

제 196회 원자력 안전메시지

# 해외원전 중요 운전경험

-2018년도 하반기 입수분-

# 사례 1. Bonding Jumper 손상으로 출력감발



## 사건 개요

제 목	규격미달 Bonding Jumper 설치에 따른 발전소 출력 감발
발생 일시	2017년 5월 21일
발전소	Prairie Island 1호기 (PWR) / 미국 / WH-2LP
보고서번호	WER ATL 18-0209

일자	발 생 사 항
'17.5.21	◦ 발전소 정상운전 중 현장 운전원이 현장점검 과정에서 주변압기 'A'상 지면에서 이물질 발견하였고 변압기 지반 구조물 볼트 1개가 과열되어 달아 오른것을 확인함
	◦ 점검결과 상분리모션 덕트와 변압기 연결용 Bonding Jumper 다수 손상
	◦ 해당 주변압기의 기능에는 문제가 없었으나 성능이 저하된 것으로 판단하여 볼트의 과열부분 안정화를 위해 80%까지 출력 감발하기로 결정함
	◦ 80%까지 출력 감발 후 볼트의 과열은 더 이상 진행되지 않았지만 열화상 카메라로 측정한 결과 1200°F 가 계속 유지됨
	◦ 엔지니어링팀 권고에 따라 볼트온도를 250°F이하로 유지하기 위해 50%까지 출력 추가 감발

# 사례 1. Bonding Jumper 손상으로 출력감발



## 원인 분석

- ❑ 직접원인 : 규격미달(지나치게 작음)인 Bonding Jumper 설치로 인한 볼트과열
- ❑ 근본원인
  - ✓ 자재관련 문서에 Bonding Jumper 길이와 볼트유형은 기술되어 있었으나, 규격(게이지) 정보는 누락
  - ✓ 규격에 맞는 Bonding Jumper 가 설치되도록 보장하는 형상관리 미흡

## 시정 조치사항

- ❑ 주변압기 'A'상 볼트 과열부위를 안정화하기 위해 출력을 50%까지 감발
- ❑ 적합한 규격의 Bonding Jumper로 전량 교체
- ❑ 공급사 변압기 지침서 개정 추진 : 적합한 Bonding Jumper 규격 명시

## 국내 활용방안

- ❑ 국내 유사사례 : 고리 4호기 IPB 냉각덕트 연결 볼트 과열에 의한 발전기 정지('09.2.9)
- ❑ 설비 점검 : 규격에 적합한 Bonding Jumper가 설치되어 있는지 확인 필요
- ❑ 절차서 개정
  - ✓ 상분리 모선덕트 정비 관련 절차서에 Bonding Jumper 규격 반영
  - ✓ 동일 규격의 Bonding Jumper 가 설치되도록 형상관리 강화

## 사례 2. 증기발생기 수위제어 상실로 원자로 수동정지



### 사건 개요

제 목	주급수 제어밸브 제어불능에 의한 증기발생기 수위제어 상실로 원자로 수동정지
발생 일시	2017년 9월 10일
발전소	Turkey Point 4호기(PWR) / 미국 / WH-3LP
보고서번호	WER ATL 18-0528

일자	발 생 사 항
'17.9.10	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 정상운전 중 폭우로 인해 주급수 제어밸브 수동선택스위치 외함에 빗물유입에 의한 제어신호 불량으로 주급수 제어밸브 차단됨</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ SG 'C' 수위제어계통 고장으로 SG 수위가 하락하여 출력 급속감발 후 원자로 수동정지</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ SG 수위제어를 위해 보조급수계통 동작, 발전소 NOT/NOP(모드3)으로 전환</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 발전정지 당시 발전팀은 MFCV 4B 자동제어 상실로 예비제어기를 이용해 수동모드로 제어</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 운전원이 SG 'C' 수위가 제어기 입력에 따라 반응하지 않는 것을 확인</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ MFCV 4C 완전 개방 및 해당 우회밸브 완전개방 요구신호를 수신한 상태에서 지속하락</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ MFCV 완전 닫힘으로 SG 'C' 수위가 20%에 도달하자 운전원이 원자로 수동정지</li> </ul>

※ MFCV (Main Feedwater Control Valve) : 주급수계통 유량제어밸브

## 사례 2. 증기발생기 수위제어 상실로 원자로 수동정지



### 원인 분석

- ❑ 직접원인 : 허리케인 Irma의 강풍을 동반한 폭우로 MFCV 4C 포지셔너 수동선택 스위치 외함 빗물 유입에 의한 제어신호 불량으로 밸브가 완전히 닫힘
- ❑ 근본원인
  - ✓ 포지셔너 외함 배수구멍 없음
  - ✓ 전선관 밀봉제 미 도포 등 전선관 설치 불량
- ❑ 기여원인 : 엔지니어링 변경문서에 대한 감독 및 지침 미흡

### 시정 조치사항

- ❑ 단자함/접속함 관련 지침서 개정  
(개정내용) 전선관을 전기외함에 넣고 밀봉제 도포 후 배수구멍을 천공
- ❑ 엔지니어링 엄격성 분야에 관한 의사결정 절차 반영
- ❑ EOC(상태해당범위) 조치 일환으로 안전성 관련 계통의 외함(총 121개) 검사 후 배수구멍이 없는 48개에 대해 천공작업 수행

※ MFCV (Main Feedwater Control Valve) : 주급수계통 유량제어밸브



## 사례 2. 증기발생기 수위제어 상실로 원자로 수동정지



### 시사점

- ❑ 국내 발전소의 MFCV는 건물내부에 설치되어 폭우에 의한 빗물유입 우려 없으나  
폭우/폭설 대비 발전소 외곽 중요기기의 전선관 외함 밀봉상태 점검 및 외함 내부 배수구멍 필요성 검토
- ❑ MSLB 또는 HELB와 관련된 Room에 설치된 중요기기 설계요건을 확인하여 외함 밀봉상태 점검 및  
전선관 외함 내부 배수구멍 필요성 검토

### 관련 사진



손상된 수동선택스위치



외함 하부에 배수구멍 천공



보수 후 전선관 밀봉제 도포

※ MSLB(Main Steam Line Break) : 주증기 배관 파열  
HELB(High Energy Line Break) : 고에너지 배관 파열

# 사례 3. 원자로 냉각재계통 압력경계 누설



## 사건 개요

제 목	용접부 균열결함으로 RCS 압력경계 누설 및 운전제한조건(LCO) 적용
발 생 일 시	2018년 1월 26일
발 전 소	Ginna 1호기 (PWR) / 미국 / WH-2LP
보고서번호	WER ATL 18-0316

일자	발 생 사 항
'18.1.26	◦ 정상운전 출력중 원자로냉각재계통에서 0.015gpm의 누설 확인
	◦ 격납건물에 진입하여 화학 및 체적제어계통의 유출관 격리밸브와 정상 유출수 (Letdown) 오리피스 사이 소켓 용접부에서 누설됨을 확인함
	◦ 액체탐상검사 수행결과, 1개소에서 1.25인치의 원주방향 선형지시를 확인함
	◦ 원자로냉각재계통 압력경계 누설로 기술지침서 운전제한조건 3.4.13(원자로냉각재계통 운전누설)을 적용함
	◦ 화학 및 체적제어계통 격리 및 Excess Letdown 유로로 전환하여 정비를 수행함



[누설 및 균열결함 부위]



# 사례 3. 원자로 냉각재계통 압력경계 누설



## 원인 분석

- 국부압력영향으로 인해 압력강하 → Letdown 오리피스 내부·후단에서 공동현상(Cavitation)발생(예상)  
→ 공동현상으로 인해 오리피스, 배관 침식발생 → 계통진동에 영향 → 고주파 진동으로 배관 용접부 취약 부위에서 균열 결함으로 발전(추정)

## 시정 조치사항

- 용접부 제거 후 보수작업 완료
- Letdown 오리피스 하류에서 진동 측정
- 차기 OH중 손상 오리피스 교체

## 국내 활용방안

- Normal Letdown 오리피스 및 후단 배관 용접부 주기적 건전성 점검
  - ✓ 오리피스 Assembly의 건전성 점검(침식여부 등) : 비파괴검사 등
  - ✓ 배관의 고주파 진동 가능성 및 용접부 건전성 점검
  - ✓ 장기 가동중검사계획(LTP) 반영 필요성 검토 등
- 유사사례 : 한빛2호기 CVCS Letdown 배관 소켓 용접부 균열결함 발생으로 누설부위 확인 및 차단 후 정비작업 수행

# 사례 4. RCP 모터 고정자권선 온도초과로 발전정지



## 사건 개요

제 목	RCP 모터 고정자권선 온도센서 케이블 연결불량에 의한 발전소 수동정지
발생 일시	2018년 5월 7일
발전소	Salem 2호기(PWR) / 미국 / WH-4LP
보고서번호	WER ATL 18-0518
일자	발 생 사 항
'18.5.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 정상출력운전 중 원자로냉각재펌프(RCP) 1대의 모터 권선온도가 195°F 에서 펌프정지 기준인 302°F까지 상승하여 출력을 감발함</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 이후 모터 권선온도가 제한치에 도달하여 발전소를 수동정지함</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 현장점검 결과 해당 RCP 저항온도감지기(RTD) 연결상태가 발전소 기술기준 및 Westinghouse 원 설계 기준을 준수하지 않은 것으로 확인됨</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 타 RCP 펌프에 대한 확대검토 결과 2대의 RCP 고정자 권선 RTD케이블 연결상태도 원 설계를 준수하지 않았고 1대만 올바르게 연결되어 있었음</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ RTD 자체성능은 문제 없었으며 형상이 잘못된 케이블을 공급사 권고사항에 따라 재연결 작업을 수행함</li> </ul>

※ RCP(Reactor Coolant Pump) : 원자로 냉각재펌프  
 RTD(Resistance Temperature Detectors) : 저항온도검출기

## 사례 4. RCP 모터 고정자권선 온도초과로 발전정지



### 케이블 상태 비교



잘못 연결된 케이블 상태



올바른 형상으로 연결된 케이블 상태

## 사례 4. RCP 모터 고정자권선 온도초과로 발전정지



### 원인 분석

- ❑ 직접원인 : 저항온도감지기(RTD) 현장 케이블 연결 불량
- ❑ 근본원인 : 부적절한 절차서로 인해 RCP 모터 고정자권선 RTD 현장케이블이 제대로 연결되지 않음

### 시정 조치사항

- ❑ 평판 와셔로 RTD 단자함의 현장케이블을 견고히 고정
- ❑ 타 RCP의 RTD 단자함 현장케이블 연결상태 점검 및 조치
- ❑ 공급사(Westinghouse)에서 제공한 RTD 연결 형상으로 재구성하여 절차에 반영
- ❑ RTD 및 열전대 특유의 단자 연결방식에 대한 교육 시행

### 국내 활용방안

- ❑ 절차서 개정
  - RTD 및 열전대와 같이 연결부위가 특유의 단자 연결방식(평와셔, 육각너트, 고정와셔 등)을 사용하는 중요기기의 경우 제작사에서 제공한 형상(사진, 도면)을 참고하여 연결방식을 관련 정비절차서에 반영할 필요성 검토 및 조치

※ RCP(Reactor Coolant Pump) : 원자로 냉각재펌프  
RTD(Resistance Temperature Detectors) : 저항온도검출기



# 사례 5. 시험 허용기준 위반 지연 확인



## 사건 개요

제 목	안전주입계통 유량 불평형시험 허용기준 위반 뒤늦은 확인
발생 일시	2018년 8월 15일
발전소	Gravelines 6호기 (PWR) / 프랑스 / Framatome
보고서번호	WER PAR 18-0685

일자	발 생 사 항
'16.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>충전펌프(HPSI펌프) 교체 후 정비후시험을 통해 성능요건을 만족함</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>정비후 시험 중 성능시험 절차서에 따라 안전주입배관 간 유량 불평형을 감시하였으며, 통상적인 충전펌프교체는 계통의 수력학적 특성을 저하시키지 않아 허용기준이 절차에 명시되어 있지않음</li> </ul>
'16.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>OH 후 재기동 과정에서 충전펌프 정비후 시험 중 측정된 유량불평형값이 허용 제한값을 초과함</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>유량평형시험 수행없이 중요한전결정(ODM)을 통해 충전펌프가 운전가능하다고 선언함</li> </ul>
'17.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>OH 중 안전주입밸브 해체 후 정비후시험 수행결과, 유량불평형값이 허용기준을 초과함</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>본 결과로 인해, '16.5 ODM 결정 관련자료에 의구심을 제기하고 보고</li> </ul>
'18.8.15	<ul style="list-style-type: none"> <li>저온관 안전주입배관 간 유량불평형 허용기준 위반이 뒤늦게 확인되었고, 고압안전주입계통이 약 1년간 운전불능 상태였음</li> <li>기준위반으로 운전제한조건(LCO)에 진입하고 불만족시 조치 수행했어야 하지만 조치 미수행</li> </ul>

## 사례 5. 시험 허용기준 위반 지연 확인



### 사건 요약

- ('18년 3월) 계획예방정비 착수 → ('18년 5월) '16년 발견된 유량 불평형 관련 ODM 개최  
→ 3개 저온관용 고압안전주입펌프계통 배관에서 유량 불평형 허용기준 초과를 뒤늦게 확인

### 원인 분석

- 직접원인 : 안전주입계통 유량 불평형 허용기준 위반
- 근본원인 : 중요한전결정(ODM) 결정 시 검토된 자료, 정보의 미흡으로 유량 불평형 여부 판단 오류

### 시정 조치사항

- 안전성관련계통 내 펌프 검사 및 통상적 교체에 관한 적정성평가 기준 신설
- 특정 기준을 1개 이상의 시험 절차서에 명시하는 경우 해당되는 기준을 '참조용' 기준에 추가

## 사례 5. 시험 허용기준 위반 지연 확인



### 시사점

#### □ 국내원전 안전주입계통 유량평형시험 현황

##### ➤ 표준형 원전(한빛3,4호기 기준)

- 계통 유량특성을 변화시킬 수 있는 수정이 행해졌을 경우 발전소 정지 중 시험을 수행함
- 대상 : HPSI펌프 및 LPSI펌프

##### ➤ 웨스팅하우스형 원전(고리3,4호기 기준)

- 비상노심냉각계통 펌프 유량 평형시험 수행하며, 표준형원전과 수행주기(기준) 동일
- 대상 : 충전펌프(HPSI펌프) 및 LPSI펌프

□ 펌프교체 및 정비에 따른 계통 유량특성의 변화여부 및 절차서 시험 수행기준 적용 필요성 검토시  
신중한 의사결정 필요

※ HPSI(High Pressure Safety Injection) : 고압 안전주입펌프  
LPSI(Low Pressure Safety Injection) : 저압 안전주입펌프



모든 종사자는 자만하지 않고  
지속적으로 의문을 제기한다.

 한국수력원자력주