 세척기를 이용하여 청소하여 재설치 한 후, 신호지시기로 입력되는 저항값 측정 결과 모두 정상임을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

- (가) 기기의 고장으로 인하여 고온도(49 ℃)에 의한 채널정지가 발생할 수 있다.
- (나) 2개 이상의 채널이 동시에 비정상이면 원자로 정지가 발생한다.
- (다) 원자로 제어계통 온도 측정기기는 독립적으로 설치, 사용되고 있기 때문에 원자로 보호계통 온도 관련 기기의 고장으로 인한 원자로 제어계통 영향은 없다.
- (라) 신호처리기의 온도 지시값을 채널별로 비교 검토하고 경보발생 상황을 관찰하여 계측 채널 기기의 단순 고장인지 실제 1차 냉각계통의 온도에 이상이 발생 되었는지 확인한다.
- (마) 채널기기의 단순고장인 경우 기동 또는 출력 운전 중인 경우 1시간 이내에 고장난 채널 기기에 공급되는 전원을 차단시켜 해당 채널을 정지상태로 유지한다.(2/3대시 1/2논리 작동).
- (바) 고장난 기기의 원인을 분석하고 즉시 보수 의뢰하며, 고장 품목기 Q, T 등급에 속할 경우 부적합 사항 보고서를 발행한다.
- (사) 채널기기의 고장이 아닌 실제 1차 냉각계통 온도의 비정상으로 밝혀질 경우에는, 1차 냉각계통의 유량과 압력, 원자로 입·출구 온도, 원자로 출력변동 상태, 수조 방사선 및 1차 냉각수 방사선을 점검한다.
- (아) 2차 냉각계통의 펌프상태 및 유량을 점검하여 냉각계통의 비정상 상태 발생여부 확인한다.
- (자) 보호계통 정지 변수 중 어느 하나라도 원자로 안전에 영향을 미칠 수 있다고 판단되면 지체없이 원자로 비상정지 절차 수행.

(5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

마. RCI 덕트 감시기 고경보 발생

운전주기 및 날짜 : 53주기 운전, 2008. 04. 09

(1) 증상

- (가) NTD1 조사통 시험 중 기포가 발생하여 방사선 감시계통 RCI 덕트에서 (RE20, 21) 고경보가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

- (가) 원자로 기동 전 1차 NTD1 조사공 기포 발생 억제를 위한 빈 조사통 장전 및 회전 시험 수행 중 기포가 발생하여 RCI 덕트에서(RE 20 : 2.7E3 cpm, RE 20 : 2.7E3 cpm) 고경보가 발생하였다. (RE20, 21 경보 설정값 2.0E3 cpm, HIGH 설정값 2.5E3 cpm)
  - (나) 기포발생 5분 후 정상값(150 ~ 200 cpm)으로 감소하였다.
  - (다) 원자로 기동 후 2차 NTD1 조사공 기포 발생 억제를 위하여 조사통에 실리콘을 장전하여 회전 시험 수행 중 기포가 발생하여 RCI 덕트에서(RE 20 : 8.05E3 cpm, RE 20 : 7.64E3 cpm) 고경보가 재발생 하였다.
  - (라) 수조 방사선 값 A 채널 700 nGy/h, B & C 채널 200 nGy/h까지 증가하였다.(수조 방사선(A, B, C 채널) 경보 설정치 2.0 mrem/h, 정지 설정치 2.5 mrem/h).
  - (마) 기포발생 1분 후 경보가 자동 해제되었다.
- (3) 조치사항 및 결과
- (가) NTD1에 8인치 빈 조사통 장전 및 회전 시험을 수행하여 기포 발생 없음 확인하였다.
  - (나) NTD1에 6인치 실험용 실리콘(H-1169) 장전 후 기포 발생 없음 확인하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
- (가) 채널기기의 고장으로 인하여 원자로 수조표면 고방사능(2.5E4 nGy/h)에 의한 채널정지가 발생하며 2개 이상의 채널이 동시에 비정상이면 원자로 정지가 발생한다. 경보발생 상황을 점검하고 이상 채널의 방사선 신호값과 정상 채널의 신호값을 서로 비교 검토하여 채널의 비정상 상태를 확인한다.
  - (나) 채널기기의 단순고장인 경우 기동 또는 출력 운전 중인 경우 1시간 이내에 고장 난 채널 기기에 공급되는 전원을 차단시켜 해당 채널을 정지상태로 유지한다.(2/3대시 1/2논리 작동) 2개 이상의 채널이 동시에 고장 나서 비상환기계통이 작동되었을 경우는 보조계통 판넬(JP-10)에 설치되어 있는 비상환기 정지스위치(731-PB-001/002)를 눌러 비상환기계통을 수동정지한다.
  - (다) 고장난 기기의 원인을 분석하고 즉시 보수 의뢰하며, 고장품목이 Q, T 등급에 속할 경우 부적합 사항 보고서를 발행한다.
  - (라) 1차 냉각계통의 유량(우회유량) 및 수조 고온층 계통의 작동 상태를 점검하여 비정상 상태를 확인한다. 굴뚝감시기 및 1차 냉각수의 핵종분석 자료로부터 핵연료의 파손 여부를 확인한다.

- (마) 보호계통 정지 변수 중 어느 하나라도 원자로 안전에 영향을 미칠 수 있다고 판단되면 지체없이 원자로 비상정지 절차 수행한다.
  - (바) RCI 고방사능 감지시 원자로가 원자로 보호계통 정지변수에 의해 정지된다.
  - (사) 운전중인 정상 배기팬이 정지 입·출구 댐퍼(HZ021, 023 또는 HZ022, 024) 닫히며, 비상배기팬(731-F01 또는 F02)이 작동하고 입·출구 댐퍼(HZ006, 008 또는 HZ007, 009) 열린다.
  - (아) 정지댐퍼(HZ036, 041)와 격리댐퍼(HZ001, 002, 033, 038)가 닫힌다.
  - (자) 제어실 보조계통제어반(JP-10)에서 원자로실 정상환기계통(732-F01, 02/03, 04), RCI 주변지역(732-F05, 06), RCI 환기계통(731-F05, 06/03, 04) 정지 및 입·출구 댐퍼(HZ021, 023 또는 HZ022, 024) 닫힘을 확인한다.
  - (차) 비상 배기팬(F01, 02)이 기동되고 관련 입·출구 댐퍼가 열려있는지 확인 후 비정상이면 핸드 시위치(HS001, 002)를 수동으로 전환 후 누름 스위치(PB001 혹은 002)를 눌러 기동하고 댐퍼가 열리는지 확인한다.
  - (카) RX, RCI 굴뚝을 통하여 방출되는 방사능량이 유도방출한도(RE22 입자 :  $6.72E-7(\mu\text{Ci/cc})$ , 방사성 옥소 :  $1.34E-7(\mu\text{Ci/cc})$ , 가스 :  $1.78E-4(\mu\text{Ci/cc})$ , RE23 입자 :  $5.17E-6(\mu\text{Ci/cc})$ , 방사성 옥소 :  $1.03E-6(\mu\text{Ci/cc})$ , 가스 :  $2.14E-3(\mu\text{Ci/cc})$ )를 초과하는지 감시한다.
  - (타) 방사성 기체 유출물의 농도가 유도 방출 한도 이상으로 굴뚝을 통하여 환경으로 배출되는 경우에는, 즉시 원자로를 정지하고 비상환기 설비를 가동하고, 비상환기설비에 의한 방사성 기체유출물이 유도 방출 한도를 초과하는 경우에는 비상환기설비의 작동을 정지시키고, MLC Room에 있는 제어반(733-J-P031)에서 731-HZ46, 732-HZ39 댐퍼를 운전원이 수동으로 닫는다.
  - (파) 운전 중 방사성 기체 유출물이 유도 방출 한도를 초과하면 사고, 고장 보고 절차에 따라 교육과학기술부 장관에게 보고하며, 방사능이 허용치를 초과하여 굴뚝을 통하여 방출된다면 하나로시설 방사선 비상 계획 수행절차서(KAERI/TR-2328/2002)의 비상발령 및 비상해제(EPP/UA-01) 절차를 수행한다.
  - (하) 고방사선 준위가 정상준위로 감소되면 제어실 보조계통 제어반(JP-10)에 있는 원상복귀 누름 스위치(PB012)를 눌러 정상 운전한다.
- (5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(개) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(개) 없음.

바. 제목 : 핵연료 파손 감시계통 지발 중성자 값 상승

운전주기 및 날짜 : 53주기 운전, 2008. 04. 11

(1) 증상

(개) 핵연료 파손 감시계통의 지발 중성자 값이 상승하였다.

(2) 현황 및 원인

(개) 4월 11일 핵연료 파손 감시계통의 지발 중성자 값이 상승하는 기미가 보여 12일 6시에 수조수 시료를 채취하여 핵종을 분석하였다.

(나) 수조 방사선과 지발중성자 값의 변화를 수시로 확인한 결과 핵연료에 미세한 손상이 있는 것으로 추정하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(개) 4월 13일 18시에 원자로 출력을 감발하여 19시 08분에 원자로를 수동 정지하였다.

(나) 핵연료 손상으로 생성된 단 반감기 핵종이 수조 상부로 올라오는 것을 방지하기 위해서 임시적으로 1차 정화 펌프는 매 3시간 정지 후 20분 기동하였다.

(다) 4월 14일 핵연료 손상 가능성이 큰 핵연료 다발부터 핵연료 누설 검사를 실시하여 제어봉 3의 위치에 장전되었던 18봉 핵연료 집합체 KHC-021이 손상된 것으로 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(개) 채널기기의 고장으로 인하여 1차 냉각수 고방사능(6,600 cps)에 의한 채널 정지 발생하며 2개 이상의 채널이 동시에 비정상이면 원자로 정지가 발생한다.

(나) 경보발생 상황을 점검하고 이상 채널의 방사선 신호값과 정상채널의 신호값을 서로 비교 검토하여 채널의 비정상 상태를 확인하여 채널기기의 단순 고장인 경우 기동 또는 출력 운전 중인 경우 1시간 이내에 고장 난 채널 기기에 공급되는 전원을 차단시켜 해당 채널을 정지상태로 유지한다.(2/3대시 1/2논리 작동).

(다) 2개 이상의 채널이 동시에 고장 나서 비상환기계통이 작동되었을 경우는

보조계통 판넬(JP-10)에 설치되어 있는 비상환기 정지스위치 (731-PB-001/002)를 눌러 비상환기계통을 수동으로 정지한다.

(라) 고장난 기기의 원인을 분석하고 즉시 보수 의뢰하며, 고장품목이 Q, T 등급에 속할 경우 부적합 사항 보고서를 발행한다.

(마) 1차 냉각계통의 유량(우회유량) 및 수조 고온층 계통의 작동 상태를 점검하여 비정상 상태 확인하고, 굴뚝감시기 및 1차 냉각수의 핵종분석 자료로부터 핵연료의 파손 여부를 확인한다.

(바) 보호계통 정지 변수 중 어느 하나라도 원자로 안전에 영향을 미칠 수 있다고 판단되면 지체없이 원자로 비상정지 절차를 수행한다.

(5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

사. 비상냉각수 공급계통의 수위스위치 극저수위 경보 발생

운전주기 및 날짜 : 54주기 운전, 2008. 10. 09

(1) 증상

(가) 10월 9일 정상출력 운전 중 비상냉각수 공급계통의 수위스위치 (346-LS-13A) 극저수위 경보가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 비상냉각수 공급계통의 수위스위치(346-LS-13A) 극저수위 경보가 발생하여 OWS 점검과 현장점검을 실시하였으나 정상상태였으며, 이 경보는 원자로 수조수위가 극저 수위(4.8 m)에서 동작되는 경보이나 원자로 수조수위가 정상(12.213 m)수위임에도 불구하고 발생하고 있었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 극저 수위경보는 2/3 논리로 자동 동작되므로 비정상인 수위 스위치 (346-LS-13A)가 다른 스위치(346-LS-13B&C)와 비정상으로 작동하여 비상 보충수가 공급되는 것을 방지하기 위하여 조치한다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 원자로 수조가 극저 수위(4.80 m)까지 감소되면 비상 보충수 공급 밸브 (346-LV001/002/ 003/004)가 열리고, 액체 폐기물 이송 밸브(346-LV007)가 자동으로 닫혀 비상 보충수가 약 11.4 kg/sec로 원자로 수조에 공급(G50.5,

G52.3)된다.

- (나) 원자로실 배수조 수위가 1.19 m 이상이면 원자로실 배수조 펌프(346-P01/02)가 자동 기동되어 재순환 모드로 전환되어 원자로실 배수조의 물이 약 13.1 kg/sec로 원자로 수조에 공급된다.
  - (다) 제어반 미믹패널(661-JP-14)에 비상 보충수 공급 밸브(346-LV001/002/003/004)의 열림 표시등과 액체 폐기물 이송 밸브(346-LV007)의 닫힘 표시등이 점등되고, 제어실 OWS에 비상 보충수 공급 밸브의 열림 상태 표시등(G50.1/2/3/4)이 점등된다.
  - (라) 극저(4.80 m) 수위 상태에서 5초 후에도 저-저-저 수위(4.9 m)로 증가되지 않고 액체 폐기물 이송 밸브(346-LV007)가 닫혀 있지 않으면, 제어실 주 제어반(JP-03)에 “EWS MOV 고장 경보(WN20)”와 “CRT 경보(G53.6)”가 발생한다.
  - (마) 비상 보충수 공급으로 원자로 수조가 저-저-저 수위(4.90 m)로 증가되면 비상 보충수 공급 밸브(346-LV001/002/003/004)가 자동으로 닫혀 비상 보충수 공급이 중단되고, 액체 폐기물 이송 밸브(346-LV007)가 열린다.
- (5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 원자로 수조의 수심은 11.70 m 이상으로 유지하여야 한다.(운전형태 1, 2, 3)
  - (나) 원자로 수조수의 수심이 제한치 미만으로 감소되면 즉시 원자로를 정지하고, 수조수의 수위를 복원시킨다.
  - (다) 원자로 수조의 수위를 최소한 24시간마다 1회씩 점검하여야 한다.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- 없음.

아. 1차 배관(PCS Pipe) 누수 경보 발생

운전주기 및 날짜 : 56-1주기 운전, 2008. 12. 19

(1) 증상

(가) 12월 19일 새벽에 1차 배관 누수경보가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 1차 배관 누수경보가 발생하여 현장 확인 결과 투시창에 수위는 나타나지 않으나 누수 흔적이 관찰되었다.

(나) 1차 정화계통 누수가 의심되어 해치를 열고 점검한 결과 정화 펌프 전단의

밸브(333-V001) 플랜지 개스킷 부분에서 누수가 있음을 확인하였다.

(3) 조치사항 및 결과

- (가) 플랜지 개스킷 부분의 볼트가 풀려 누수가 발생하였으며 이를 다시 조여 누수가 없음을 확인하고 1차 정화계통 펌프 가동하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

- (가) 1차 냉각 펌프는 원자로 수조 수위가 저-저수위(11.7 m)이고 동시에 유량계(331-FT-034)의 지시가 저유량(492 kg/s)이면 자동으로 정지된다.
- (나) 1차 냉각수 우회 유량 밸브(331-HV-037)와 1차 정화계통 밸브(333-HV-002)는 원자로수조 저-저 수위 (11.7 m) 에서 자동으로 닫힌다.
- (다) 1차 정화 계통 펌프가 원자로 수조 수위 저-저수위(11.7 m)에서 자동 정지된다.
- (라) 원자로 수조 수위가 저-저 수위 (11.7 m)가 되면 정지봉 펌프 흡입관의 공기 유입으로 원자로는 자동 정지된다.
- (마) 배수조 펌프의 자동 운전 모드에서 원자로 배수조가 고수위(1.19 m)이상이고 동위원소 생산시설에 있는 액체 폐기물 저장 탱크 수위가 고-고수위 미만일 때 수위 스위치(346-LS-014)에 의해 제1번 펌프(346-P01)가 기동하며, 계속해서 배수조 수위가 고-고수위(1.30 m)에 이르면 수위 스위치(346-LS-015)에 의해 제 2번 펌프(346-P02)기동한다. 또한 배수조 수위가 저수위(0.6 m)에 이르면 펌프는 자동 정지한다.
- (바) 원자로 수조 수위가 극저수위(4.80 m)에 도달되면 제어실 주제어반 JP-3의 WIN18과 OWS(G51/4/5/6/7)에 경보가 발생하여 비상 보충수 주입 격리밸브 (346-LV001/002/003/004)가 자동으로 열려 비상 보충수 공급이 시작되고, 저-저-저-수위 (4.90m)에 도달되면 OWS에 경보가 발생(G51/1/2/3/8) 되고 비상 보충수 주입이 중지된다.
- (사) 원자로 수조 수위가 극저수위(4.8 m)에 도달되고 원자로 배수조 수위가 고수위(1.19 m)이상 이거나 고-고수위(1.30 m) 이면 액체폐기물 이송밸브 (LV007)가 닫히면서 액체폐기물이 원자로 수조 내로 유입된다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

- (가) 확인 누설의 경우 누설율이 1 GPM 이하이면 최소한 4 시간에 1회씩 누설율을 확인해가며 최대 4주간 운전을 계속할 수 있다. 그러나, 누설율이 1 GPM을 초과하거나 누설율의 증가가 1일 2배 이상이면 원자로를 정지하여야 한다. 또한, 총 누설량이 액체 폐기물 처리 능력 및 저장 능력을 초과할

때에도 즉시 원자로를 정지하여야 한다.

(나) 미확인 누설의 경우는 1시간 이내에 경보기의 오작동 여부를 확인하고, 경보기가 정상적이며 원자로를 즉시 정지하여야 한다. 단, 경보기의 오동작으로 확인된 경우는 다음에 따른다.

(다) 누설검출기중 어느 하나 이상이 운전 불가능 상태가 되면 원자로 수조 수위 및 원자로실 배수조 수위를 최소한 12 시간에 1 회씩 확인해가며 최대 4주간 운전을 계속할 수 있다.

(6) 절차서 반영 필요사항

- 없음

#### 4. 2009년 사례

가. 원자로 보호계통 C 채널 중성자 중 출력 경고 발생

운전주기 및 날짜 : 제 56-2주기(30MW)운전, 2009.01.29

(1) 증상

(가) 원자로 보호계통 C 채널의 중성자 중 출력과 trip 경보가 동시에 발생하여 1초 후에 정상화되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) 2/3논리에 의하여 원자로 정상상태 유지되었으며, 비정상 발생 당시 선형 및 대수출력은 모두 정상값을 유지하였다.

(나) 현장 확인 결과 경보와 관련된 핸드 스위치(HS-06C)의 접점동작이 비정상임을 발견하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 경보와 관련된 계전기는 정상적으로 동작하였다.

(나) 예비품 핸드 스위치의 각 접점들에 대한 동작상태 확인 후 원자로 보호계통 판넬에 교체하였으며, 교체 후 정상적으로 동작함을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 중성자출력 연동은 저출력연동과 고출력연동의 2가지가 있다. 저출력연동은 1 %F.P 이상의 출력에서만 냉각수 저-저 유량과 일차 냉각계통 저-저 압력 정지변수가 동작되도록 한다. 1 %F.P 미만의 출력에서는 물론 이들 정

지변수를 자동적으로 우회시킨다. 고출력 연동은 55 %F.P 이상의 출력에서만 냉각수 저유량과 일차 냉각계통 저압력 정지변수가 동작되도록 한다. 마찬가지로 55 %F.P 미만의 출력에서는 저유량 및 저압력 정지변수를 우회시킨다. 저출력 연동은 중성자 대수출력 신호를 이용하고, 고출력 연동은 중성자 선형출력 신호를 이용한다.

- (나) 중성자 출력준위 정지변수에는 저저출력(1 %F.P)와 저출력(1주기는 28 %F.P, 2주기 이후는 55 %F.P)이 있다. 중성자 출력 선형신호와 출력준위 정지 핸드스위치가 병렬로 연결되어 있어 출력준위 정지 핸드스위치가 1 %F.P Valid로 선택되어 있으면 저-저출력과 저출력 정지가 모두 유효하며, 55 %F.P Valid로 선택되어 있으면 저출력 정지만이 유효하고, 115 %F.P Valid로 선택되어 있으면 저저출력과 저출력 정지가 모두 우회된다.

(6) 절차서 반영 필요사항

- 없음

나. 핵연료(KHH-028) 손상

운전주기 및 날짜 : 56-2주기운전, 2009. 02. 02

(1) 증상

- (가) 원자로 운전 후 핵연료 육안검사 및 노심변경 중 핵연료(KHH-028)가 손상되었다.

(2) 현황 및 원인

- (가) 56-2주기 원자로 운전 후 핵연료 육안검사 및 노심변경 중 R16에 장전되어 있던 핵연료(KHH-028)를 인출하여 R08로 이동 장전하는 과정에서 핵연료가 손상되었다.
- (나) 내방사선 카메라 촬영한 결과 제어봉 #2와 정지봉 #4의 Shroud Top에 걸린 것으로 확인되었다.
- (다) 핵연료 취급 기구의 사용 부주의 및 부적절한 스프링 밸런서 사용 및 점검 오류로 파악하였다.

(3) 조치사항 및 결과

- (가) 망원경으로 핵연료 손상부분을 확인하고 작업 중지하여 작업수조로 이송한 후, 비디오 촬영결과, Top Endplate 1곳의 굽힘과 다른 1곳이 손상되었고, 손상된 부분의 핵연료 봉단 마개가 휘어져 있었다.
- (나) 손상 핵연료 잔해가 노심으로 들어가지 않을 것을 확인하였다.

- (다) 손상 핵연료 대신 노심에서 인출 후 검사한 핵연료(KHH-02)를 R08에 재장전하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
- (가) 핵연료 취급 기구는 항상 수직 상태를 유지하여 휘지 않도록 하며, 핵연료 취급 시에는 취급 기구나 핵연료가 원자로 구조물에 부딪히지 않도록 해야 한다.
- (나) 사용하고자 하는 공구의 중량이 포함되는 사용하중을 가진 스프링 밸런서를 선택하고, 호이스트에 걸기 전에 UP/DOWN 스위치를 작동시켜 건전지와 표시등 및 2중 부저의 작동을 확인하고 다른 부분에 이상이 없는지 육안으로 점검한다.
- (다) 원자로 직상부에서의 이동시에는 맨브릿지 및 호이스트를 항상 저속으로 운전하며 제어봉 및 정지봉 근처에서는 가능한 한 좌우로 움직이지 않아야 한다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- 없음.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- 없음.

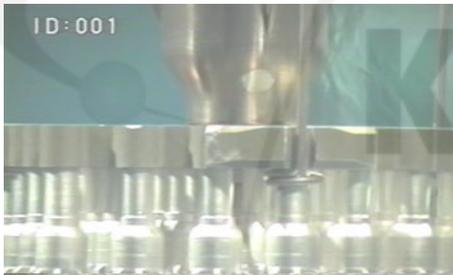


그림 2. 1차 핵연료 굽힘



그림 3. 2차 핵연료 굽힘



그림 4. 노심 구조물(1)



그림 5. 노심 구조물(2)



그림 6. Shroud Top 과 SOR1 접촉전



그림 7. Shroud Top 과 SOR1 접촉후

#### 다. OWS 선형출력 지시치 비정상

운전주기 및 날짜 : 57주기운전, 2009. 03. 14

##### (1) 증상

(가) 정상 운전 중 OWS 원자로 보호계통 B 채널 선형출력이 23 MW 지시하였다.

##### (2) 현황 및 원인

(가) 원자로는 정상이었으며 원자로 보호계통 정지 설정치 또한 이상이 없었다.

(나) 중성자계측기 신호처리기인 Signal Isolator 비정상임을 확인하였다.

##### (3) 조치사항 및 결과

(가) 57주기 원자로 운전종료 후 예비품으로 교체하여 신호처리기 출력신호가 정상임을 확인하였다.

##### (4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 중성자신호 측정채널의 기기는 중성자검출기, 신호증폭기, 신호처리기로 구성되어있으며, 이들 기기의 고장이 발생되면 주제어반에 경보가 발생한다. 하지만 이번 비정상은 OWS 상에만 지시를 나타내는 기기인 신호처리기의 입출력신호의 선형출력만 비정상이므로 주제어반의 경보는 발생하지 않았다.

##### (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

##### (6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

#### 라. 순간정전발생

운전주기 및 날짜 : 57주기운전, 2009. 03. 31

(1) 증상

(가) 순간정전으로 OWS에서 로드 센터 #2 비정상 경보가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 01:07 (G91.2) OWS에서 로드 센터 #2 비정상 경보가 발생하였으나 원인을 파악할 수 없었고, 연구원 변전실에서 특이사항이 없었다.

(나) OWS 정보외엔 다른 비정상이 없었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) Rx 로드 센터 #2로 전원을 공급하였다.

① MCC #2, 공기 압축기 C01, 실험 설비 파워센터는 정상이었다.

② 조명분전반 #2(2층 전기실 판넬)는 비정상이었다.

① 사무실 1, 2, 3층 조명은 정상이었으나, 사무실 4, 5, 6층 조명 및 콘센트 전원은 비정상이었다.

㉠ 4:00 사무실 4, 5, 6층 조명 및 콘센트 전원 정상 복구하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

마. 제어봉 #2 인출 비정상

운전주기 및 날짜 : 59주기 운전, 2009. 08. 24

(1) 증상

(가) 하나로 출력 상승 중 제어봉 #2이 인출되지 않았다.

(2) 현황 및 원인

(가) 냉중성자계통 시운전을 위하여 하나로 출력 상승 중 제어봉 #2이 인출되지 않았다.

(나) 제어봉 #2 인출과정에서 리셋 스위치는 동작 했으나 다운 스위치가 동작되지 않았다.

(대) 현장 제어봉 Dry-well에서 모터의 회전 상태를 확인한 결과 MLC 명령에 따라 인출 방향으로 정상적인 회전 동작이 이루어지지 못하고 좌우로 약간

의 회전을 반복하고 있었다. 위와 같은 증상은 기계적인 비정상 마찰, 드라이버 카드 및 모터 고장 등의 문제로 예상 되며 이에 대한 현장 시험 결과 제어봉 #2 드라이버 카드가 비정상임을 확인하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 예비품 드라이버 카드(내부회로)로 교체 설치 후 성능시험을 수행하여 정상임을 확인하였다.

(나) 이번 비정상은 제어봉 구동을 위해 최종적으로 모터 구동 펄스를 발생시키는 드라이버의 고장이 원인이었다. 현장 판넬에서 사용 중인 4개의 독립된 전자 회로들은 오랜 사용으로 인해 전자부품들 한계 수명이 임박했으며 고장 발생 빈도도 증가하는 추세이다. 현재 제작이 완료된 국산화장치를 빨리 실제 운전애 적용해 근본적인 문제점을 해결할 예정이다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 제어봉의 고장이 발생되면 제어 알고리즘은 자동으로 고장난 제어봉을 알고리즘으로부터 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않으며, 2개 이상의 제어봉이 동시에 고장이면 원자로는 원자로 제어시스템에 의해 자동 정지된다.

(나) 고장난 제어봉은 최종 위치에서 더 이상 움직이지 않는데 만약 고장난 제어봉이 어떤 원인에 의해 3.0 mm 이상 움직이면 이중 고장으로 간주하여 원자로 제어시스템에 의한 원자로 정지가 발생된다.

(다) 1개 제어봉이 기계적인 고장 또는 기타 원인으로 인하여 고장임이 판명되면 현재의 출력보다 높게 원자로 출력을 상승시키지 않아야 하고 만일 원자로 출력이 50 %F.P를 넘는 경우에는 50 %F.P 이하로 유지시켜야 한다.

(라) 2개 이상의 제어봉 고장이 발생하였음에도 불구하고 제어 알고리즘에 의한 자동정지가 발생되지 않았다면 원자로 제어시스템의 수동정지 스위치를 작동시켜 즉시 원자로를 정지시켜야 한다.

(마) 원자로 제어시스템에 의한 원자로 정지 후 1시간 이내 보수가 불가능한 경우는 원자로 보호시스템을 수동으로 정지시켜야 한다.

(바) 품질등급 확인 후 Q, T등급의 경우 QAP-BS-15.1 개정1 부적합 사항 관리절차서에 따라 부적합 사항 보고서를 발행하여 절차에 따라 처리한다.

(사) 고장난 제어봉의 보수를 완료하여 정상상태로 복원시키기 전까지는 원자로를 재기동하지 않아야 한다.

(야) HANTAP-05-OD-ROP-TA-05, 6.3.1.3에 의거 비정상 상태 발생시 전 후의 경위와 조치 등에 관한 상세한 내용을 비정상보고서에 기록을 유지한다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(자) 제어봉은 모두 4개로 구성되며, 18-봉 핵연료 집합체가 장전되는 내부노심의 원통형 유동관 외부를 통하여 노심 내에 삽입되거나 인출된다. 제어봉의 기능은 원자로 정상 운전 시 노심에 제어봉 일부가 삽입되어 원자로를 임계로 유지시키며, 또한 원자로 출력을 조절한다. 제어봉의 인출에 따른 양의 반응도 삽입시 반응도 삽입 속도를 0.33 mk/sec 이하로 제한함으로써 노심에 과도한 반응도가 삽입되는 것을 방지한다. 정상적인 인출 및 삽입시의 구동은 단계전동기(Stepping Motor)로 이루어지며, 제어봉 장치에 의한 원자로 정지 시에는 자기 클러치가 풀림으로써 제어봉이 노심 내로 자유 낙하하여 원자로 출력을 급속히 감소시킨다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

바. 1차냉각 펌프 #2 오일 레벨 저수위 경보 발생

운전주기 및 날짜 : 59주기운전, 2009. 10. 19

(1) 증상

(가) 30MW 운전 중 1차냉각 펌프 #2 가동 중 오일 레벨 저수위 경보가 발생되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) OWS경보 발생이외 원자로는 비정상상황이 아니었으며, 오일이 자동으로 공급되는 오일러의 고장으로 보충되지 못한 것으로 판단하였다.

(나) 펌프의 베어링 하우징 안에는 많은 양의 오일이 있으며, 소모량은 오일러에서 자동으로 공급되므로 이번 원자로 운전주기 계획정지 시 확인하여 문제를 해결하기로 하였다.

(다) 현장에서 펌프 소음 및 이상유무 확인 결과 이상 없었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 오일러의 공기 배기 구멍에 유막이 형성되어 오일 자동급유가 안되었다. 따라서 유막을 제거하고 오일을 보충하여 비정상을 해결하였다.

(나) 1차냉각 펌프 #2를 시험기동하여 경보 해제를 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

사. 핵연료 누설 비정상

운전주기 및 날짜 : 59주기운전, 2009. 10. 24

(1) 증상

(가) 10월 22일부터 지발중성자 및 방사선 감시계통의 RE19 / 22 / 23 가스값이 지속적으로 증가하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 핵연료 누설 의심으로 출력을 감발(5 MW =>1 MW)하던 중, CNS 수소 압력값이 120 kPa 이하로 떨어져 원자로 제어계통이 정지되었다.

(나) 냉중성자원 시설 시운전 결과를 바탕으로 헬륨 냉동기의 운전 로직을 변경하여 정지가 발생하지 않도록 조치 할 예정이다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 노심에 장전된 36봉 핵연료 20다발 및 18봉 핵연료 12다발 중 누설이 의심되는 핵연료부터 누설검사 실시하여, 36봉 핵연료 9다발, 18봉 핵연료 7다발 및 시험핵연료 1다발, 총 17다발을 누설 검사 하였다.

(나) 누설검사 결과 OR1에 장전된 핵연료(KHC-023, 연소도:44.83 %, U-235)가 누설된 것으로 확인되었으며, 노심에서 인출하여 작업수조에 임시로 보관하고, 이후 사용후 핵연료저장조로 이송할 예정이다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

아. 제어봉 #2 고장 경보 발생

운전주기 및 날짜 : 60주기운전, 2009. 11. 20

(1) 증상

(가) 제어봉 #2에서 고장 경보가(Encoder 에러) 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 11/18일 원자로 제어시스템의 증성자 고출력에 의한 원자로 불시정지 후 11/20 13:34 원자로 재기동중(700kW, CAR : 598.4 mm) 제어봉 #2 고장 경보가 발생하였다.

(나) 제어봉 #2의 J4001이 고장일 때 invalid 에러가 발생하는 것을 대비하여 실제 J4001 이 고장이 아님에도 불구하고 노이즈로 인하여 invalid 에러가 생겨서 11/19일 전자칩을 미리 교체하였는데, 이 전자칩으로 인하여 Encoder 에러가 발생됨을 확인하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 출력을 내린 후 예비품 전자칩으로 교체 한 후 출력을 상승시켰으며, 안전운전을 위해 원자로 출력을 28.5 MW로 운전하기로 결정하였다.

① 고출력 정지 설정치를 110 % =>105 %로 임시 변경하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) Encoder 에러는 하나로 제어봉은 스텝핑 모터를 사용하고 있으며 제어컴퓨터와 연계하여 200 ms마다 위치제어신호를 처리한다. 스텝핑모터에 부착된 엔코더로부터 모터 회전신호를 실시간으로 받아 명령신호와 비교하고 3스텝 이상의 불일치가 발생되면 즉시 “Encoder Error” 신호를 제어컴퓨터로 내보내고 제어컴퓨터는 제어봉 고장을 선언한다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

## 5. 2010년 사례

### 가. 원자로 건물 일부 정전

운전주기 및 날짜 : 62주기운전, 2010. 01. 21

(1) 증상

(가) 02:00경 원자로 건물 4층에서 조명 및 콘센트 전원이 off되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) 4층 조명 및 콘센트의 전원 Off에 의해 NTD 서버가 다운되었다.

(나) 2층 전기실 KM-561-E-F02의 내부 차단기 중 561-E-L06이 트립된 것을

확인하였다. 그러나 4층 관련 561-E-L08은 On 상태였다.

(나) 확인 결과, 2층 전기실 에어컨 실외기에 부하가 걸려 KM-561-E-F02 패널 내부의 전기실 에어컨(#1) 차단기인 561-E-L06이 트립되어 있었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 2층 전기실의 561-E-L06을 리셋시키고, 지하 전기실의 460 V 로드 센터 KM-541-E-V02-04 판넬이 트립됨을 확인하고 리셋 후, 정상 복구하였다.

(나) NTD 서버 다운에 대해서는 2층 전기실 에어컨 전원을 Off 한 후, 정상적으로 복구될 때까지 가동을 중지하기로 하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

나. 스마트 캡슐 조사시험 시 연결부 결함발생

운전주기 및 날짜 : 63주기운전, 2010. 02. 19

(1) 증상

(가) 원자로 출력 30 MW로 운전 중, 노심 OR5에 장전된 스마트 캡슐 상부에서 기포가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 30 MW 도달 후 약 5시간 후, 계장 캡슐에서 기포가 발생하여 담당자에게 통보하였고, 담당자의 확인 결과, 안내관과 보호관 사이에서 기포가 올라오는 것을 확인하였다.

(나) 처음엔 해당 부분이 진동 등으로 볼트가 풀렸을 것으로 판단하여 tool을 이용하여 볼트를 조였다. 그러나 기포가 재발생하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 기포의 재발생으로 계장 캡슐을 수조 밖으로 꺼내어, 해당 부분을 분해해보니, 안내관과 보호관 연결부위의 우레탄 가스킷이 손상되어 있음을 확인하였다.

(나) 우레탄 가스킷에 대한 조임 토크 기준이 없어서 제작사 조립과정에서 과도하게 조임이 된 상태에서 노심에 장착된 후, 온도 상승에 의한 열팽창 등에

의하여 손상이 발생한 것으로 추정하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 누설에 의해 방사선 감시기의 고방사선 경보가 동작하였거나 동작되어야 했을 때, 교과부에 구두 보고 및 상세 보고를 한다.

(5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 해당 부분 조임 시, 이에 맞는 토크 렌치 장치를 마련하고, 이를 절차서에 기술할 예정이다.

다. 제어봉 #2 고장 경보 발생

운전주기 및 날짜 : 63주기 운전, 2010. 02. 23

(1) 증상

(가) 원자로 출력 30 MW 운전 중, 제어봉 #2 고장으로 주제어반 경보 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 30 MW 출력 운전 중 제어봉 #2 고장((394.2 mm) 경보 발생으로 원인을 파악하기 위해 출력 감발 결정하였고, Xe 생성 영향을 최소화하기 위해 서서히 출력을 감발하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 원자로 정지 후 점검한 결과, 제어봉 3스텝 차이에 의하여 발생한 것으로 추정하였다.

(나) 제어봉 구동 명령신호와 구동 신호 사이의 인터페이스 카드 이상으로 판단하여 교체하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 제어봉의 고장이 발생되면 제어 알고리즘은 자동으로 고장난 제어봉을 알고리즘으로부터 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않는다.

(나) 2개 이상의 제어봉이 동시에 고장이면 원자로는 원자로 제어계통에 의해 자동 정지되고, 고장난 제어봉은 최종 위치에서 더 이상 움직이지 않는다. 만약 고장난 제어봉이 어떤 원인에 의해 3.0 mm 이상 움직이면 이중 고장으로 간주하여 원자로 제어계통에 의한 원자로 정지가 발생된다.

(다) 1개 제어봉이 기계적인 고장 또는 기타 원인으로 인하여 고장임이 판명되

면 현재의 출력보다 높게 원자로 출력을 상승시키지 않아야 하고 만일 원자로 출력이 50 %F.P를 넘는 경우에는 50 %F.P 이하로 유지시켜야 한다.

- (라) 2개 이상의 제어봉 고장이 발생하였음에도 불구하고 제어 알고리즘에 의한 자동정지가 발생되지 않았다면 원자로 제어시스템의 수동정지 스위치를 작동시켜 즉시 원자로를 정지시켜야 한다.
- (마) 원자로 제어시스템에 의한 원자로 정지 후 1시간 이내 보수가 불가능한 경우는 원자로 보호시스템을 수동으로 정지시킨다.
- (바) 품질등급 확인 후 Q, T등급의 경우 QAP-BS-15.1 개정1 부적합 사항 관리 절차서에 따라 부적합 사항 보고서를 발행하여 절차에 따라 처리한다.
- (사) 고장난 제어봉의 보수를 완료하여 정상상태로 복원시키기 전까지는 원자로를 재기동하지 않아야 한다.
- (야) HANTAP-05-OD-ROP-TA-05, 6.3.1.3에 의거 비정상 상태 발생 시 전후의 경위와 조치 등에 관한 상세한 내용을 비정상보고서에 기록을 유지한다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

- (가) 제어봉은 모두 4개로 구성되며, 18-봉 핵연료 집합체가 장전되는 내부노심의 원통형 유동관 외부를 통하여 노심 내에 삽입되거나 인출된다. 제어봉의 기능은 원자로 정상 운전 시 노심에 제어봉 일부가 삽입되어 원자로를 임계로 유지시키며, 또한 원자로 출력을 조절한다. 제어봉의 인출에 따른 양의 반응도 삽입시 반응도 삽입 속도를 0.33 mk/sec 이하로 제한함으로써 노심에 과도한 반응도가 삽입되는 것을 방지한다. 정상적인 인출 및 삽입시의 구동은 단계전동기(Stepping Motor)로 이루어지며, 제어봉 장치에 의한 원자로 정지 시에는 자기 클러치가 풀림으로써 제어봉이 노심 내로 자유 낙하하여 원자로 출력을 급속히 감소시킨다.

(6) 절차서 반영 필요사항

- (가) 없음

라. 하나로 2차 냉각계통 Basin 레벨 저-저 수위 경보 발생

운전주기 및 날짜 : 63주기운전, 2010. 03. 03

(1) 증상

- (가) 원자로 출력 30 MW 운전 중, Basin 수위가 3.74 m로 정상 수위였는데, 저-저 경보 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

- (가) 수위는 정상이었으며 계기 오동작으로 Basin 수위 저-저 경고 발생하였다.
  - (나) 담당자에게 연락하여 극저수위 오동작 발생이 생길 경우를 대비하여 극저수위 계기를 MLC에서 우회시켰다.
- (3) 조치사항 및 결과
- (가) 저-저 스위치의 점점 개방 시, 저항값이  $\infty$ 이어야 하나, 수백 k $\Omega$ 으로 측정되었다.
  - (나) 케이블 절연 상태는 정상이었다.
  - (다) 저-저 스위치의 접점을 직접적으로 동작시키는 자석의 위치가 정위치에서 다소 돌아가 있음을 확인하고 이를 시정하여 동작을 정상화시켰다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
- (가) 극저수위에서의 2차 냉각펌프가 정지된다.
- (5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 없음.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- (가) 없음.

마. 1차 냉각계통 Pipe 누설 경고 발생  
 운전주기 및 날짜 : 65주기운전, 2010.05.22

- (1) 증상
- (가) 1차 냉각계통에서 Pipe 누설 경보가 발생하였다.
- (2) 현황 및 원인
- (가) 지하 1층 1차 냉각계통 누수 감지기에서 냉각수 누수를 확인하였다.
  - (나) 해치를 열어 확인한 결과, 1차 정화계통 펌프에서 누수를 확인하였다.
- (3) 조치사항 및 결과
- (가) 1차 정화계통 펌프를 분리하여 Mechanical Seal 교체하여 펌프 조립 후, 축정렬을 실시하고 기동 후, 누수가 없음을 확인하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
- (가) 1차 냉각 펌프는 원자로 수조 수위가 저-저수위(11.7 m)이고 동시에 유량계(331-FT-034)의 지시가 저유량(492 kg/s)이면 자동으로 정지된다.
  - (나) 1차 냉각수 우회 유량 밸브(331-HV-037)와 1차 정화계통 밸브(333-HV-002)는 원자로수조 저-저 수위 (11.7 m) 에서 자동으로 닫힌다.
  - (다) 1차 정화 계통 펌프가 원자로 수조 수위 저-저수위(11.7 m)에서 자동 정지

된다.

- (라) 원자로 수조 수위가 저-저 수위 (11.7 m)가 되면 정지봉 펌프 흡입관의 공기 유입으로 원자로는 자동 정지된다.
  - (마) 배수조 펌프의 자동 운전 모드에서 원자로 배수조가 고수위(1.19 m)이상이고 RIPF에 있는 액체 폐기물 저장 탱크 수위가 고-고수위 미만일 때 수위 스위치(346-LS-014)에 의해 제1번 펌프(346-P01)가 기동하며, 계속해서 배수조 수위가 고-고수위(1.30 m)에 이르면 수위 스위치(346-LS-015)에 의해 제 2번 펌프(346-P02)기동한다. 또한 배수조 수위가 저수위(0.6 m)에 이르면 펌프는 자동 정지한다.
  - (바) 원자로 수조 수위가 극저수위(4.80 m)에 도달되면 제어실 주제어반 JP-3의 WIN18과 OWS(G51/4/5/6/7)에 경보가 발생하여 비상 보충수 주입 격리밸브 (346-LV001/002/003/004)가 자동으로 열려 비상 보충수 공급이 시작되고, 저-저-저-수위 (4.90 m)에 도달되면 OWS에 경보가 발생 (G51/1/2/3/8)되고 비상 보충수 주입이 중지된다.
  - (사) 원자로 수조 수위가 극저수위(4.8 m)에 도달되고 원자로 배수조 수위가 고수위(1.19m)이상 이거나 고-고수위(1.30 m) 이면 액체폐기물 이송밸브 (LV007)가 닫히면서 액체폐기물이 원자로 수조 내로 유입된다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 확인 누설의 경우 누설율이 1 GPM 이하이면 최소한 4 시간에 1회씩 누설율을 확인해가며 최대 4주간 운전을 계속할 수 있다. 그러나, 누설율이 1 GPM을 초과하거나 누설율의 증가가 1일 2배 이상이면 원자로를 정지하여야 한다. 또한, 총 누설량이 액체 폐기물 처리 능력 및 저장 능력을 초과할 때에도 즉시 원자로를 정지하여야 한다.
  - (나) 미확인 누설의 경우는 1시간 이내에 경보기의 오작동 여부를 확인하고, 경보기가 정상적이며 원자로를 즉시 정지하여야 한다. 단, 경보기의 오동작으로 확인된 경우는 다음에 따른다.
  - (다) 누설검출기중 어느 하나 이상이 운전 불가능 상태가 되면 원자로 수조 수위 및 원자로실 배수조 수위를 최소한 12 시간에 1 회씩 확인해가며 최대 4 주간 운전을 계속할 수 있다.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- (가) 없음.

바. 제어봉 #2 고장으로 인한 출력 감발

운전주기 및 날짜 : 65주기운전, 2010. 06. 05

(1) 증상

(가) 원자로 출력 운전 중, Encoder 에러에 의한 제어봉 #2 고장 경보가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 제어봉 #2 국산화 Interface 장치에서 스텝 에러가 발생하지 않고, Encoder 에러에 의한 '제어봉 고장' 발생하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 스텝 에러없이 Encoder 에러가 발생하기 위해서는 해당 Optical isolator의 오동작과 프로그램 상의 스텝 에러 누적에 의한 두 가지 원인이 있을 수 있다.

① Optical isolator는 Encoder 에러가 발생 시, 이 신호를 MLC로 전송하는 독립 부품으로, 현장 Interface 장치에서 실제로 Optical isolator는 동작하였고 그 신호에 따라 Encoder 에러가 발생한 상태로 오동작 가능성은 없었다.

② Encoder 에러 발생 조건은 cycle time(0.2 s)당 명령과 귀환 스텝 차이가 3스텝 이상인 경우에 발생한다.

③ 0.2 s 주기로 스텝 송수신이 반복되는 과정에서 1스텝의 Encoder 에러는 계수 방식 특성상 발생과 소거를 간헐적으로 반복하는데, 이 1스텝을 Interface 장치 내부에서 스텝 에러로 간주하고 누적시켰을 때, 이 누적치가 3스텝이 되면 Encoder 에러를 발생할 수 있다.

(나) 따라서 제어 프로그램에서 누적에 의한 Encoder 에러 발생 부분을 삭제하고 ROM을 다시 제작한 후, #2와(문제 발생) #4(국산 장치가 사용 중)의 ROM을 교체하였으며, 수동 운전 모드로 시험을 실시하였는데, 이상이 없음을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 제어봉의 고장이 발생되면 제어 알고리즘은 자동으로 고장난 제어봉을 알고리즘으로부터 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않는다.

(나) 2개 이상의 제어봉이 동시에 고장이면 원자로는 원자로 제어계통에 의해 자동 정지된다.

(다) 고장난 제어봉은 최종 위치에서 더 이상 움직이지 않는데 만약 고장난 제

어봉이 어떤 원인에 의해 3.0 mm 이상 움직이면 이중 고장으로 간주하여 원자로 제어계통에 의한 원자로 정지가 발생된다.

- (라) 1개 제어봉이 기계적인 고장 또는 기타 원인으로 인하여 고장임이 판명되면 현재의 출력보다 높게 원자로 출력을 상승시키지 않아야 하고 만일 원자로 출력이 50 %F.P를 넘는 경우에는 50 %F.P 이하로 유지시켜야 한다.
  - (마) 2개 이상의 제어봉 고장이 발생하였음에도 불구하고 제어 알고리즘에 의한 자동정지가 발생되지 않았다면 원자로 제어계통의 수동정지 스위치를 작동시켜 즉시 원자로를 정지시켜야 한다.
  - (바) 원자로 제어계통에 의한 원자로 정지 후 1시간 이내 보수가 불가능한 경우는 원자로 보호계통을 수동정지시킨다.
  - (사) 품질등급 확인 후 Q, T등급의 경우 QAP-BS-15.1 개정1 부적합 사항 관리절차서에 따라 부적합 사항 보고서를 발행하여 절차에 따라 처리한다.
  - (아) 고장난 제어봉의 보수를 완료하여 정상상태로 복원시키기 전까지는 원자로를 재기동하지 않아야 한다.
  - (자) HANTAP-05-OD-ROP-TA-05, 6.3.1.3에 의거 비정상 상태 발생시 전 후의 경위와 조치 등에 관한 상세한 내용을 비정상보고서에 기록을 유지한다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 제어봉은 모두 4개로 구성되며, 18-봉 핵연료 집합체가 장전되는 내부노심의 원통형 유동관 외부를 통하여 노심 내에 삽입되거나 인출된다. 제어봉의 기능은 원자로 정상 운전 시 노심에 제어봉 일부가 삽입되어 원자로를 임계로 유지시키며, 또한 원자로 출력을 조절한다. 제어봉의 인출에 따른 양의 반응도 삽입시 반응도 삽입 속도를 0.33 mk/sec 이하로 제한함으로써 노심에 과도한 반응도가 삽입되는 것을 방지한다. 정상적인 인출 및 삽입시의 구동은 단계전동기(Stepping Motor)로 이루어지며, 제어봉 장치에 의한 원자로 정지 시에는 자기 클러치가 풀림으로써 제어봉이 노심 내로 자유 낙하하여 원자로 출력을 급속히 감소시킨다.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- (가) 없음

## 제 2 절 원자로 불시정지 사례

### 1. 2006년 사례

가. 연구원내 정전으로 인한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 42주기 운전, 2006. 04. 03

#### (1) 증상

(가) 정전으로 인한 원자로가 정지되었다.

#### (2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW로 운전 중 정전으로 인한 원자로가 정지되었으며 정지봉 및 제어봉 삽입 확인하였으며 디젤 발전기가 기동됨을 확인하였다.

(나) 확인 결과, 제 3연구동 건물에서 SGR(Selective Ground Relay)동작으로 불시 정전이 발생한 것이었다.

#### (3) 조치사항 및 결과

(가) 원자로실 백열등 점등을 확인하였고, 1·2차 냉각계통, 1차 정화계통, 사용후계통, 반사체계통, 압축 공기계통, 소방계통 펌프를 정지시켰으며, 중력배수 전단 밸브 잠그고, 레벨 트립 핸드 스위치를 1 % valid 위치를 전환하였으며, 정지봉 전원을 off시켰다.

(나) 각 시설의 환기계통과 보안문 점검을 요청하였다.

(다) 154 kV 예비전력 투입으로 하나로 전력 정상복구되었으며, 각종 회전기기를 원상복구하였다.

(라) 원자로를 재기동하려 하였으나 잉여 반응도 부족으로 원자로 재기동이 불가하였다.

(마) 비상 부하반 디젤 발전기가 상용전원으로 전환되었고, 디젤 발전기를 정지시켰다.

(바) 환기팬을 정상 기동하였다.(732계통 #2 / 4 / 5 / 6과 731계통 #4 / 6)

(사) 수조 방사선이(A 채널 : 15900 nGy/h, B 채널 : 13800 nGy/h, C 채널 : 13800 nGy/h)상승하였지만 상승속도가 둔화되었다.

(아) 노심온도(42 ℃)와 작업수조(44 ℃)로 2 ℃밖에 차이가 나질 않아 1·2차 냉각펌프를 기동하여 노심하부 온도를 떨어뜨린 후, 펌프를 정지하였다.

#### (4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 모든 제어봉, 정지봉이 완전 삽입됨을 확인한다.(제어봉, 정지봉 인출램프는 OFF상태이며 삽입램프는 ON상태).

(나) 중성자계측 계통에 의해 출력영역 중성자속 준위 감소함을 확인한다.

- (다) 3급 및 4급 전원상실 경보가 발생한다.
  - (라) 주 제어반 경보(WN-01, 09, 12, 13, 14, 15, 16) 및 보조계통 제어반 경보(WN-21, 24, 31, 29, 28, 32)가 발생한다.
  - (마) 중력배수밸브가 열린다.
  - (바) 6.6 kV스위치가어 차단기가 작동한다.
  - (사) 460 V 비상 부하반 차단기 및 ATS가 동작한다.
  - (애) 디젤 발전기 기동으로 3급 전원이 공급된다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 교류(4급) 전원이 상실되면 제어실의 OWS와 보조계통 제어반에 3급 및 교류(4급) 전원 상실 경보가 발생된다. 그리고 교류(4급) 전원을 공급 받아 가동 중이던 모든 계통이 정지되어 각 제어반의 스위치에 내장된 상태 불일치 램프가 켜진다. 하나로의 대부분의 조작 스위치는 운전모드 위치에서 고정되는 형태이기 때문에(기동 위치에 있으면 그 신호가 정지위치로 변경되기 전까지 계속 유지됨) 정전이 되면 스위치의 운전 모드와 실제 기기의 운전상태가 불일치하게 되어 각 스위치의 상태 불일치 표시등(discrepancy lamp)이 켜진다. 그리고 정전이 되면 계통의 상태가 비정상이 되므로 각종 이상상태를 알리는 경보가 제어반과 운전원 워크스테이션에 발생된다.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- (가) 없음

나. 수조상부 고방사선으로 인한 불시정지  
 운전주기 및 날짜 : 45주기운전, 2006. 07. 22

- (1) 증상
- (가) 하나로 수조상부에서 고방사능 감지로 제어봉 낙하하여 원자로가 정지되었다.
- (2) 현황 및 원인
- (가) 하나로 출력 감발 후 0 MW에서 제어봉을 수동으로 삽입과정 중 수조상부에서 고방사능 감지로 제어봉이 갑자기 낙하되었다.
  - (나) 수조 방사선 감지기 3개중 2개에서 방사능이 제한치 이상으로 감지되었다.
  - (다) 수조 고방사능 경보가 발생하였다.(A 채널 : 24700 nGy/h, B 채널 : 35700 nGy/h)
  - (라) 방사선 감시계통 RE19 가스에서 적색 경보가 발생하였다.(6.145E-6 uCi/cc)

(마) 크립캡슐(04S-23K)내부에 벨로우즈가 장착되어 있는데 그 안에 공기가 잔류되어 있고 이 공기중 아르곤 가스는 방사화 되어 Ar-41로 변한다. 정상적으로는 캡슐 실험 중 정상적인 상태에서는 고압의 헬륨가스에 의해 압축되어 노심 속에 위치한 벨로우즈 내부에 남아 있게 되므로 수조 상부에 올라오지 않는다. 하나로 출력이 0 MW로 내려왔다는 것을 확인 한 후 크립캡슐 실험을 종료하기 위해 벨로우즈의 압력을 제거하는 과정에서 압력이 대기압으로 떨어졌을 때 벨로우즈 잔류 공기가 배관을 통해 수조 상부 위치로 올라오게 되었다. 이때 수조상부 방사능 감지기에 제한치 이상의 방사능이 감지되었으며 제어봉이 낙하하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 없음.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 추후 시험 전 벨로우즈 내 잔류 공기를 완전히 제거하기로 하였다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 누설에 의해 방사선 감시기의 고방사선 경보가 동작하였거나 동작되어야 했을 때, 교과부에 구두 보고 및 상세 보고를 한다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

## 2. 2007년 사례

### 가. 외부전원 상실로 인한 순간정전으로 원자로 불시정지

운전주기 및 날짜 : 46주기운전, 2007.03.05

(1) 증상

(가) 원자로 출력 30 MW로 운전 중 정전으로 인한 원자로 정지가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW로 운전 중 정전으로 인한 원자로 정지가 발생하여, 정지봉 및 제어봉 완전 삽입을 확인하였다.

(나) 확인 결과 연구소 핵융합 랩에서 전기설비 관련 실험도중 OCR 동작으로 정전이 발생한 것이었다.

(다) 원자로 재기동을 위해 정지봉 및 제어봉을 인출하였으나 Xe 영향으로 재기동이 불가하였다.

(3) 조치사항 및 결과

- (가) 원자로실 백열등 점등을 확인하였고, 1·2차 냉각계통, 1차 정화계통, 사용 후계통, 반사체계통, 압축 공기계통, 소방계통 펌프를 정지시켰으며, 중력배수 전단 밸브 잠그고, 레벨 트립 핸드 스위치를 1 % valid 위치를 전환하였으며, 정지봉 전원을 off시켰다.
- (나) 각 시설의 환기계통과 보안문 점검을 요청하였다.
- (다) 154 kV 예비전력 투입으로 하나로 전력 정상복구되었으며, 각종 회전기기를 원상복구하였다.
- (라) 원자로를 재기동하려 하였으나 잉여 반응도 부족으로 원자로 재기동이 불가능하였다.
- (마) 비상 부하반 디젤 발전기가 상용전원으로 전환되었고, 디젤 발전기를 정지시켰다.
- (바) 환기팬을 정상 기동하였다.(732계통 #2 / 4 / 5 / 6과 731계통 #4 / 6)
- (사) 수조 방사선이(A 채널 : 15900 nGy/h, B 채널 : 13800 nGy/h, C 채널 : 13800 nGy/h)상승하였지만 상승속도가 둔화되었다.
- (아) 노심온도(42 ℃)와 작업수조(44 ℃)로 2 ℃밖에 차이가 나질 않아 1·2차 냉각펌프를 기동하여 노심하부 온도를 떨어뜨린 후, 펌프를 정지하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

- (가) 모든 제어봉, 정지봉이 완전 삽입됨을 확인한다.(제어봉, 정지봉 인출램프는 OFF상태이며 삽입램프는 ON상태).
- (나) 중성자계측 계통에 의해 출력영역 중성자속 준위 감소함을 확인한다.
- (다) 3급 및 4급 전원상실 경보가 발생한다.
- (라) 주 제어반 경보(WN-01, 09, 12, 13, 14, 15, 16) 및 보조계통 제어반 경보(WN-21, 24, 31, 29, 28, 32)가 발생한다.
- (마) 중력배수밸브가 열린다.
- (바) 6.6 kV스위치기어 차단기가 작동한다.
- (사) 460 V 비상 부하반 차단기 및 ATS가 동작한다.
- (아) 디젤 발전기 기동으로 3급 전원이 공급된다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

- (가) 교류(4급) 전원이 상실되면 제어실의 OWS와 보조계통 제어반에 3급 및 교류(4급) 전원 상실 경보가 발생된다. 그리고 교류(4급) 전원을 공급 받아 가동 중이던 모든 계통이 정지되어 각 제어반의 스위치에 내장된 상태 불일치

램프가 켜진다. 하나로의 대부분의 조작 스위치는 운전모드 위치에서 고정되는 형태이기 때문에(기동 위치에 있으면 그 신호가 정지위치로 변경되기 전까지 계속 유지됨) 정전이 되면 스위치의 운전 모드와 실제 기기의 운전상태가 불일치하게 되어 각 스위치의 상태 불일치 표시등(discrepancy lamp)이 켜진다. 그리고 정전이 되면 계통의 상태가 비정상이 되므로 각종 이상상태를 알리는 경보가 제어반과 운전원 워크스테이션에 발생된다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

나. 제어봉 MOFR에 의한 원자로 정지

운전주기 및 말짜 : 51주기운전, 2007. 12. 14

(1) 증상

(가) 22:15경 제어봉 2번의 고장 발생과 동시에 MOFR에 의해 원자로 정지되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) 주제어반 제어봉 고장 경보 발생하였다.

(나) 제어봉 2번 리셋 소프트웨어가 작동되지 않아서, 현장제어반에서 J4001카드에 있는 리셋 스위치를 수차례 작동시킨 후 제어봉 2번 리셋 소프트웨어가 작동되었다.

(다) 정지봉을 인출하고 제어봉 2번을 수동으로 약 500 mm까지 인출하였으나 정상 작동되었다.

(라) 500 mm 인출된 상태에서 주제어반의 원자로 제어계통 정지버튼을 작동시킨 다음, 제어봉 Drive-Rod-In 상태를 확인하였으나 정상 작동하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 원자로 보호계통 판넬에서 “원자로 보호계통 정지”와 “SOR Not Poised” 인터록을 우회시키기 위하여 원자로 보호계통 회로를 임시 변경하였다.

(나) “반사체 저유량” 정지변수를 우회시키기 위하여 제어실 MMM 터미널을 통하여 정지설정값을 \$000로 임시 변경하였다.

(다) 현장 제어봉에 대한 조치없이 다시 수동으로 제어봉 2번을 약 500 mm까지 인출 또는 삽입을 반복하였으나 위치편차도 정상이었고 특별한 문제점 없이 정상 작동함을 확인하였다.

(라) 수동 정지 후 Drive-Rod-In 정상 동작 상태를 확인하였다.

- (마) 현장제어반에서 J4001 카드를 보관 중인 운전여유분과 교체 설치하고 제어봉을 작동시켰으나 고장 경보도 없이 전혀 작동을 하지 않았다. MLC로부터 구동신호는 정상적으로 전달되고 있으나 모터측으로 구동신호가 전달되지 않고 있었다.
  - (바) J4001 카드를 다시 다른 운전여유분으로 교체하고 작동을 시도하였으나 이전과 마찬가지로 고장 발생도 없이 제어봉이 전혀 움직이지 않았다.
  - (사) Indexer 카드를 운전 여유분으로 교체하고(J4001 카드는 그대로 사용) 동일한 방법으로 작동시켰더니 정상적으로 작동하였고, 드라이버 카드도 정상적으로 작동함을 확인하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전 절차
- (가) 제어봉의 고장이 발생되면 제어 알고리즘은 자동으로 고장난 제어봉을 알고리즘으로부터 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않으며, 고장난 제어봉은 최종 위치에서 더 이상 움직이지 않는데 만약 고장난 제어봉이 어떤 원인에 의해 3.0 mm 이상 움직이면 이중 고장으로 간주하여 원자로 제어계에 의한 원자로 정지가 발생된다.
  - (나) 2개 이상의 제어봉이 동시에 고장이면 원자로는 원자로 제어계에 의해 자동 정지된다.
- (5) 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 제어봉의 실제 위치는 보여주는 지시기뿐만 아니라, 제어 알고리즘에 의해 계산된 위치를 나타내는 지시계통도 항상 운전 가능한 상태에 있어야 하고, 제어봉의 이상 유무를 지시해 주는 고장경보 계통도 항상 운전가능상태로 유지되어야 한다.
  - (나) 제어봉의 실제위치와 계산위치는 주제어반과 OWS를 이용하여 최소한 12시간에 한 번씩 정기 점검되어 그 차이가 150스텝(3.0 mm)을 넘지 않음을 확인한다. 만약, 1개 제어봉이 고장 상태이거나 제어봉 고장 경보계통이 운전 불가능 상태이면 최소한 4시간마다 확인되어야 한다.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- (가) 없음.

### 3. 2008년 사례

가. 제어봉 MOFR에 의한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 56-1주기 운전, 2008. 12. 29

(1) 증상

(가) 제어봉 #4의 고장 및 MOFR에 의해 원자로 제어계가 정지되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) 12월29일 10:53 제어봉 #4이 고장 및 MOFR에 의한 원자로 정지가 발생하였다.(출력 : 30 MW, 제어봉 : 485.4 mm).

(나) 주제어반에 제어봉 고장(WN11) 경보 발생하였다.

(다) OWS에서 MOFR 경보를 확인하였다.

(라) 제어봉 삽입을 확인하였다.

(마) 원자로 제어계통 리셋 시킨 후 제어봉 #4을 고장 정지위치인 485.0 mm 전후까지 인출하여 출하됨을 확인하였다.

(바) 원자로 제어계통 원자로 정지변수인 제어봉 #4의 MOFR에 의한 원자로 제어계가 정지되었음을 확인하였다.

(사) MOFR이 성립하기 위해서는 해당 제어봉의 고장이 선행되어야 한다. 그러나 경보 목록 분석결과 제어봉 #4의 "Encoder 에러"와 "MOFR"이 거의 동시에 발생하였음을 확인하였다.

(아) 제어봉 구동장치 제어반 내의 엔코더 전원회로 선이 단자대에서 이탈됨을 확인하였다. 이는 최근 제어봉 구동장치 국산화를 위한 시험을 위하여 빈번한 회로 탈부착 과정에서 고정이 불완전하게 된 것으로 추정되었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 현장 제어회로 점검 결과 제어봉 #4의 스텝핑 모터에 부착된 엔코더 전원회로의 선이 단자에서 이탈된 것을 확인하였다.

(나) 정확한 제어봉 고장 원인 파악을 위해 원자로 보호계통 정지를 결정하였다.

(다) 현장에서 제어봉 #4의 구동상태 및 기계적 이상을 등을 점검한 결과 정상상태임을 확인하였다.

(라) 모든 제어봉 구동장치 제어반의 전선 정리 및 고정하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전 절차

(가) 제어봉의 고장이 발생되면 제어 알고리즘은 자동으로 고장난 제어봉을 알고리즘으로부터 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않는다.

(나) 2개 이상의 제어봉이 동시에 고장이면 원자로는 원자로 제어계통에 의해 자동 정지된다.

(다) 고장난 제어봉은 최종 위치에서 더 이상 움직이지 않는데 만약 고장난 제

어봉이 어떤 원인에 의해 3.0 mm 이상 움직이면 이중 고장으로 간주하여 원자로 제어계통에 의한 원자로 정지가 발생된다.

(5) 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 제어봉의 실제 위치는 보여주는 지시기뿐만 아니라, 제어 알고리즘에 의해 계산된 위치를 나타내는 지시계통도 항상 운전 가능한 상태에 있어야 하고, 제어봉의 이상유무를 지시해 주는 고장경보 계통도 항상 운전가능상태로 유지되어야 한다.

(나) 제어봉의 실제위치와 계산위치는 주제어반과 OWS를 이용하여 최소한 12 시간에 한 번씩 정기 점검되어 그 차이가 150스텝(3.0 mm)을 넘지 않음을 확인한다. 만약, 1개 제어봉이 고장 상태이거나 제어봉 고장 경보계통이 운전 불가능 상태이면 최소한 4시간마다 확인되어야 한다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

#### 4. 2009년 사례

##### 가. 중성자 고출력에 의한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 58주기운전, 2009. 04. 28

(1) 증상

(가) 원자로 제어계통의 중성자 고출력에 의한 원자로 불시정지가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 20:13분 중성자고출력에 의한 원자로 제어계통 정지가 발생하였다.(30 MW, CAR:588.4 mm).

(나) OWS 경보 및 주제어반 제어계통 정지(WN09) 경보가 발생하였고 제어봉의 삽입 상태를 확인하였다.

(다) 원자로 정지원인 파악 및 Xe의 영향으로 재기동이 불가하여 원자로 보호계통 정지를 하였다.

(라) 확인 결과, 핵연료 시험 루프 계통의 IPS 가스 유동에 따른 하나로 출력을 원인으로 판단하였다.

① 핵연료 시험 루프 계통의 비응축성 가스 배출 밸브를 열면서 가스 부피가 증가한다.

② 비응축성 가스가 배출되면서 유체 밀도 증가로 하나로 출력에 정반응도

가 주입된다.

(3) 조치사항 및 결과

- (가) 핵연료 시험 루프 계통 가동 전에 철저한 비응축성 가스 배기해야 한다.
- (나) 하나로 출력운전 중 비응축성 가스를 배기 금지 하였으며, 안전운전을 위해 원자로 출력을 28.5 MW로 운전하기로 결정하였다.
- ① 원자로 제어계통 고출력 정지 설정치를 110 % =>105 %로 임시 변경하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

- (가) 제어봉이 완전 삽입되었는지 확인한다.
- (나) 중성자계측계통에 의해 출력영역 중성자속 준위(G03.6/7, G06.6/7, G10.6/7)가 급속히 감소하였는지 확인한다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

- (가) 각각의 중성자출력 측정채널에는 선형출력신호에 대한 정지점점과 대수출력신호에 대한 정지점점이 제공되어 있다. 비정상적 출력상승 사고 시 선형출력신호와 대수출력신호가 2중으로 정지 기능을 수행한다. 적용되는 출력사고의 유형은 대수출력 고 증가율 설정치를 초과하지 않는 느린 출력상승 사고이다.

(6) 절차서 반영 필요사항

- (가) 없음.

나. 중성자 대수출력 고 증가율로 인한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 60주기운전, 2009. 11 .02

(1) 증상

- (가) 원자로 제어계통 A / B / C 채널에서 중성자 대수출력 고 증가율 정보가 발생하여 원자로 제어계통에 의한 원자로가 정지되었다.

(2) 현황 및 원인

- (가) 원자로 기동 및 재기동시 원자로 출력이 2 MW 임계지점에서 중성자 대수출력 고 증가율로 원자로 제어계통 불시정지가 총 5차례 발생하였다.
- (나) 대수출력 고 증가율 이외의 원자로 비정상사항은 없었다.
- (다) 원자로 기동운전에 따른 출력상승으로 IR1에 설치된 핵연료 시험 루프 IPS 내에  $\gamma$ -heating으로 인한 열전달이 이루어져 핵연료 시험 루프 IPS 내부 물의 비등이 일어난 것으로 판단하였다. 즉 IPS 내부에 기포 발생으로 원자

로출력에 정반응도를 증가시켜 원자로 대수출력이 순간적으로 증가한 것으로 판단하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 순간적인 원자로에 양의 반응도를 주는 원인을 제거하기 위하여 핵연료 시험 루프 운전상태를 저온 대기 2(핵연료 시험 루프 주냉각수 온도 85℃)상태로 유지 한 후 원자로를 기동하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 제어봉이 완전 삽입되었는지 확인한다.

(나) 중성자계측계통에 의해 출력영역 중성자속 준위(G03.6/7, G06.6/7, G10.6/7)가 급속히 감소하였는지 확인한다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

다. 중성자 고출력에 의한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 60주기운전, 2009. 11. 18

(1) 증상

(가) 중성자 고출력에 의한 원자로 제어계통에 의해 원자로 정지되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) 22:45 중성자 고출력으로 원자로 제어계통에 의해 원자로가 일시정지되었다.

(나) OWS 경보 및 주제어반 제어계통 정지(WN09) 경보가 발생하였고, 제어봉 삽입 상태를 확인하였다.

(다) 정지 원인 파악 및 Xe의 영향으로 원자로의 재기동이 불가하여 원자로 보호계통 정지를 하였다.

(라) 핵연료 시험 루프 계통의 IPS에서 시험 핵연료가 인출한 상태에서 기포가 누적되었다가 일순간에 분리 되면서 기포효과로 원자로출력에 정반응도를 주어 순간적으로 출력이 상승된 것으로 판단하였다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 핵연료 시험 루프의 주냉각수 유량을 증가(1.67 kg/s => 1.7 kg/s)하여 운전한 후 원자로를 기동하였다.

- (나) 핵연료 시험 루프의 주냉각수 유량 및 압력, 원자로 출력 등 운전변수 변화 감시 강화하였다.
- (다) 안전운전을 위해 원자로 출력을 28.5 MW로 운전하기로 결정하였다.
  - ① 고출력 정지 설정치를 110 % =>105 %로 임시 변경하였다.
- (라) 원자로 재기동중(700 kW, CAR:598.4 mm) 제어봉 #2 고장 비정상 발생하여 제어봉 #2 전자칩 교체 후 출력을 상승시켰다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
  - (가) 제어봉이 완전 삽입되었는지 확인한다.
  - (나) 중성자계측계통에 의해 출력영역 중성자속 준위(G03.6/7, G06.6/7, G10.6/7)가 급속히 감소하였는지 확인한다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
  - (가) 없음.
- (6) 절차서 반영 필요사항
  - (가) 없음.

라. 중성자 고출력에 의한 원자로 정지  
 운전주기 및 날짜 : 60주기운전, 2009. 11. 22

- (1) 증상
  - (가) 중성자 고출력에 의한 원자로 제어계통 불시정지가 발생하였다.
- (2) 현황 및 원인
  - (가) 11월 20일 안전운전을 위해 원자로 출력을 28.5 MW로 운전하기로 결정하였다.
    - ① 고출력 정지 설정치를 110 % =>105 %로 임시 변경하였다.
  - (나) 11월 22일 21:16 핵연료 시험 루프 IPS 저유량 A / B / C(1.37 kg/s) 경보가 발생하였다가 즉시 자동으로 경보가 해제되었다.
  - (다) 21:16 원자로 제어계통(원자로 고출력)에 의해 원자로 정지되었다.
  - (라) OWS경보 및 주제어반에 제어계통 정지(WN09) 경보가 발생되었다.
  - (마) 중성자계측계통의 출력영역 중성자속 준위 및 제어봉 삽입상태를 확인하였다.
  - (바) 원자로 정지원인 파악 및 Xe의 영향으로 재기동이 불가하여 원자로 보호계통 정지를 하였다.
  - (사) 핵연료 시험 루프 계통 점검 결과.

- ① 주냉각수펌프 토출 압력과(1.59 Mpa => 0.95 Mpa) 주냉각수 유량이 감소하였다.(1.73 kg/s => 1.32 kg/s)
- ② IPS 입구 압력과(0.7 Mpa => 0.61 Mpa) IPS 출구 압력이 감소하였다.(0.46 Mpa => 0.45 Mpa).
- (아) 위의 핵연료 시험 루프 계통 점검 결과의 내용에서 보듯 기포가 누적되었다가 일순간에 분리 되면서 기포효과로 원자로출력에 정반응도를 주어 순간적으로 출력이 상승된 것으로 판단하였다.
- (3) 조치사항 및 결과
  - (가) 핵연료 시험 루프 주냉각수 계통의 공기를 제거하고 충수를 하였고, IPS 조사공에 모의 핵연료를 장전하였다.
  - (나) 핵연료 시험 루프 주냉각수 유량 및 압력, 원자로 출력 등 운전변수 변화 감시를 강화하였다.
  - (다) 안전운전을 위해 원자로 출력을 28.5 MW로 운전하기로 결정하였다.
    - ① 고출력 정지 설정치를 110 % => 105 %로 임시변경하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
  - (가) 제어봉이 완전 삽입되었는지 확인한다.
  - (나) 중성자계측계통에 의해 출력영역 중성자속 준위(G03.6/7, G06.6/7, G10.6/7)가 급속히 감소하였는지 확인한다.
- (5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
  - (가) 없음.
- (6) 절차서 반영 필요사항
  - (가) 없음.

마. 냉중성자원 수소계통 고압력에 의한 원자로 정지  
운전주기 및 날짜 : 60주기운전, 2009. 11. 27

- (1) 증상
  - (가) 냉중성자원 수소계통 고압력에 의한 원자로 제어계통 불시정지가 발생하였다.
- (2) 현황 및 원인
  - (가) 60주기운전을 핵연료 시험 루프 기포효과로 불시정지 후 안전운전을 위해 원자로 출력을 28.5 MW로 운전하기로 결정하였다.
    - ① 고출력 정지 설정치를 110 % => 105 %로 임시 변경하였다.

- (나) 냉중성자원의 수소 고압력으로 원자로 제어계통에 의한 원자로 정지가 발생하였다.
  - (다) OWS 경보 및 주제어반 제어계통 정지(WN09) 경보가 발생하였고, 중성자 계측계통의 출력영역 중성자속 준위 및 제어봉 삽입상태를 확인하였다.
  - (라) 원자로 정지원인 파악 및 Xe의 영향으로 재기동이 불가하여 원자로 보호계통 정지를 하였다.
  - (마) 냉중성자 시설의 압축공기계통 정지로 인하여 저압력 발생에 따른 헬륨냉각계통의 밸브가 닫혔고, 이에 따라 수소계통 고압력으로 원자로제어계통에 의한 불시 정지되었다.
  - (바) 원자로 불시 정지 상세 과정은 다음과 같다.
    - ① 냉중성자 압축공기계통 불시 정지되었다.
    - ② 헬륨압축기 및 냉동박스에 압축공기 공급이 중단되었다.
    - ③ 헬륨압축기 자동공압밸브 및 냉동박스 자동공압밸브가 닫혔다.
    - ④ 자동공압밸브 닫힘으로 인해 냉동박스 팽창터빈이 정지되었다.
    - ⑤ 헬륨냉동계통이 정지되어 수소계통 압력상승 200 kPa 초과로 인해 원자로 제어계통에 의해 원자로가 정지되었다.
- (3) 조치사항 및 결과
- (가) 냉중성자원 압축공기계통 제어기(PLC) 내부의 소프트웨어 점검결과, 공기 압축기 기동 및 정지 자동제어논리의 오류 발견 즉, 압축공기계통의 공급압력이 저압력 또는 저저압력 상태에서 후행 및 예비압축기 기동을 위한 신호 접점의 사용 오류를 발견하였다. 잘못된 접점을 사용함으로써 저압력이 발생되었는데도 후행 및 예비압축기가 가동되지 않았던 것이었다. 따라서 제작사와 함께 제어논리를 수정한 다음, 발생할 수 있는 모든 비정상 상태를 모사하고 선행, 후행 및 예비의 공기압축기가 순차적으로 기동 또는 정지되는지 성능시험을 반복하여 정상운전 상태로 조치 완료하였다.
  - (나) 주기점검 절차서를 작성하여 기기 점검을 하였다.
  - (다) 냉중성자 시설 공기압축계통 압력값 변화를 제어실 OWS 상에서 확인 가능하도록 설계를 변경하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
- (가) 제어봉이 완전 삽입되었는지 확인한다.
  - (나) 중성자계측계통에 의해 출력영역 중성자속 준위(G03.6/7, G06.6/7, G10.6/7) 급속히 감소하였는지 확인한다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

## 5. 2010년 사례

가. 냉중성자원 수소 고압력에 의한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 62주기운전, 2010. 01. 17

(1) 증상

(가) 냉중성자 시설의 냉각탑 수조수위 저-저수위 경보 발생으로 냉중성자원 2차 냉각펌프 #1 정지에 따라 원자로 제어계통 정지가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW로 운전 중 02시 28분 냉중성자 시설의 냉각탑 Basin 수위 전송기 오동작으로 수위가 저저수위(200 mm)가 되어, 냉중성자원 2차 냉각펌프 #1이 정지되었다.

(나) 2차 펌프 정지로 인하여 02시 44분 열교환기 1차측 냉각수 온도가 63 °C를 상회하였고 1차 냉각수 온도가 상승하면서 헬륨냉동기의 온도도 상승하여 88 °C에서 헬륨 냉동기가 정지되었다.

(다) 헬륨냉동기 정지로 냉중성자원 수소 고압력(200 kPa)이 발생하였고, 원자로가 정지되었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 현장 확인 결과 냉중성자원 냉각탑 저수조 수위는 정상 범위(200 mm ~ 400 mm)에 있었으나 OWS(G404.7)값은 156 mm를 지시하였다.

(나) 수위 전송기 배관을 확인해보니, 고압측 및 저압측 배관이 동결되어  $\Delta P$  측정에 오류가 발생한 것으로 확인되었다.

(다) 고압측 및 저압측 배관에 기존 열선을 보완 조치하고, 외부 온도 영향을 감소시키기 위해 보온재로 단열시켰다.

(래) 수위 전송기를 교정하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 냉중성자원 Basin 저저수위 또는 냉각팬 3대가 모두 Fault 또는 고고진동일 때 냉중성자원 2차 냉각펌프가 정지된다.

- (나) 이와 같은 계통 비정상일 때, 정지 신호를 주었는데 정지가 되지 않으면 불일치 상태로 OWS에 경보가 발생하지만 이번 경우처럼 정상적으로 펌프가 정지하면 OWS에 경보가 발생하지 않는다.
- (5) 관련하여나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
  - (가) 없음.
- (6) 절차서 반영 필요사항
  - (가) 없음.

나. 냉중성자원 수소 고압력에 의한 원자로 정지  
 운전주기 및 날짜 : 63주기운전, 2010. 02. 25

- (1) 증상
  - (가) 냉중성자원 실험동 및 부속기기동 정전으로 헬륨냉동기가 정지되어 냉각능력 상실로 인한 수소 고압력으로 원자로 제어계통이 정지되었다.
- (2) 현황 및 원인
  - (가) UVR(Under Voltage Relay)동작으로 인한 연구원 6. 6kV 정전으로 냉중성자원 계통이 정지되었다.
- (3) 조치사항 및 결과
  - (가) 연구원 정전 복귀 후 냉중성자원 ACB(Air Circuit Breaker) 차단기 스위치를 작동하였다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전절차
  - (가) 없음.
- (5) 관련하여나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
  - (가) 없음.
- (6) 절차서 반영 필요사항
  - (가) 없음.

다. 원자로 제어계통 정지(MLC Board 이상)  
 운전주기 및 날짜 : 63주기운전, 2010. 03. 10

- (1) 증상
  - (가) 30 MW 원자로 출력 운전 중 원자로 제어계통 정지가 발생하였다.
- (2) 현황 및 원인
  - (가) 30 MW 출력 운전 중, MLC 카드 오동작으로 추측되는 원자로 제어계통

정지가 발생하였다.

(나) 원자로 제어계통 정지가 발생하면 OWS 경보창에는 ‘발생원인 변수’와 ‘원자로 제어계통 정지’ 경보가 동시에 기록되어야 한다.

(다) 그러나 이번 원자로 정지는 ‘원자로 제어계통 정지’만 기록되는 현상이 발생하였다.(그림 1)

(라) 이 현상은 MLC로 들어가는 원자로 제어계통 정지 변수는 정상이지만, 이 정지 신호를 받아들여 제어봉을 낙하시키는 최종 정지 회로의 오동작으로 인해 발생했다고 추측할 수 있다.

2010-03-10 11:13:56	UNACK_RTN	F678RE46_AH	GROUP_257	None	
2010-03-10 11:13:54	UNACK_ALM	F678RE46_AH	GROUP_257	None	
2010-03-10 11:13:14	UNACK_RTN	F678RE46_AH	GROUP_257	None	
2010-03-10 11:12:58	UNACK_ALM	F678RE46_AH	GROUP_257	None	
2010-03-10 11:11:24	UNACK_RTN	F678RE46_AH	GROUP_257	None	
2010-03-10 11:11:23	UNACK_ALM	F678RE46_AH	GROUP_257	None	
2010-03-10 11:11:22	UNACK_RTN	F678RE46_AH	GROUP_257	None	
2010-03-10 11:11:14	UNACK_RTN	S1R6CLR-PV	ALARM_GROUP_10	None	RRS/RPS CH.C LOG RATE DEVIATION
2010-03-10 11:11:14	UNACK_RTN	S1R6_CN-PV	ALARM_GROUP_10	None	RRS/RPS CH.C LINEAR POWER DEVIATION
2010-03-10 11:11:14	UNACK_RTN	S1R6BLR-PV	ALARM_GROUP_06	None	RRS/RPS CH.B LOG RATE DEVIATION
2010-03-10 11:11:14	UNACK_RTN	S1R6_BN-PV	ALARM_GROUP_06	None	RRS/RPS CH.B LINEAR POWER DEVIATION
2010-03-10 11:11:14	UNACK_RTN	S1R6ALR-PV	ALARM_GROUP_03	None	RRS/RPS CH.A LOG RATE DEVIATION
2010-03-10 11:11:14	UNACK_RTN	S1R6_AN-PV	ALARM_GROUP_03	None	RRS/RPS CH.A LINEAR POWER DEVIATION
2010-03-10 11:11:12	UNACK_ALM	R1UB05D-PROOF	ALARM_GROUP_11	None	REACTOR SHUTDOWN BY RRS
2010-03-10 11:11:12	UNACK_ALM	S1R6CLR-PV	ALARM_GROUP_10	None	RRS/RPS CH.C LOG RATE DEVIATION
2010-03-10 11:11:12	UNACK_ALM	S1R6_CN-PV	ALARM_GROUP_10	None	RRS/RPS CH.C LINEAR POWER DEVIATION
2010-03-10 11:11:12	UNACK_ALM	S1R6BLR-PV	ALARM_GROUP_06	None	RRS/RPS CH.B LOG RATE DEVIATION
2010-03-10 11:11:12	UNACK_ALM	S1R6_BN-PV	ALARM_GROUP_06	None	RRS/RPS CH.B LINEAR POWER DEVIATION
2010-03-10 11:11:12	UNACK_ALM	S1R6ALR-PV	ALARM_GROUP_03	None	RRS/RPS CH.A LOG RATE DEVIATION
2010-03-10 11:11:12	UNACK_ALM	S1R6_AN-PV	ALARM_GROUP_03	None	RRS/RPS CH.A LINEAR POWER DEVIATION
2010-03-10 11:10:51	UNACK_ALM	F678RE46_AH	GROUP_257	None	

그림 8. 원자로 제어계통 정지 당시의 경보 리스트

(3) 조치사항 및 결과

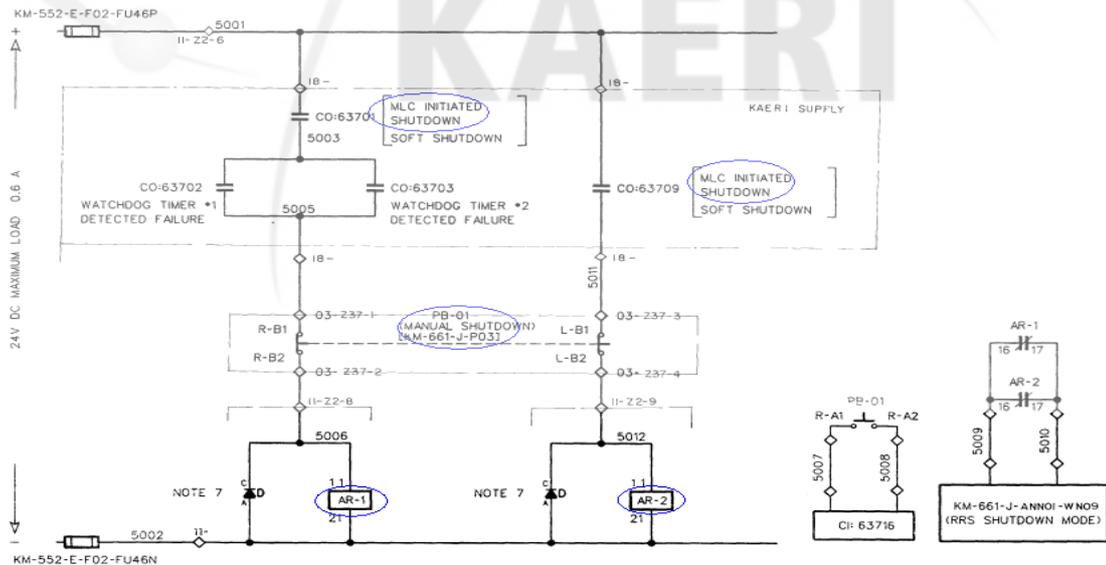


그림 9. 원자로 제어계통 정지 회로

(가) 그림 2는 원자로가 정상 운전 중일 때의 정상 접점을 나타낸다.

(나) 원자로 제어계통 정지 신호가 들어오거나 스위치 및 신호선들의 결선이 불

량하면 계전기의 접점들이 제어봉의 전원회로를 개방시켜 제어봉이 낙하하게 된다.

(다) 따라서 ‘전원 공급용 퓨즈’, ‘MLC initiated Shutdown’ 접점 출력용 카드, ‘Manual Shutdown’ 스위치, 최종단의 계전기(AR-1,2), 원자로 제어계통 소프트웨어의 점검이 필요하다.

① 전원 공급용 퓨즈.

㉠ 퓨즈로부터 계전기까지 신호선의 러그 및 볼트 조임 상태 등을 확인한 결과 이상이 없었다.

② MLC Initiated Shutdown 접점 출력용 Card.

㉠ MLC에 의한 RRS 정지 명령은, 그림 3의 접점 3,4번을 개방시키고, 그림 2의 계전기들을 소자시켜 원자로를 정지시킨다.

㉠ 이 카드의 기능 점검을 위해 100회 이상 원자로 제어계통 리셋 => 정지를 반복했으나 특이사항은 없었다.

③ Manual Shut down 스위치.

㉠ 이 스위치는 스프링 탄성력에 의해 단락이 유지되며 누를 때만 개방되는 구조이다.

㉠ 누름과 해제 상태를 100회 이상 실험 결과 특이사항은 없었다.

④ 최종단의 계전기(AR-1,2).

㉠ 전원을 공급 및 차단하면서 계전기 코일의 여자 상태를 30회 이상 확인결과 특이사항은 없었다.

⑤ 원자로 제어계통 소프트웨어 시험.

㉠ 각각의 원자로 제어계통 정지변수에 대한 실증적인 시험으로 모의 신호를 주었을 때의 원자로 제어계통 정지가 정상적으로 동작하는지를 테스트한 결과 특이사항은 없었다.

(라) 여러 가지 시험 결과 특이한 상황이 발생되지 않아서 ‘MLC Initiated Shutdown Card’를 예비품으로 교체하여 원자로 운전을 정상화시켰다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

라. 냉중성자원 수소 고압력에 의한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 64주기운전, 2010. 04. 18

(1) 증상

(가) 헬륨냉동기 터빈 #2의 입구 밸브가 닫힌 후, 터빈 #2의 속도가 급감하면서 헬륨냉동기 정지로 인해 냉중성자원 수소 고압력 발생하여 원자로 정지되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) 64주기 운전 시작 후 안정적인 헬륨냉동기 터빈 #2 출구 압력이 저압력 (0.9bara)에 의해 헬륨냉동기가 정지되었다.

(나) 이에 따라 냉동용량의 부족으로 인해 수소계통 압력이 상승하여 냉중성자원 수소 고압력으로 원자로가 정지되었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) PT 2240 압력 전송기는 IPA에서 헬륨냉동기로 돌아오는 저압 헬륨 압력을 지시하며 정상 운전 중에는 거의 압력 변화가 발생하지 않는다.

(나) 이에 따라 린데(제작업체)에 요청하여 린데측에서 모델을 통해 계통의 전반적인 것을 확인하였으나 특이사항 발견하지 못하여 재기동을 요청하였다. 그러나 재기동 후 동일원인으로 헬륨냉동기 정지되었다.

(다) 린데측에서 PT2240 압력 전송기의 신호값을 5초 => 1초로 변경하여 확인 결과, 압력 지시값이 순간적으로 PLC로 전송되지 않음을 확인하고 하나로 측에 점검을 요청하였다.

(라) 확인 결과 다음 사진과 같이 신호선 2가닥 중 1가닥이 점점 불량임을 찾아내어 조치하였다.



그림 10. 압력전송기 신호선의 결선

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련하여 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 계통에 설치된 신호 전송기를 확인, 주기적인 육안점검을 실시하고, 주기 점검 절차서를 작성하여 시행이 요구된다.

마. 원자로 출구 고온도에 의한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 65주기운전, 2010. 05. 21

(1) 증상

(가) 원자로 제어계통 정지 설정치 중 원자로 출구 고온도를 초과하여 원자로 제어계통이 정지되었다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW 운전 중, 원자로 출구 온도 2개 채널(TE-14/24)이 동일하게 약 41.9 °C를 유지하다가 TE-14(열교환기 #1)의 온도가 약 5 °C 정도 급상승하였다.

(가) 이 때의 2차 냉각수 열교환기 입구 온도는 약 29.4 °C로 정지 설정치(29.4 °C(Tsi) + 16 °C)를 초과하여 원자로가 정지되었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 1차 냉각계통의 두 루프 중, 한쪽에서만 비정상적으로 증가한 것으로 보아 계통 자체의 문제보다는 온도를 전송하는 센서 및 신호선의 문제로 판단하여 온도센서, 신호선 등을 점검하였다.

① 온도센서 + 신호선 점검.

㉠ MLC 입력단자에서 현장 신호선을 분리하여 현장의 저항값을 측정함 결과 TE-14는 31.1 °C(121. 1Ω), TE-24는 25.4 °C(109.9 Ω)로 약 5.7 °C의 차이를 보였다.(비정상 확인)

② 온도센서 점검.

㉠ 온도센서 두 대를 각 배관으로부터 분리하여 교정한 결과 정상임을 확인하였다.(정상 확인).

③ 신호선 점검.

㉠ 문제가 발생한 TE-14의 신호선 세 선에 대해 Lug를 포함한 저항을 측정한 결과, 2.3 Ω, 2.4 Ω 및 6.5 Ω이 측정됨을 확인하였다.(비정상 확

인).

(나) TE-14와 TE-24의 양 끝단을 절단한 후, 러그를 새 것으로 교체하여 재측정 결과 여섯 선 모두 2.3 ~ 2.4  $\Omega$ 이 측정되어 온도센서와 MLC에 정상 체결 후에 OWS에 지시되는 값이 두 채널 모두 24.9  $^{\circ}\text{C}$ 임을 확인하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 제어봉이 완전 삽입되었는지 확인한다.

(나) 중성자계측계에 의해 출력영역 중성자속 준위(G03.6/7, G06.6/7, G10.6/7)가 급속히 감소하였는지 확인한다.

(5) 관련 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 원자로 정지와 직접 관련이 있는 온도 센서들은 대해서는 1년 주기 교정 시 마다 러그를 교체한다.

(나) 교정 대상 온도 센서와 연결되는 RTD Converter의 신뢰성을 유지하기 위해 정확도 및 선형성 검증을 온도 센서 교정 후 연계하여 수행한다.

(다) 위 사항을 “온도 측정 계기류의 교정(PI-20)” 절차서에 반영한다.

바. 냉중성자원 수소 고압력에 의한 원자로 수동 정지

운전주기 및 날짜 : 65주기운전, 2010. 05. 23

(1) 증상

(가) 원자로 출력 30 MW 운전 중, 냉중성자원 헬륨냉동기가 정지되면서 수소 고압력이 발생하여 원자로를 수동 정지시켰다.

(2) 현황 및 원인

(가) 헬륨냉동기 비상정지신호는 릴레이75KA2의 정격 전압인 DC 24 V보다 높은 DC 45 V의 과전압이 공급되어 릴레이코일이 소손되어 정지버튼을 누른 것과 같은 현상이 발생하였다.

(나) 정지버튼을 누르면 헬륨냉동계통은 계통 정지와 동시에 ‘plant emergency button activated’에 의해 fail-closed type의 6개 메인 밸브가 모두 닫히게 되어 있다.

(다) 소손된 릴레이에 의해 냉중성자원 계통에 정지신호가 입력된 것과 같은 신호가 발생하면서 헬륨 냉동계통은 정지가 되었고, 이에 따라 냉각능력의 상실로 수소압력이 증가하였다.

(라) 또한 수소계통의 온도 상승으로 인해, 6개의 메인 밸브로 각각 격리된 헬륨 냉동계통 일부 구간의 온도상승을 유발함과 동시에 압력이 증가하여 수조내 입구측 SV3190가 개방되었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) WinCC 상 알람 로그인 'plant emergency button activated' 이 발생하면 헬륨냉동계통은 자기 자신의 보호와 함께 헬륨 압축기도 제어로직에 의해 정지시켜 인위적인 방법에 의해 해제할 수 없음을 확인하였다.(제작사 매뉴얼).

(나) 정지를 해제하기 위해 헬륨냉동계통의 제어 판넬로 인입되는 DC 24 V 릴레이를 하나씩 선택하면서 문제가 된 릴레이를 발견하여 새 것으로 교체하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전절차

(가) 없음.

(5) 관련하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 없음.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음.

사. 제어봉 MOFR에 의한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 65주기운전, 2010. 05. 30

(1) 증상

(가) 제어봉 #4에서 '제어봉 고장'과 동시에 'MOFR'에 의한 원자로 정지가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW 운전 중, 제어봉 #4에서 어떠한 에러도 발생하지 않고 '제어봉 고장'과 동시에 'MOFR'에 의한 원자로 정지가 발생하였다.

(나) 정지 발생 시 제어봉의 높이는 약 537 mm였고, 특이사항은 없었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) Interface 장치로부터 에러없이 'MOFR'이 발생하기 위해서는 제어봉 클러치의 비정상 동작으로 인해 제어봉이 낙하한 경우를 예상할 수 있다.

(나) 따라서 전자석에 전원을 공급하는 전원 공급기 비정상 또는 Dry-well 내부의 이물질로 인한 클러치와 Dry-well 접촉면의 자력 감쇄 등을 고려할 수

있다.

- ① 전원 공급기 동작 상태.
    - ㉔ 전원 상태, 러그 및 단자대 체결 상태 확인 결과 이상이 없었다.
  - ② Dry-well 이물질 검사.
    - ㉔ 내시경을 통해 내부 이물질의 존재 여부, 리셋 스위치 신호선의 늘어짐 및 간섭 상태, Magnet 접촉면 확인 결과 이상이 없었다.
  - ③ 동일 경보 재연 시험.
    - ㉔ 제어봉 #4을 알고리즘에 투입한 후 1, 5, 50, 500스텝씩 20여 차례 반복 구동하여 이상 없음을 확인하였다.
    - ㉕ 제어봉의 정지 높이인 500 ~ 600 mm 구간에서도 확인 결과 이상이 없었다.
- (다) 제어봉 #4 Interface 장치를 국산화 장치로 교체 후 위의 '수동 운전 모드' 시험과 동일한 방법으로 시험하였으나 어떠한 비정상도 발생하지 않았다.
- (4) 자동동작 사항 및 운전 절차
- (가) 제어봉의 고장이 발생되면 제어 알고리즘은 자동으로 고장난 제어봉을 알고리즘으로부터 제외시켜 더 이상 출력제어에 사용하지 않는다.
  - (나) 2개 이상의 제어봉이 동시에 고장이면 원자로는 원자로 제어계통에 의해 자동 정지된다.
  - (다) 고장난 제어봉은 최종 위치에서 더 이상 움직이지 않는데 만약 고장난 제어봉이 어떤 원인에 의해 3.0 mm 이상 움직이면 이중 고장으로 간주하여 원자로 제어계통에 의한 원자로 정지가 발생한다.
- (5) 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명
- (가) 제어봉의 실제 위치는 보여주는 지시기뿐만 아니라, 제어 알고리즘에 의해 계산된 위치를 나타내는 지시계통도 항상 운전 가능한 상태에 있어야 하고, 제어봉의 이상 유무를 지시해 주는 고장경보 계통도 항상 운전가능상태로 유지되어야 한다.
  - (나) 제어봉의 실제위치와 계산위치는 주제어반과 OWS를 이용하여 최소한 12 시간에 한 번씩 정기 점검되어 그 차이가 150스텝(3.0 mm)을 넘지 않음을 확인한다. 만약, 1개 제어봉이 고장 상태이거나 제어봉 고장 경보계통이 운전 불가능 상태이면 최소한 4시간마다 확인되어야 한다.
- (6) 절차서 반영 필요사항
- (가) 없음.

아. 반사체 저유량 의한 원자로 정지

운전주기 및 날짜 : 68주기운전, 2010. 11. 27

(1) 증상

(가) 반사체계통 저유량(WN15) 경보 발생으로 원자로 제어계통 정지가 발생하였다.

(2) 현황 및 원인

(가) 원자로 출력 30 MW로 운전 중, 반사체 펌프 불일치 램프 점등 후 원자로 제어계통이 정지되었다.

(나) 반사체 펌프 #2 정지 및 #1을 기동하였다.

(다) 원자로 제어계통 리셋 후 제어봉 #1 / 2 고장 경보 발생하였다.(Encoder 에러)

① 제어봉 #1/2 리셋 후 선택하였으나 선택되지 않았다.

② 확인결과 Auto 모드로 되어 있어서 Select 되지 않았음을 확인하였다.

(라) 제어봉 리셋 후 원자로 재기동을 시도하였으나 Xe의 영향으로 기동되지 않았다.

(마) 확인 결과, 반사체 펌프 #2 과부하계전기(열동계전기)가 동작하여 정지된 것이었다.

(3) 조치사항 및 결과

(가) 반사체 펌프 #2 열동계전기를 예비품으로 교체하였다.

(4) 자동동작 사항 및 운전 절차

(가) 구동중인 반사체 냉각펌프 고장 시, “대기” 상태의 펌프가 자동으로 기동된다.

(나) 대기 펌프가 기동되지 않고 저유량(26 l/s)이 되면 60초 후 제어계통에 의해 원자로가 정지된다.

(5) 하나로 운영 기술 지침서 내용 및 설명

(가) 운전중인 반사체 순환펌프 및 운전 대기중인 반사체 순환펌프 모두가 운전 불가능한 경우에는 즉시 원자로를 정지시켜야 한다.

(6) 절차서 반영 필요사항

(가) 없음

### 제 3 절 비정상 및 불시 정지 사례의 고찰

#### 1. 원자로 계통/설비 비정상 사례

가. 2006년부터 2010년 사이의 비정상 사례는 34건이 있었다. 이를 발생 원인 별로 분석하면 그림 11과 같다.

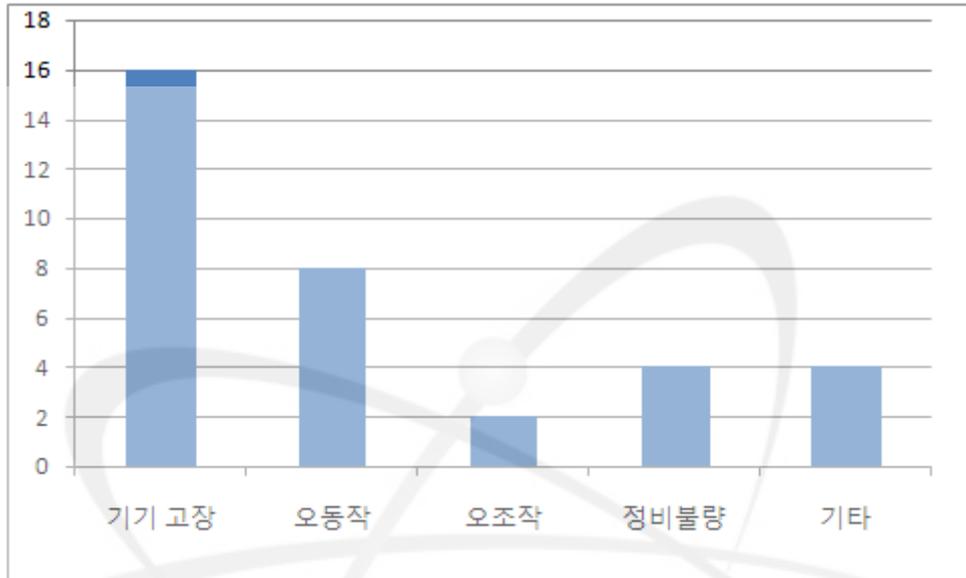


그림 11. 원자로 계통/설비 비정상 원인

그림 11에서 알 수 있듯이 기기 고장과 오동작으로 인한 비정상 발생 빈도가 약 70%(34건 중 24건)를 차지하고 있다. ‘기기 고장’과 ‘오동작’의 주된 원인은 1/2 냉각계통의 설비 및 각 계통의 이상유무를 전송하는 케이블의 비정상이었다. 이는 1995년 첫임계에 도달하여 2010년 현재까지 약 15년간을 가동하면서, 누적된 기기의 피로도 및 노후화를 가장 큰 원인으로 생각할 수 있다. 이는 그림 12. 원자로 계통/설비 비정상 조치 결과에서도 쉽게 설명할 수 있다.

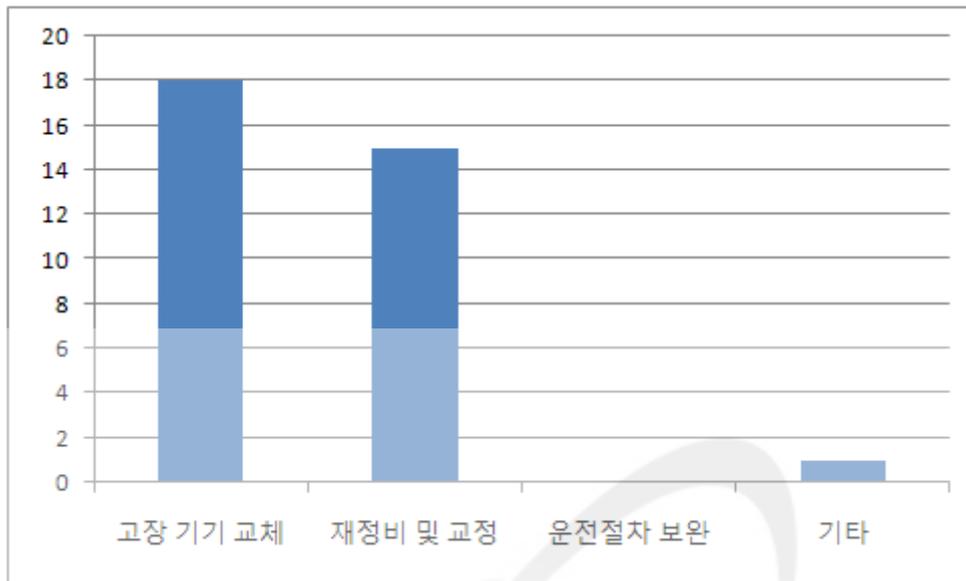


그림 12. 원자로 계통/설비 비정상 조치 결과

비정상 사례를 근본적으로 해결하기 위해서는 정/주기 점검 이외에도 전체적인 원자로 설비의 기기 검증이 필요하다. 원자로 가동기간 중에는 계통 설비의 종합적인 점검이 어려우므로 장기간 정지 할 때, 각각의 계통을 점검함으로써 기기고장이나 오동작에 의한 비정상 발생 빈도를 낮추어야 할 것이다.

## 2. 원자로 불시 정지 사례

가. 2006년부터 2010년 사이의 불시 정지 사례는 18건이 있었다. 이를 발생 원인 별로 분석하여 그래프로 나타내면 다음과 같다.

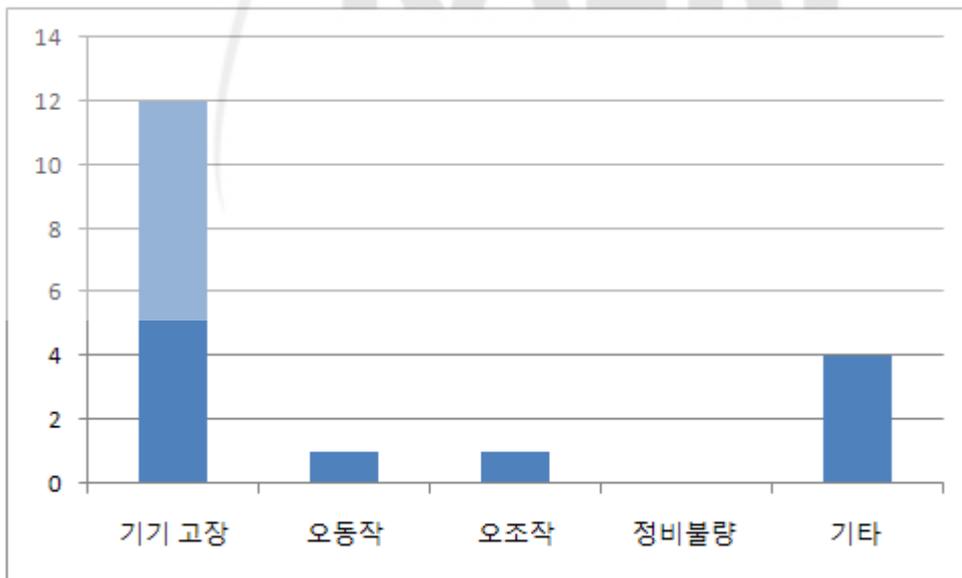


그림 13. 원자로 불시정지 원인

불시 정지 사례 역시 비정상 사례와 마찬가지로 ‘기기고장’ 및 ‘오동작’이 전체 불시 정지의 약 72%(18건 중 13건)를 차지하고 있다. 기기고장의 주 내용은 냉중성자원 시설의 계통 문제(12건 중 4건), 제어봉 고장(12건 중 3건)이 차지하고 있다. 냉중성자원 시설은 하나로와 직접적인 연관은 없지만 냉중성자원 시설의 정지변수가 하나로의 원자로 제어계통과 연결되어 있어서 불가항력적인 불시 정지였다. 제어봉 고장은 하나로와 직접적으로 연관이 있는 설비이지만, 제어봉을 국산화하는 과정에서 발생한 불시 정지이므로 제어봉의 국산화가 이루어진다면 이 원인으로 인한 불시 정지가 감소할 것이다.

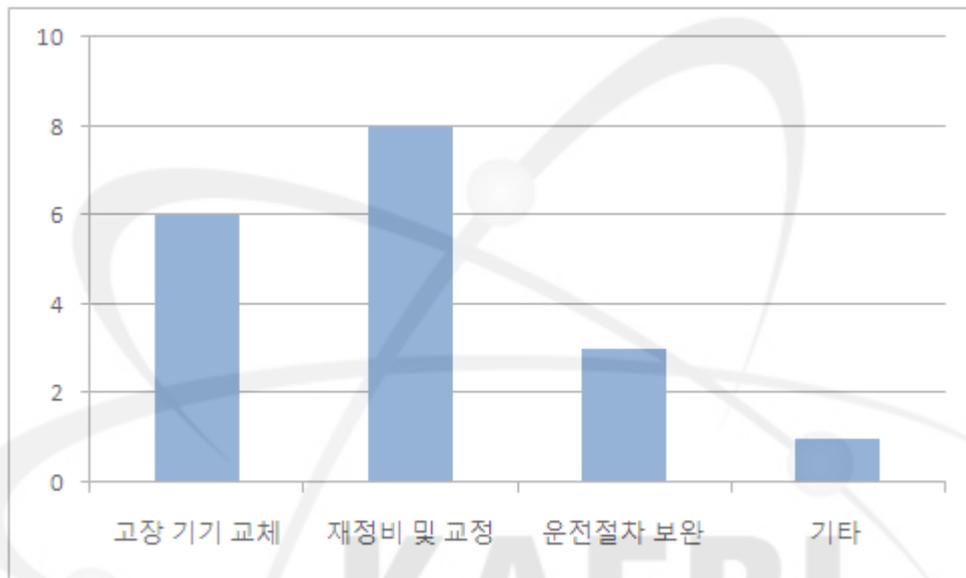


그림 14. 원자로 불시 정지 조치 결과

그림 14는 불시 정지의 조치 결과를 나타낸다. 이는 그림 12. 원자로 계통/설비 비정상 조치 결과와 비슷하게 ‘고장 기기 교체’와 ‘재정비 및 교정’이 주를 이루고 있다.

### 제 3 장 결론

1995년 첫 임계 달성 후 핵연료 시험 루프 설비와 냉중성자원 시설 공사 및 시운전을 마무리함으로서, 하나로는 처음 설계했던 모습을 갖추게 되었다. 2008년까지는 원자로 불시 정지의 횟수가 감소하다가 핵연료 시험 루프 및 냉중성자원 시설의 시운전을 시작하면서 원자로 불시 정지의 횟수가 증가 하였다. 주로 계통의 사소한 결함이 문제를 일으킨 것으로 설치 후 충분한 검증이 이루어지지 않았기 때문이었다. 하나로 계통에 의한 원자로 비정상 및 불시 정지는 주로 기기의 피로도 및 노후화로 인하여 발생하였다. 특히 전자 부품의 노후화로 인한 것은 미리 일정 기간이 되면 교체하는 것이 바람직하나 예산 부족으로 고장이난 후에 예비품으로 교체하고 있다. 또한 전반적인 각 계통의 신호선 점검을 통하여 이로 인해 발생하는 비정상 및 불시 정지를 방지해야 하지만 이 또한 예산 부족으로 시행되지 못하고 있다. 핵연료 시험 루프와 냉중성자원에 의한 원자로 정지는 앞으로 정주기 점검 절차에 따라 기기 및 계통의 정주기 점검과 이와 더불어 종합적인 원자로 설비/계통 점검을 수행하면 정지 횟수는 줄어들 것이다.

하나로 불시 정지 및 비정상 발생 원인을 분석하고 정리하고 이에 대한 경험을 교육함으로써 운전원들의 대처 능력을 향상시킬 수 있다.



KAERI

## 참고 문헌

- 임인철 외, 2006년 하나로 운영
- 임인철 외, 2007년 하나로 및 활용시설 운영
- 임인철 외, 2008년 하나로 및 활용시설 운영
- 임인철 외, 2009년 하나로 및 활용시설 운영
- 2006년 ~ 2010년 트립 보고서
- 2006년 ~ 2010년 부적합 사항 보고서
- 2006년 ~ 2010년 작업의뢰서
- 2006년 ~ 2010년 내부통신문



서 지 정 보 양 식							
<b>수행기관보고서번호</b>		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/TR-4223/2010							
제목 / 부제		하나로 불시 정지 및 비정상 현상에 대한 원인 분석 및 조치					
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)		강인혁 / 하나로운전관리과제					
연구자 및 부서명		인원호, 김희곤, 이민우, 황정식, 이충성, 이번현, 박주훈, 임경환 / 하나로운전관리과제					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2010		
페이지	83	도표	있음( o ), 없음( )	크기	A4		
참고사항							
비밀여부	공개( o ), 대외비( ), ___ 급 비밀			보고서 종류	기술 보고서		
연구위탁기관				계약번호			
초록(15-20 줄 내외)							
<p>연구용 원자로인 하나로는 1995년 첫 임계를 달성하였다. 본 보고서는 2006년부터 2010년까지 운전하면서 발생한 원자로의 불시정지 및 비정상 사례를 연도별 순으로 구분하여 자료를 수집, 분석하였다.</p> <p>원자로 불시정지 및 비정상 발생 원인을 살펴보면 제어봉 고장, 1/2차 냉각계통 고장 및 누수, 핵연료 손상, 정전, 기타계통 및 추가된 설비로 인하여 발생한 경우가 대다수였다. 발생한 사건들을 증상, 현황 및 원인, 조치 사항 및 결과, 자동 동작사항 및 운전 절차, 관련 하나로 운영기술지침서 내용 및 설명으로 나누어 정리하였다. 원자로 불시정지 사례 중 2009년과 2010년에는 핵연료 시험 루프 설비와 냉중성자원 설비의 추가 및 시운전으로 인하여 다른 년도보다 불시정지 회수가 증가하였다.</p> <p>이 보고서를 바탕으로 하나로 운전, 계통 점검, 예방 보수에 만전을 기하여 재발을 방지하고, 유사한 사례가 발생하더라도 완벽한 조치를 취함으로써 원자로의 안전에 기여할 수 있을 것이다. 보고서의 내용은 원자로의 안전 운전을 위한 하나로 운전원의 교육 자료로 활용할 예정이다.</p>							
주제명(10 단어 내외)		하나로, 불시 정지, 비정상					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-4223/2010					
Title / Subtitle		The Cause Analysis and Follow-up Action for Reactor Trip and Unanticipated Operational Occurrences in HANARO			
Project Manager and Department (Main Author)		Kang in hyuk / Reactor Operation Department			
Researcher and department		In won ho, Kim hee gon, Lee min woo, Hwang jeong sik, Lee bun hun, Park ju hun, Lim kyeong Hwan, Lee choong sung / Reactor Operation Department			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication date	2010
Page	8	Ill. & Tab.	Yes( o ), No( )	Size	A4
Note					
Classified	Open( o ), Restricted( ) ____ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 Lines)					
<p>HANARO achieved first criticality in 1995. In this report, the reactor trip and unanticipated operational occurrences in HANARO from 2006 to 2010 are described and analysed.</p> <p>Most of the reactor trip and unanticipated operational occurrences, are caused by control rod trouble, leakage in the primary and secondary cooling system, blackout, abnormal of FTL(Fuel Test Loop) and CNS(Cold Neutron Source) system. Particularly most of reactor trips occurred in 2009 and 2010, due to the FTL and CNS commissioning</p> <p>This report can be used for the operator education and as reference of reactor operation to prevent recurrence of the similar cases.</p>					
Subject Keywords(About 10 words)			HANARO, reactor trip, unanticipated operational occurrences		