

원자력 발전소 안전과 인적요인에 대한 연구

A Study of The Nuclear Power Plant Safety and Human Factor

박성동
영광원자력본부

김송평
조선대학교

요 약

원자력 발전소가 안전하게 운전되기 위해서는 실제 직접 설비를 다루고 있는 발전소 운전원의 역할이 매우 중요하다. 운전원의 인적실수를 감소시키기 위해서는 설비개선이나 제도적인 장치도 물론 중요하지만 누구나 운전원으로 근무하기를 희망하고 자긍심을 가질 수 있는 정책적인 지원이 병행되지 않으면 근본적으로 인적실수를 방지하는 데는 한계가 있다. 따라서 인적실수를 근본적으로 방지하기 위해서는 관리자는 주 제어실 내에서 운전원의 행위를 관리, 감독하는 역할에 충실해야 하고 보수적인 의사결정을 해야한다. 그리고 우수한 인력을 운전원에 배치하고, 경험있는 운전원들이 긍지와 자부심을 가지고 되도록 오랜기간 운전원으로서 근무할 수 있는 환경을 만들어 주어야 한다.

Abstract

The Role of Operators, Who Directly Control The Various Equipments, is One of The Most Important Factors of Safe Operation of a Nuclear Power Plant. Supporting Equipment Upgrades and Systematic Tools are Important Measures to Prevent Human Errors. It Has, However, Certain Limits Unless Administrative Support is not Paralleled Such as to Provide Operators with Pride and Positive Environment. Therefore in order to Prevent Human Errors of the Operators, it is Desired That Supervisors Should Concentrate Their Efforts to Control and Supervise the Actions of Main Control Room Operators. Securing an Effective and Conservative Decision Process is also an Important Role of Supervisors. Supervisors Should Place Competitive Manpower in Operators and Provide a Positive Working Environment with Which Experienced Operators Work as The Nuclear Power Plant Operators with Pride and Responsibilities.

1. 서 론

전 세계적으로 원자력산업을 시작한 이래 원자력은 그 동안 미국의 TMI사고나 소련의 체르노빌 사고로 인하여 전 인류에게 많은 충격을 주었으며 원자력 발전소의 안전을 강조했던 모든 원전 보유국은 입을 다물 수밖에 없었다. TMI사고 이후 수많은 연구 및 조사에 근거하여 새로운 요구사항이 모든 가동중인 발전소에

요청되었는데 그 요구사항의 상당수는 인간요소의 부문을 다룬 것들이었다. 조사결과에 의하면 인간실수가 TM의 주된 원인인 것으로 나타났기 때문이었다. 근본원인은 부적절한 교육훈련, 부실한 운전 절차서, 설계상의 오류 등으로 집약될 수 있었다. 그리고 몇 년 후 원자력 발전사상 최악의 사고가 체르노빌에서 일어났다. 발전소 운전원이 수행 중이던 한 시험 때문에 상당량의 정반응도가 삽입됨에 따라 노심과 주변 구조물이 파괴되었다. 이 사고로 안전설계의 중요성이 더욱 강조되었고 발전소 관리 및 운영요원의 운전절차의 엄수가 더욱더 요청되었으며 심증방어개념에 의한 보조안전설비의 필요성이 더욱 강조되었다.

안전에 대한 일차적인 책임은 운전의 최일선에 있는 발전소 운전 종사자에게 있다. 원자력 발전소가 안전하게 운전되기 위해서는 설계에서부터 건설, 시운전 및 운전, 품질관리등 다양한 분야에서 안전성을 확보해야 한다. 이들 중 본 논문에서는 원전의 안전성을 향상시키거나 저하시킬 수 있는 발전소 운전원의 행위와 관련하여 여기에 영향을 미치고 있는 그들의 근무태도, 자질, 처우, 조직풍토등 정책적인 개선사항등을 집중 검토하여 운전원의 인적실수 방지를 통한 원자력 발전소 안전성 향상 방안에 대해 연구하였다.

2 원자력 안전의 원리

원전의 안전성 목표를 달성하기 위한 구체적인 방안으로 심증방어개념에 근거한 다중방어, 다단계 안전 보호조치, 사고관리, 방사선 비상대책등이 수립된다. 원자로내에는 다양한 방사성 물질이 존재하고 있다. 그 중에도 가장 양이 많은 것이 핵분열 생성물(Fission Product)인데 핵분열 생성물은 핵분열 반응에 의해서 생기며 대부분 강한 방사능을 가지고 있다. 이 때문에 원자로 시설에서는 사고시 핵분열생성물이 환경에 방출되지 않도록 엄중한 대책을 취하고 있다. 이것이 심증방어로서 이상사태의 발생방지, 사고예로의 진전방지, 사고의 영향완화 대책 등이다. 심증방어의 기본개념은 그림 1에서와 같이 3개의 레벨(Level)로 분류된다.

제 1레벨은 이상상태의 발생을 적극 방지하는 일이다. 설계의 견지에서서는 원자로의 여러 가지 운전조건에 맞춰서 전수명기간에 걸쳐 모든 기기나 계통이 그 기능을 다 할 수 있도록 하는 것이 목표이다. 이 경우 충분히 확보된 규격, 기준 등을 적용하고 여러 가지 요구사항을 충족시키도록 한다. 그리고 완성된 발전소의 특성이 안전확보에 적합하고 운전하기 쉬워야 한다. 이를 위한 대책은 여러 가지가 있으나 한마디로 말하면 여유 있는 안전설계를 실시하는 것이다. 또한 오동작 및 오조작이 있을 경우 이를 저지할 수 있는 Interlock의 설치라든가, 단순한 고장이나 잘못된 조작이 곧바로 중대한 이상사태로 연결되는 일이 없도록 안전한 방향으로 동작하게 하는 Fail Safe 설계를 채용하는 것이다.

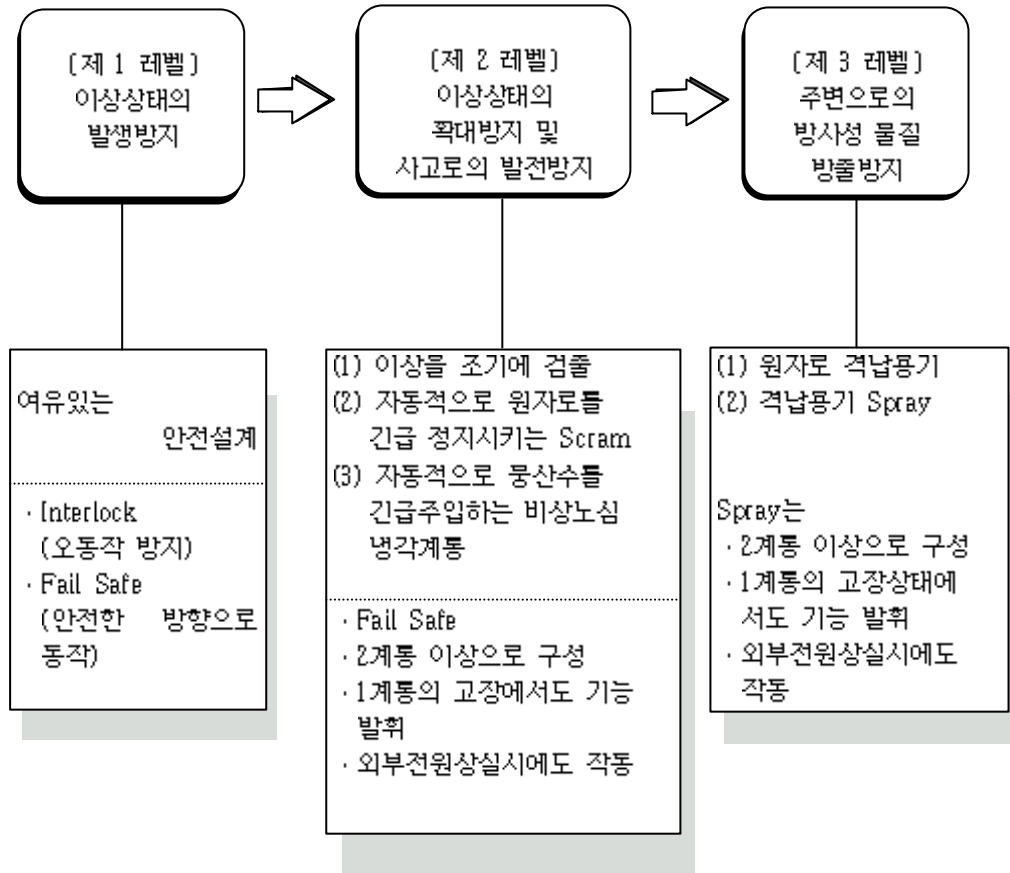
그러나 이상상태의 발생을 아무리 방지할지라도 기기의 고장이나 인간의 오조작에 의하여 이상이 발생한다는 것을 생각할 수 있다. 이를 위하여 이상이 발생할지라도 이상상태가 확대되는 것을 방지한다든가 이상이 사고로 진전되지 아니하도록 하는 대책이 제 2레벨의 사고방지대책이다. 제 2레벨의 대책은 이상을 조기 검출하고 이에 의하여 원자로를 자동적으로 긴급 정지시키며, 노심에 물산수를 주입하는 것이다. 이에 따라 연료 속에 있는 핵분열생성물을 연료 피복재 또는 원자로 냉각재 계통에 머물게 하는 것이다. 제 2레벨의 대책이 무너져 사고로 발전될 경우일지라도 발전소 외부에 방사성 물질을 방출하는 것을 억제하는 대책이 제 3레벨의 사고방지 대책이다. 제 3레벨의 사고방지 대책은 기밀을 유지하는 원자로 격납용기를 설치하고 또한 격납용기안에는 격납용기 Spray를 설치하는 것이다. 이들에 의하여 원자로에서 방출되는 핵분열생성물은 격납용기안에 봉쇄되며 또한 격납용기 압력 상승은 Spray를 함으로서 압력을 제한치 이내로 유지시켜 환경으로의 방사성 물질 유출을 방지하게 된다.

다중방호개념은 방사능 물질을 다중의 차폐벽으로 둘러싸서 사고가 발생하여 핵연료가 용융된다 하더라도 외부환경으로 누출되기까지는 핵연료 펠렛, 핵연료 피복재, 원자로 냉각재 계통, 격납용기 Liner Plate, 콘크리트 격납구조물 등의 방식을 거치도록 하여 방사능 누출을 억제시키는 방법이다.

다단계 보호조치로는 품질보증과 검사 및 시험등을 통하여 고장이나 사고를 미연에 방지하며 원자로 보호 계통과 공학적안전설비를 확보하여 사건이나 사고에 대한 효과를 최소화시키고 단일고장기준과 같은 보수적인 안전대책기준을 도입하여 안전도를 높이는 개념을 말한다. 사고완화 개념으로서 사고관리는 원전에서 발

생될 수 있는 중대사고에 대한 운전원, 종사자, 그리고 관련기관들의 상호협조체제를 통한 사고완화를 목적으로 하고 비상대책은 원전에 재해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 경우에 필요한 방재대책 및 활용을 말한다.

그림 1. 심증방어의 기본개념



3. 원자력 발전소 운전과 인적요인

3.1 인적행위의 특성

3.1.1 인간 행동의 분류

인간이 어떤 상황에 직면하였을 때에 어떻게 반응하고 행동하는가 하는 것은 사람에 따라서 다르고 같은 사람이라도 때와 장소에 따라서 상이한 행동을 하는 경우가 있다. 인간의 행동을 어떻게 분류하는가는 사물을 보는 시각에 따라 변할 수 있으며, 인간의 입장에서 기계에 작용하는 행동은 대체적으로 다음 4가지로 분류될 수 있다.

- A형 : 할 일을 정확하게 실행한다.
- B형 : 할 일을 불완전하게 밖에 실행하지 않는다.
- C형 : 하여서는 안 되는 것을 실행한다.
- D형 : 하여서는 안 되는 일을 실행하지 않는다.

이중 A형과 D형은 바람직한 일이고 언제나 인간의 행위가 이렇다면 인적요인의 문제는 대략 해결된다. 안전상 인적요인이 특히 문제가 되는 것은 B형과 C형이다. 이 중에서도 B형은 고려하기 쉬운 점이 있다. B형의 행동의 결과 생기는 것은 그 시점에서 필요한 계통이나 기기의 기능이 정상으로 발휘되지 못한다는 것이며 결과만을 주목하면 그 계통이나 기기가 고장이 난 것과 같다는 결과가 된다. C형은 가장 복잡하다. 이 형은 당연하고 있는 상황에서는 불필요한 계통을 동작시키거나 하여 도리어 상황을 악화시킬 수도 있다.

3.1.2 행동하기 위한 의사결정

앞에서 설명한 4가지 인간행동의 분류가 어디에 속하는 간에 인간이 어떤 행동을 하려면 그 때문에 어떤 의사결정을 해야 한다. 운전원이 기계계통에서 정보를 받은 다음 의사결정을 하여 실행에 옮기는데는 3가지 레벨이 있다고 한다. 한가지는 어떤 상황에 직면하면 반사적으로 행하는 행동이며 이것은 숙련에 의한 능력에 의존하고 있는 것으로 스킬 베이스(Skill Base)의 행동이라고 한다. 다음이 정해진 절차나 규칙에 따른 행동이며 룰 베이스(Rull Base)의 행동이라고 한다. 마지막이 학습에 의한 전문지식을 갖고 스스로가 생각하여 행동하는 나리지 베이스(Knowledge Base)의 행동이라고 한다.

이와 같은 의사결정과 행동의 패턴, 특히 B형, C형 사이에 어떤 상관관계가 존재하는 가를 고려해 보면, 이것에는 크게 구분하여 2가지 종류가 있다. 그 한가지는 의사결정은 정확하였지만 행동이 잘못된 것이며, 예를 들어 어떤 버튼을 누르려고 하는 정확한 의사결정을 하였는데 잘못하여 옆의 버튼을 누르거나 일련의 행동중에 어떤 부분을 잊어버리는 것과 같은 비교적 단순한 실수이다. 또 한가지는 의사결정 그 자체가 잘못되어 있기 때문에 이 잘못에 따른 일련의 행동이 결과적으로 잘못된다는 것이다. 이 형의 잘못은 다루기가 어렵고 앞뒤의 일련의 행동에 강한 상관관계가 있어 주의를 요하는 것이다.

3.2 인적실수와 관련된 물시정지

'97년 말까지 우리 나라 전체 원자력 발전소 물시정지 건수는 총298건이고 이중 운전원이나 보수원에 의한 실수 등 인적요인에 의한 물시정지 건수는 총 43건으로 전체 물시정지의 14.4%를 차지하고 있다. 표 1에서 알 수 있듯이 인적실수에 의한 물시정지는 상업운전 초기에 주로 발생하였고 어느 정도 운전년수가 경과된 발전소에서도 발생횟수는 많이 줄었지만 계속해서 발생되고 있다.

표 1. 인적실수에 의한 물시정지 현황

(단위 : 건수)

호기 년도	고 리				월 성		영 광				물 진		계
	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#1	#2	#3	#4	#1	#2	
'78	1												1
'79	2												2
'80	0												0
'81	1												1
'82	1												1
'83	0	2			1								3
'84	1	0			0								1
'85	1	0	2		0								3
'86	1	1	1	0	0		2						5
'87	0	2	2	0	0		0	1					5
'88	0	0	0	0	1		0	1			1		3
'89	0	0	0	1	0		0	1			0	1	3
'90	0	0	0	1	1		1	0			1	0	4
'91	1	0	0	0	0		0	0			2	0	3
'92	0	0	0	0	0		0	0			1	0	1
'93	0	0	0	1	0		0	1			0	0	2
'94	0	0	0	0	1		0	0	0		0	0	1
'95	0	0	0	0	0		0	0	0		0	0	0
'96	0	0	0	0	0		1	0	0	1	0	0	2
'97	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2
계	9	5	5	3	4	0	4	4	0	2	6	1	43

3.3 인적실수 유발요인

운전원은 주제어실의 계기로 부터 정보를 얻고(정보입력과정) 입수된 정보 및 경험에 근거하여 무엇을 해야 할 것인가를 판단하며(내면적 처리) 판단에 근거하여 기기등을 조작한다(조작과정). 이 같이 원자력 발전소에 있어 인간-기계 인터페이스의 복잡한 시스템 중에 인간의 판단·조작능력이 갖는 역할은 매우 중요하다.

지금까지 세계 원자력 발전소에서 경험한 사고·고장의 대부분은 그 정도의 차이가 있기는 하나 운전원 등의 인적요인이 많은 영향을 주고있다. 인적실수는 어떤 독립적인 요인에 의해 발생하는 경우는 극히 드물고 복합적으로 여러요소들이 상호영향을 미쳐 발생되고 있다.

3.3.1 개인적 자질

- 불충분한 교육 및 경험에서 오는 이해력 또는 판단력 부족으로 인한 의사결정 오류 및 자신감 결여
- 적극적인 자기개발 성취의욕 부족으로 인한 직무능력 저하

3.3.2 심리적 요인

- 지나친 긴장과 심리적 불안정에서 오는 정서적 불안정 상태에서의 행위
- 장래에 대한 불안감 또는 직무 불만족 등으로 인한 근무의욕 및 사기저하
- 조직 상·하 관계나 동료간의 갈등 또는 이해 부족에서 오는 과중한 스트레스
- 개인의 경험 또는 지식에 대한 과신으로 상황판단 미숙 및 사전검토 부족

3.3.3 생리상태

- 누적된 피로와 수면부족 등에서 오는 집중력 저하 또는 주의력 산만
- 건강의 악화로 인한 육체적 불안정 상태에서 오는 직무능력 저하
- 과중한 업무부담 등으로 인한 육체적 또는 정신적 피로 누적

3.4 주제어실에서의 행위

1991년 INPO에서는 “1945~1990년 동안 원자로 내에서의 연료손상 사건”이란 제목의 연구결과를 발표했다. 표 2는 그 연구결과를 요약한 것이다.

표 2. 연료손상 사건의 연표

상 업 로	총 연료손상 사고	실제 결함에 의해 유발된 사건	인적행위에 의해 유발된 사건
반응도 사고에 따른 노심손상	1	1 *	1 *
원자로 냉각재 상실사고에 의한 연료손상	1	0	1
반응도 및 제어봉 오조작 사건	7	0	7
기 타	4	0	4
합 계	13	1 *	13 *

* 반응도 사고는 설계와 인적행위 모두에 의해 유발되었기 때문에 합계는 13보다 많다.

상기 사고는 반응도와 제어봉 오조작에 의한 사고가 7건으로 대부분을 차지한다. 그러나 45년 동안에 7가지 사건의 원인이 각각 주제어실에서의 조치와 결정으로부터 나온 직접적인 결과이다. TMI와 체르노빌에서

도 주제어실내에서 행위의 결함이 주요한 원인이었다. 주제어실은 분명히 발전소를 제어하거나 제어 기능을 상실시키는 그러한 장소임에 틀림없다.

3.5 비상운전에 대한 대응

발전소 최종 안전성 분석 보고서(FSAR)에는 원자력 발전소가 비상상태에서도 일반대중이 방사성물질의 환경누출에 대해 충분히 보호될 수 있음을 증명해 보이도록 사고분석을 하도록 되어 있다. 이 사고분석의 내용 중 증기발생기 관파열 사고는 다른 사고보다 발생 가능성이 가장 높고 운전원의 신속한 조치가 요구되는 부분이다. 실제 전세계적으로 증기발생기의 세관 누설이나 파열을 경험한 발전소는 상당수에 이르며 이로 인해 증기발생기가 발전소 수명기간까지 제 기능을 다 발휘하지 못해 증기발생기를 교체하고 있다. 우리나라도 1998년 고리 1호기가 증기발생기를 교체하였다. 증기발생기 관파열 사고의 경우 FSAR 사고분석에서는 운전원이 30분 이내에 관파열 증기발생기의 확인/격리, RCS 냉각, 감압을 통해 RCS에서 관파열 증기발생기 2차 측으로의 파열유량을 멈추게 하여 관파열 증기발생기가 만수위가 되는 것을 방지하는 것으로 가정한다. 만일 이 제한시간내에 필요한 운전조치를 취할 수 없으면 사고분석의 결과는 그 유효성을 상실하게 되어 증기발생기 안전밸브 개방에 따른 오염수의 대량 방출 등 사고분석시 보다 더 심각한 결과를 초래할 수 있다.

따라서 상기 기준시간을 만족하기 위해서는 주기적인 반복교육과 시뮬레이터 실습을 통해 사고 상황시 발전소를 안전하게 정지하고 방사성물질의 환경누출을 최소화 하기 위한 운전 능력을 배양하게 된다.

4 운전원의 인적실수 저감화 방안

원자력 발전소 운전에는 기본적으로 이론적인 지식과 운전경험을 필요로 한다. 특히 운전경험은 시간이라는 함수와 물가분의 관계를 가지고 있어 운전원으로서의 근무기간이 운전경험의 많고 적음을 말해주고 있다. 따라서 발전소를 안정적이고 안전하게 운전하기 위해서는 지식과 운전경험이 풍부한 운전원들로 구성되어야 함은 필수적일 것이다. 그러나 현실은 교대근무에 따른 생체리듬의 변화로 인한 육체적·정신적 스트레스와 타인과의 생활부조화로 기존의 상당수 운전원들이 일근 부서로의 근무전환을 희망하고 있고 타 부서에서도 교대근무를 기피하고 있는 실정이다.

4.1 근무환경

원자력 발전소의 안전성 확보와 안정적인 전력공급 능력을 확보하기 위해서는 현장에서 직접설비를 다루는 운전원들의 역할이 중요시되어 인적실수 방지에 의한 발전정지 감소와 원전 안전성 확보를 위해 '92년 6월부터 원자력 발전소 운전원 교대근무 형태를 5조 3교대에서 6조 3교대로 개선 운영하여 왔다. 6조 3교대 근무형태는 4개조가 교대근무를 하고 2개조는 교육 및 일상근무를 하게된다. 특히 일상근무조는 안전계통 등 발전소의 주요계통 정기점검 시험수행과 평가분석, 발전소 주요 문제점에 대한 기술검토업무를 주로 담당해 왔다. 6조 3교대 근무제의 도입으로 운전원들은 교대근무의 부수적인 행정업무를 경감하고 반복되는 교대근무로 인한 생체리듬의 불안정과 육체적·정신적 스트레스를 상당히 해소할 수 있어 운전원의 인적실수 방지에도 크게 도움이 되어 왔다. 그러나 기업구조조정 의 일환으로 그 동안 6개조로 운영되어온 운전원 교대근무 제도가 '99년 2월부터 5개조 체제로 축소 운영되게 되었다. 이에 따라 운전원에게 시간적인 여유가 줄어들어 장기간의 결원 발생시 대리근무 미비로 나머지 운전원들에게 부담증가가 예상되고 교육훈련을 받을 기회가 줄어들어 운전원의 자질향상 측면에서도 많은 장애가 예상된다. 또한 교대근무의 일수가 늘어나는 등 전반적인 근무환경이 열악하게 되었다. 원자력 발전소 운전은 경험있는 운전원이 절대적으로 필요하다. 이들이 자신의 경험 및 지식을 잘 활용할 수 있고, 의욕을 가지고 일할 수 있도록 교대근무 환경을 조성해주는 것이 바람직할 것이다. 따라서 운전원의 자긍심 고취와 시기진작을 도모하고 원전 안전성 확보에 크게 기여해온 6개조 근무형태로의 환원이 바람직한 정책방향이라고 판단된다.

4.2 우수한 인력 확보

능력있고 자격을 갖춘 운전요원의 확보야 말로 안전운전을 보장하기 위한 최선의 방법이다. 결국 이들이 최고가의 국가재산을, 모든 대중의 관심의 대상이 되고 있는 사업을, 그리고 전력계통중 가장 민감한 부분을 담당하기 때문이다. 따라서 운전원들은 채용과정에서 그들의 능력, 특기, 심리적 안정도 그리고 다른 사람들과 협동하여 일할 수 있는가를 평가해야 한다. 특히 훌륭한 운전원이 되기 위해서는 첫째 동료직원들과 잘 어울려야 하며, 둘째 문제가 발생하였을 때 신속히 결정을 내려야 하며, 셋째 올바른 결정을 내려야 한다. 다시 말하면 동료직원들과 좋은 인간관계를 갖는다는 것은 기술적으로 완벽한 것보다 더 중요한 것이다. 운전원은 능력있고 적성에 맞으며 정서적으로 안정되어 있으며 협동심이 있는 사람을 필요로 한다.

4.3 주제어실에서의 행위

4.3.1 주제어실 관리 감독

주제어실 운전원의 행위가 발전부장과 발전과장의 리더쉽에 영향을 받고 있다. 이 감독자의 역할은 팀의 리더로서 기능을 다해야 하고 다른 구성원들이 개인의 역할을 충실히 해낼 수 있도록 장애 또는 판단오류 또는 에러를 감시하기 위해 주제어실 행위의 감독을 유지해야 한다. 그러기 위해서는 주제어실에서 다음과 같은 사항에 유의해야 한다.

- 감독자는 발전소 운전을 지휘하고, 주제어실의 구성원들, 특히 주제어실 운전원을 감독하는 역할에 충실해야 한다.
- 원활한 의사소통, 의문을 제기하는 행위, 상호확인과 Monitoring등 운전조의 팀웍과 관련된 여러 가지 행위들이 활성화될수 있도록 조직의 풍토를 만들어 가야한다.
- 발전부장 또는 발전과장은 어떤 국한된 계통의 문제점이나 진행상황에만 관심이 집중되어서는 안되고 발전소 전체적인 흐름의 방향을 파악하고 있어야 하며, 특히 다른 계통의 영향으로 인한 원자로의 반응에 대해 주의를 기울이고 있어야 한다.

4.3.2 보수적인 의사결정

보수적인 의사결정은 첫째 성급한 결정이나 조치를 피하는 것이다. 실제 주제어실내에서 크게 서둘러야 할 일들은 많지가 않다. 단지 즉시 조치해야 할 일은 자동정지가 차단되었거나 발생되지 않은 경우 운전원이 지체없이 수동으로 정지시키는 일이다. 따라서 보수적인 의사결정이란 무조건적으로 절차에 따르도록 하는게 중요하다. 현장에서 운전, 정지를 결정하도록 권한을 부여해야 하고 그러한 분위기가 소내에 중만하도록 하여야 한다. '91년 2월 발생한 미하마 2호기 증기발생기 세관파열의 경우 사고의 징후가 1시간 전에 감지되었으나 경제적, 사내적 분위기에 운전원들이 갈등을 느끼고 주저한 데서 사고가 확대되었다.

또 다른 보수적인 의사결정의 측면은 반응도 제어와 관련된 제어봉 조작에 관련된 사항이다. 부적절한 반응도 제어의 결과로 발생한 과도상태가 대부분 연료손상의 원인이 된 것을 경험을 통해 알고 있다. 원자로 운전원은 제어봉을 인출할 때는 심사숙고하고, 조심스럽게 조작하며 제어봉이 인출되는 동안에는 핵계측계통 및 원자로 출력과 관련된 지시계를 계속적으로 감시하는 운전습관을 길러야 한다.

4.3.3 운전의 숙련

운전의 숙련도란 발전소 과도상태, 비상상태 또는 다른 긴급한 상황 발생시에 이를 정확하게 인식하고 진단하며 대응하는 운전원의 능력을 말한다. 이것은 이전의 경험이나 훈련의 영역을 넘어서서 몇가지 선택사항이

있을 때 반복적인 훈련을 통해 얻어진 이론적이고 실무적인 지식을 올바르게 적용하는 능력이다. 실제 운전에서의 운전원 숙련도는 시뮬레이터에서 발전소 반응이 예상보다 다르게 나타나는 복잡한 정지등으로 측정할 수 있다. 숙련된 운전원은 이러한 상황에서 능숙하게 발전소의 계기 및 기기를 감시하고, 상호의견 교환하며 발전소를 제어한다. 하지만 경험이 적은 운전원은 이러한 경우 상황판단이 제대로 이루어지지 않으며 적절히 대응하지 못하는 경우가 많다. 따라서 운전원의 숙련도를 높이기 위해서는 조별도상훈련, 시뮬레이터에서의 반복훈련을 통하여 성취될 수 있다. 그러나 이것이 원활히 수행되기 위해서는 운전원으로서 오랜기간 근무하면서 경험과 지식을 쌓도록 제도적인 개선도 병행되어야 한다.

4.4 비상운전에 대한 대응시간

WCAP-14996¹⁾ 연구결과 비상운전 수행시 운전원 대응시간의 지연요인이 다음과 같이 분석되었다.

4.4.1 읽어줄 때 사용하는 단어의 수

대부분 발전소의 경우 낭독자가 운전원이 절차서 단계에 기술된 운전조치를 취하기 앞서 비상운전 절차서 단계에 기술된 모든 단어를 읽고 있다. 낭독자가 읽는 단어의 수가 많으면 많을수록 내용을 운전원에게 전달하는 시간이 길어지며 각 단계별 조치를 수행하는데 걸리는 시간이 길어지게 된다. 이 지연요인은 비상운전 절차서의 상세정도와 낭독자가 비상운전 절차서에 기술된 내용을 요약하여 간결하게 읽어주는지의 여부에 따라 영향을 받게 된다.

4.4.2 읽는 속도

발전과장이 분단 읽는 단어의 수가 많으면 많을수록 절차서의 내용을 빨리 운전원에게 전달할 수가 있다. 많은 경우에서 절차서 단계의 각 단어는 운전원이 조치를 취하기 앞서 읽어 주므로 단어를 읽는데 시간이 걸리면 걸릴수록 각 단계를 수행하는데는 시간이 더 걸린다.

4.4.3 의사전달에 사용된 단어의 수

낭독자와 운전원 사이에서 절차서의 내용을 전달하기 위해 간결한 대화를 사용하는 운전조로부터 절차서에 기술된 조치사항을 수행하기 전에 절차서에 쓰여진 각 단어를 이중삼중으로 복명복창하는 운전조까지 다양하다. 몇몇 운전조는 절차서에 쓰여진 단어 그대로 복명복창하지 않고 단어를 요약해서 복명복창하는 방법을 사용한다. 후자의 경우가 당연히 절차서 수행에 걸리는 시간이 줄어들게 된다.

4.4.4 절차서 단계에서의 지연

검토중 절차서에 기술된 운전 조치와는 무관하게 운전원 대응시간에 영향을 줄 수 있는 다양한 행위가 관찰되었는데 이 범주에 드는 행위로는

- 운전원에 대한 발전과장의 발전소 상태 브리핑
- 절차서 전환시 견출참조페이지 낭독 또는 페이지정보의 브리핑
- 진행중인 과도상태와 무관한 운전변수 또는 발전소 상태에 관한 운전원사이의 토론

위에서 언급한 행위는 일반적으로 바람직한 운전관행이지만 꼭 필요한 시기에만 이루어져야 좋은 관행이 될 수 있다.

1) ERG Operator Response Time Assessment Program Final Report

이상 요약하면 운전원 대응시간의 지연을 가져오는 원인을 위에서 언급한 4가지 범주로 그룹화 할 수 있으며 각 범주는 운전원이 비상문전 절차서에 기술된 조치를 수행하는데 걸리는 시간에 영향을 줄 수 있는 운전원의 행동특성을 보여주고 있다. 심한 경우에는 어느 한 범주의 행동특성이 비상문전 절차서 수행과정에서 운전원 대응시간의 심각한 증가를 초래할 수 있다. 반면에 어떤 범주의 운전원 행동특성이 운전원 대응시간 증가에 적은 영향을 미칠지라도 다양한 범주에서 이런 행동특성을 보여주면 종합적인 결과는 심각한 운전원 대응시간 증가의 결과를 가져올 수 있다.

따라서 발전과장과 운전원은 나름대로의 의사전달 관행을 정립하고 절차서 내용을 효과적으로 운전원에게 전달할 수 있는 나름대로의 방법을 개발하여 시뮬레이터 훈련이나 비상문전 도상훈련을 통해 숙련시켜 실제 상황 발생시 효과적으로 제한된 시간 내에 대응할 수 있는 준비를 사전에 하고 있어야 한다.

4.5 바람직한 운전원상(像)

의사결정과 행동의 3가지 레벨에서 유의해야 할 것은 이 3가지 레벨은 서로 겹쳐져 있다는 것이다. 곧 루를 베이스의 의사결정과 행동이 요구되고 있는 경우 절차서나 규칙 등의 루를 그 자체가 충분히 정리정돈되어 있어야 한다는 것은 당연하지만 동시에 운전원은 이들의 루를 숙지하고 또 스킬 베이스의 행동도 만족할 수 있을 정도의 조작의 숙련도 겸하여 갖추고 있어야 한다. 나리지 베이스가 요구되고 있는 경우 전문적 지식이 적절하며 충분해야 하는 것은 당연하지만 동시에 루들에 대해서도 숙지하고 또 기기의 조작에도 충분히 숙련되어 있지 않으면 안된다.

5. 결 론

자급자족할 에너지원이 없는 우리나라로서는 경제성장 및 국민생활에 필요한 에너지원을 확보하기 위해서는 원자력 발전을 계속할 수밖에 없는 실정이다. 그러기 위해서는 원자력 발전소가 안전하게 운전되어야 하고 원자력이 절대 안전하다는 인식을 일반 대중에게 인정받을 수 있도록 신뢰회복을 위한 노력이 지속되어야 한다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 현장에서 설비를 직접 다루는 운전원의 역할이 매우 중요하다. 따라서 우리가 지향하는 절대안전에 있어서 운전원은 그 어떤 안전계통보다 중요한 역할을 담당하고 있는 일종의 '지적(知的)안전계통'임을 인식해야 한다. 운전원들의 사기나 질적 수준 저하는 원전에서 가장 중요한 '지적안전계통'의 건전성 상실을 야기할 수 있다는 점에 관심을 가져야 할 것이다. 우리가 사고를 줄여서 마침내 제로화 할 것으로 아무도 기대하지는 않겠지만 경미한 사건·사고의 발생건수나 중요성을 줄임으로서 사건·사고가 환경면이나 주요 경제적 결과로 초래할 사고 가능성은 현저히 줄일 수는 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (2) INPO : SOER 96-1 「Control Room Supervision, Operational Decision-Making, and Teamwork」 1996
- (3) INPO : INPO 1995 CEO Conference 「The Control Room」 1995, 11, 3
- (4) 김현장 : 「EOP 운전원 대응시간 평가에 대한 연구」 원자력연수원, 1998
- (5) 「Steam Generator」 Nuclear Engineering International, 1998, 2
- (7) 「원자력 발전백서」 한국전력공사, 1998
- (8) 「YGN 1&2 Final Safety Analysis Report, Vol. 15」, 한국전력공사
- (9) 박승언 역, 佐藤一男 著 : 「원자력 안전의 논리」 한국전력공사