

# Consideration of Internal and External NPP Failure Case by Human Error

Byung Do Ko , Tae Yeong Song

Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power co., (KHNP), Daejeon, 305-343, Korea

## ABSTRACT

**Objective:** This paper suggests the consideration to promote safety culture of NPP(Nuclear Power Plant) by analysis of operation experience, analysis of the reason for reactor trip by cause and group, and alternative suggestion for reduce reactor trip. **Results:** As a result of Analysis, human error was the most frequent reason for reactor trip. Safety culture enhancement, preventive action reinforcement for operator human error, human behavior improvement are strongly demanded. Finally continuous improvement activity such as operation experience, benchmarking, corrective action program and self-diagnosis program, for stable NPP operation, must be carried out.

Keywords: Nuclear Power Plant, Human Error, Trip, Operation Experience

## 1. Introduction

원자력발전은 1957년 세계최초 가압경수로형 원전의 상업운전을 시작한 이래로 70년대에 오일쇼크에 따라 화석연료를 대체할만한 가장 경제적인 에너지 원으로 각광받아 왔으며 현재 원자력발전소는 세계적으로 약 430여기가 상업 운전 중에 있다.

그러나 1979년도에 미국 쓰리마일섬(TMI) 원전사고와 1986년 체르노빌 원전사고를 통하여 원전 운전 경험에 대한 공유·교환의 중요성을 인지하고 이를 위해 미국원자력발전협회(INPO: Institute of Nuclear Power Operation)와 세계원자력발전사업자협회(WANO: World Association of Nuclear Operation)를 발족하여 각국의 원전 운전경험을 함께 공유하고 있다.

국내 원전운영자인 한수원(주) 역시 INPO, WANO를 통해 보고되고 있는 세계 모든 유형 원전 고장·사고 정보를 데이터베이스화(DB)하여 국내 발전소에서 정보를 활용할 수 있는 인트라넷 공유시스템인 원자력기술정보시스템(KONIS)을 운영함으로써 국내 원전운영의 안전문화 정립에 노력하고 있다.

원자력 안전문화의 개념은 국제원자력기구(IAEA: International Atomic Energy Agency)에서 만들어진 국제원자력안전자문그룹(INSAG: International Nuclear Safety Advisory Group)에 의하여 처음 도입되었으며 원전

운영조직 내에서 안전문화의 확립이 원자력시설의 안전운전을 위하여 필요한 기본 경영 원칙중의 하나임을 천명하였다. 또한 안전문화를 “안전문화는 최우선의 가치로서 원자력발전소 안전문제는 그 중대성으로 주의가 요망됨을 확립하는 조직 및 개인의 특성과 태도의 조합이다.” 라고 정의하고 있다.

본 논문은 국내외 원전 운전경험을 바탕으로 휴먼에러에 따른 원자로정지 사례 분석을 통하여 문제점을 진단하고 향후 안전문화 증진을 위한 방안에 대하여 고찰하였다.

## 2. Operation Experience

국내 원전사업자인 한수원(주)는 1996년부터 ‘운전 및 정비경험 관리절차’ 표준기행을 수립하여 이행 중에 있으며 특히 해외 기술정보관리의 경우 INPO, WANO에서 제공한 정보를 ‘원자력기술정보시스템(KONIS: KOREA hydro & nuclear power company Nuclear Information System)을 통해 관리 전과 하고 있다.

또한 해외 10여개 기관으로부터 정보를 수집하여 운영 Server, 정보수집 로봇, 데이터 베이스, 정보검색엔진, Web 프로그램 등 주요 구성모듈로서 DB 가공 및 통합검색 기능을 통해 운전경험 자료를 활용

하고 있으며, 원전 안전운영을 위해 운전경험을 효율적으로 활용할 수 있는 국제기준을 반영한 운전 경험 신 분류체계(WANO 운전경험 프로그램 지침)를 도입하여 운영 중에 있다.

국내운전경험의 경우 각 운전 경험 별 44개의 항목으로 세부 분류하여 관리하고 있으며, 국외운전 경험의 경우 31개로 분류하여 관리하고 있다.

### 3. Development of Reactor Trip

KONIS 및 OPIS에 등재된 운전경험 보고서를 기반으로 국내 원자로정지현황에 대하여 분석하였다.

1978년 최초 상업운전부터 2011년 11월까지 원자로 정지현황은 Table 1에서와 같이 총 207건으로 이중 자동정지가 155건, 수동정지가 52건이 발생되었다. 자동정지는 발전소보호계통 및 신호에 의해 자동으로 원자로가 정지된 경우이고, 수동정지는 운전원에 의해 원자로가 정지된 경우이다. 총 원자로 정지 발생건수 중 자동정지가 74.88%, 수동정지가 25.12%를 차지하였다.

#### 3.1 Reactor Trip by Cause.

원자로 정지가 유발된 국내운전경험에 대하여 직접원인, 근본원인, 기여원인에 따른 추이를 분석하였다.

직접원인 별로 원자로 정지사례를 분류한 결과 Table 2에서와 같이 누설에 의한 원자로 정지가 12%(24건)를 차지하였으며 두 번째는 ‘오-응답/신호상실/오신호’, 세 번째는 ‘실수’의 순서로 빈번하게 발생됨을 확인하였다.

패킹, 가스켓, 신축이음부, 조인트 등의 밀봉 기계부품에서의 누설이 원자로 정지에 직접적으로 기여하고 있음을 확인할 수 있으며, 휴먼에러

및 신호상실에 대한 부분도 간과할 수 없는 요인으로 작용하고 있음이 확인된다.

또한 단락/아크, 이물질유입과 같은 직접원인까지 반영되었을 경우 약 42%의 발생률을 보이고 있기 때문에 휴먼에러 예방 및 정비품질개선 등의 노력을 통해 원자로 정지를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

근본원인 별로 원자로 정지 사례를 분류한 결과 ‘설비관리 부적절’에 다른 원인이 19.5%로 가장 빈번하게 발생하는 원인이었으며, ‘예방정비

Table 2. Reactor Trip Case by Direct Cause

Description	Number
Core physics problems	1
Water hammer, abnormal pressure, pressure fluctuations, over pressure	1
Overloading	1
Loss of fluid flow	2
Wear, fretting, lubrication problem	4
Vibration	5
Not yet identified	2
Computer software deficiency	2
Fatigue	4
Set point drift, parameter drift	3
Computer hardware deficiency	11
Corrosion, erosion, fouling	2
Break, rupture, crack, weld failure	9
Deformation, distortion, spurious movement, loosening, displacement, loose parts,	8
Over voltage	2
Wind loading / storm	4
Ground fault	8
Failure to change state	2
<b>Leak</b>	<b>24</b>
Under voltage, voltage breakdown	7
Circuit failure, open circuit	8
Lightning strikes	5
Blockage, restriction, obstruction, binding, foreign material	12
Short circuit, arcing	13
Overheating	7
Bad contact, disconnection	9
Slip or lapse	8
<b>Mistake</b>	<b>17</b>
<b>False response, loss of signal, spurious signal</b>	<b>19</b>

Table 1. Reactor Trip Case by Year

Year	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Reactor Trip Case	4	9	4	4	5	9	8	13	5	15	4
	11	7	14	14	16	11	17	8	10	13	6

부적절, '원설계부적절', '제작사 제조/건설 부적절' 등의 순서로 빈번하게 발생되고 있음을 확인할 수 있다. 상기에서 언급된 원인들을 취합하였을 경우 약 60%의 발생률을 보이고 있으며 근본 원인 측면에서 검토하였을 때 작업관리강화, 설계검토강화 등과 같은 관리/검토 시스템을 강화하였을 경우 원자로 정지의 발생 빈도를 크게 줄일 수 있을 것으로 추정된다.

기여원인 측면에서 살펴볼 경우, '성능 저하된 하부 구성품이 고장에 기여'이며 단일항목으로는 44.39%의 최고 발생빈도를 보인다.

원자로정지 유발원인을 직접원인뿐만 아니라 사건 유발방지 가능요소(간접원인, 기여인자)를 통해 분석해본 결과 휴먼에러 예방 및 정비품질 개선, 관리감독 강화 등의 지속적인 개선활동과 이들을 안전문화로 정착시키는 방안들이 고려되고 반영되어야 함을 알 수 있다.

또한 절차서 미흡/미준수 등과 같은 시스템적인 요인보다는 행위자 또는 감독자의 부주의, 판단착오, 관리 부적절 등의 인적 요인이 빈번하게 발생되고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 미국의 원전에서 조사된 휴먼에러 요인으로 절차서 및 문서(Procedure & Document) 문제의 점유율이 가장 높았던 점과도 일치한다.

국내 원전에서의 원자로 정지 유발과 같은 문제점은 시스템 미비와 같은 환경적 요인보다는 행위자의 의식과 관련이 있음을 알 수 있다.

### 3.2 Reactor Trip by Group

국내원전에서 원자로 정지 유발 그룹으로는 '계측', '주제어실 운전원', '전기', '기계' 그룹 순으로 빈번하게 발생됨이 확인되었다.

특히 계측분야의 경우 '인간-기계 연계', '정비', '절차서 또는 훈련의 결함'에서 기인된 운전경험이 약 53%를 차지하였으며, 안전계통 오작동 및 부적절한 운전까지 감안하였을 때는 78.5%를 차지하여 계획예방정비, 절차서 개정 및 교육훈련을 통하여 충분히 방지될 수 있을 것으로 판단된다.

그룹에 의한 원자로 정지 유발 원인 중 가동업무를 직접 수행하고 있는 주제어실 운전원에 의한 원자로 정지가 24.1%로 출력운전(76%) 또는 발전소기동운전(14%) 과정에서 발생된 것을 알 수 있다.

Table 3. Internal NPP Reactor Trip by Group

Description	Case
-------------	------

Reactor physics	1
Fuel route(Operations)	2
Shift - Field operators	3
Shift - Control room operators	49
Fuel route(Maintenance)	3
Mechanical	38
Instrument	56
Electrical	48
Shift	3

Table 4. External NPP Reactor Trip by Group

Description	Percent
Mechanical	28.9
Shift - Control room operators	18.8
Electrical	15.9
Instrument	12.4

국외운전경험의 경우 Table 4에서와 같이 '기계', '주제어실 운전원', '전기', '계측'의 빈도로 발생하고 있음이 확인되었다. 국내운전경험의 경우 정비분야와 운전분야의 발생빈도가 높았던 점을 감안하였을 때 그룹별 국내/외 운전경험 발생추이는 비슷한 양상인 것을 확인할 수 있다.

위의 결과에서 '주제어실 운전원'에 의한 Trip이 높은 빈도를 보이는 것은 운전원의 설비 조작시 중복 감시 및 충분한 검토 없이 기기를 조작하거나 원자로 특성 시험 중 설비감시 소홀에 기인한 것으로 볼 수 있다.

이와 같은 휴먼에러를 저감시키기 위해서는 시뮬레이터를 통한 실효성 있는 반복훈련이 이뤄져야 하며 모의훈련설비는 발전소의 주제어반과 최대한 동일한 형태를 보여야 할 뿐 아니라 조작 시 제반 응답특성들이 기준발전소와 동일하게 나타나도록 지속적인 보완 활동 또한 전개되어야 할 것이다.

발전소 정비와 관련된 항목(운전원, 전기, 계측, 기계, 연료)이 전체 원자로 정지의 약 75%를 차지하고 있다. 원자로 정비를 대부분 외주업체에 위탁하고 있는 국내의 실정을 감안하였을 때 외부 설비전문가를 과신하거나, 협력업체 정비원들의 설비 이해부족 및 작업관리 미흡요인 극복을 위한 마스터플랜 수립이 시급하다.

또한 작업 전회의(PJB: Pre Job Briefing)의 활성화, 작업 계획서 품질 고도화, 작업관리 강화, 협력업체 정비원의 설비 이해도 증진을 위한 자격부여 및 교육훈련 방안장구 등 또한 지속적으로 수행해 나가야

할 것이다.

근본원인을 통하여 벨브, 벨브구동기, 제어기, 탬퍼, 밀봉부 및 팩킹, 플랜지, 오리피스, 배수트랩, 다이어프램 파열판 등 구성품에서 기인됨을 확인하였으며, 정비 품질개선을 위한 활동과 관련 구성품들에 대한 최적 교체주기 설정 등을 포함한 계획정비프로그램 재정비와 선진 예측정비 프로그램 정착을 위한 노력 또한 요구되고 있다.

## 4. Proposal to reduce Reactor Trip

### 4.1 Proposal to Enhance the Safety Culture

국내 원전에서의 휴먼에러에 의한 발전정지 저감을 위해 안전문화에 영향을 주는 구조적 문제, 개인의 태도함양, 기본적 문화가설 형성 등 다각적 노력의 일환으로 다음과 같은 점들을 제안하고자 한다.

#### 4.1.1 Reduction of Human Error

원자력발전소 운전원 훈련용 시뮬레이터는 미국 쓰리마일 아일랜드(TMI) 원전사고 이후 운전원 휴먼에러를 저감시키기 위한 최상의 수단으로 간주되어 각 원전 사업자들은 운영 중인 발전소의 중앙제어실과 동일한 크기, 모양, 기능을 모의할 수 있는 시뮬레이터를 도입 운영 중에 있다.

원전 운전원 훈련은 운전원이 근무중인 발전소와 원자로 노형 및 설계개념, 발전소 제반 계통의 운전특성이 동일하거나 거의 유사한 시뮬레이터를 이용한 반복훈련을 통해 정상 및 비정상 운전상황에서 숙련된 조치를 수행하여 휴먼에러 저감을 통한 발전소의 안전운전을 달성하는데 그 목적이 있다.

따라서 국내 시뮬레이터도 기준발전소에서의 설계 변경시 시뮬레이터로의 신속한 반영, 주기적인 응답특성의 일치성 확인시험 시행 등 철저한 형상관리 활동들이 발전정지 저감차원에서 수행되어야 할 것이다.

#### 4.1.2 Improvement of Human Behavior

원전 종사자의 인적행위를 개선하기 위해서는 문제의 주요원인에 대한 시스템적 분석과 이를 통해 도출된 시정조치(Corrective Action)에 대한

관리자의 확고한 지원과 참여가 필수적이다.

또한 직무활동에 대한 관리자의 감독을 강화하고 직무 수행자에 대한 지속적인 교육훈련이 뒤따라야 한다. 특히 무엇보다 중요한 것은 행위 당사자가 인적행위 개선기법들을 습관처럼 활용할 수 있는 체계를 지속 보완해야 할 것이다.

국내 원전에서는 최근 활발한 인적행위 개선 활동들을 전개하고 있다. 인적행위 개선시스템(HPES : Human Performance Enhancement System)의 운영, 관리자 및 종사자에 대한 교육훈련 강화, 표어 및 포스터 제작 부착 등 다양한 활동들이 시행되고 있다. 그러나 인적행위 개선조치들이 단편적 수준에서 선진 기법으로 도약하기 위한 현실적인 방안 역시 꾸준히 요구되고 있다.

미국원자력발전협회(INPO) 등 해외 원자력유관 기관에서는 안전운전을 위한 개선된 우수사례 보고서(GP)를 통하여 인적행위 향상 기법들을 지속적으로 제시하고 있음에 따라 해외기술의 벤치마킹 필요성도 크게 요구되고 있다.

이를통해 작업자 인계인수(Turnover), 효과적인 의사소통(Effective Communication), 자기점검(Self-Checking) 등 실효성 높은 기법들이 관련 절차서 및 지침에 반영되고 또 효과적으로 실천될 수 있는 직무 환경과 조직문화가 정착되도록 개선해 나가야 할 것이다.

#### 4.1.3 Application of Operation Experience

국내 원전사업자인 한국수력원자력(주)은 해외원자력 유관기관 웹사이트를 통해 실시간으로 세계 각국의 원전 운영경험 및 기술정보를 입수하여 발전소에서 관련정보를 공유할 수 있도록 환경을 구축하고 있다.

운전경험 활용증진을 위한 프로세스를 지속 보완하여 중요 정보의 전파와 활용을 위한 체계적인 프로세스를 구축하고, 정보 검색 편의성 및 정확도 최적화를 위하여 데이터베이스 관리도 지속적으로 개선중에 있다.

그러나 운전경험 정보의 홍수라는 빅데이터(Big Data) 환경에서 정보활용이 보다 효율적으로 추진될 수 있는 기반조성과 지원체제로 정보활용 촉진을 위한 조직간 개방성과 핵심전담인력의 육성이 절실하다.

기술정보의 전략적 관리를 위한 종합관리체계 강화도 필요하다. 성과창출에 대한 모니터링 체계와 전략적 의사결정 정보의 창출 또 안전운영 경영전략과 연계된 세부적인 시너지 창출 방안 전략도 필요하다.

또한 정보관리의 효율적 관리를 위한 정성적, 정량적으로 관리지표를 보완하여 국제기관과의 기술적 갭을 극복하고 이를 바탕으로 지식 창출형 운전경험 관리가 될 수 있는 시스템을 지속 개발해야 할 것이다.

무엇보다도 운전경험 정보활용에 대한 종사자의 인식전환이 전제되어야 할 것이다. 운전경험에서 시사하는 교훈을 적극 활용하겠다는 자세와 WANO 등 국제기관에서 권고하는 관리지침을 반영하여 적극 활용해 나가야 할 것이다.

## 5. Conclusion

국내원전은 지속적인 휴먼에러 예방 대책을 수립 운영하여 휴먼에러에 의한 발전소 고장사례는 점차 감소하고 있으나 신규원전의 증가대비 신입 직원의 대규모 충원 등 제반 환경요인으로 휴먼에러 발생 기여인자가 증가하고 있는 실정이다.

국내외 원전의 고장사례 분석 결과는 세부적인 통계오류는 있을 수 있겠으나 휴먼에러 예방을 위한 관련 제도의 개발과 정비, 지속적인 교육훈련 그리고 성과분석의 정확도를 높이기 위한 조치는 지속적으로 전개해 나가야 할 것이다.

또한 운전경험 활용의 극대화를 위한 해외 및 국내기관과의 벤치마킹과 시정조치 프로그램 운영은 물론 자체진단을 강화하여 직원역량을 강화하고 특히 협력회사 직원의 직무능력 향상 방안도 적극 전개해 나가야 할 것이다.

원전운영은 그 무엇보다도 안전을 최우선가치로 두어야 할 것은 분명하다. 2011년 일본 후쿠시마 원전의 참혹한 사고는 휴먼에러가 얼마나 위험한 파국적 결과를 만들어 내는지 확인하였다.

본 국내외 원전 고장사례에 대한 휴먼에러 측면의 분석은 보완하여 향후 보다 실질적이며 효과적으로 활용될 수 있는 기초데이터가 될 수 있도록 보완해 나갈 것이다.