

체르노빌事故 眞相에 對한 國際原子力 安全諮問團의 見解



장 순 흥

한국과학기술원 원자력공학과 교수

1986년 4월26일 01시23분에 옛 소련 우크라이나지역 체르노빌원자력발전소 4호기에서 노심과 이를 감싸주는 건물의 손상을 일으키는 사고가 발생하였다. 노심으로부터 많은 양의 방사능물질들이 대기로 방출되었다. 이 사고로 방출된 뜨거운 물질들이 화재를 일으켜 상황을 더욱 더 악화시켰으며 많은 양의 방사능물질들을 대기로 방출시켰다. 옛 소련 사고대책반들의 용기있는 행동으로 수일후에 어느 정도 방사능물질들의 방출을 감소시켰으나 모두 31명의 발전소 운전원들과 사고대책반들이 방사능물질의 방출억제와 사고를 완화시키는데 목숨을 잃었다. 방출된 많은 양의 방사능물질들이 가스와 먼지입자들에 의해 기류를 타고 대기로 전파되었다.

국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)와 옛 소련은 빈에서 사고 후 조사회의를 여는데 합의하여 회의는 1986년 8월25일에서 29일까지 개최되었다. 회의에서 옛 소련 과학자 대표들과 원자력기술자들이 체르노빌 원전에 대한 기술상의 기본자료들, 사고원인들의 평가, 사고 진행상황과 결과 및 취해진 대책들을 기술하는 보고서를 제출하였다. 옛 소련 전문가들은 또 사고 이후에 취해졌던 기술, 의학 및 환경연구 프로그램들을 발표하였다. 이 연구는 원자력발전소와 관련된 위험들과 전리방사선의 건강영향들에 대한 새로운 자료들을 제공하였다.

국제원자력안전자문단(INSAG, International Nuclear Safety Ad-

visory Group)은 IAEA 사무총장의 요청으로 사고후 조사회의에서의 발표된 자료와 논의사항 등을 기초로 조사보고서를 작성하였다. 사무총장은 이 보고서를 심의용과 IAEA 조정위원회 제출용으로 사용될 수 있도록 요구하였다. 이 보고서는 차후 취해야 할 행동에 대한 INSAG의 건의사항들을 포함하고 있다.

INSAG 보고서는 옛 소련 전문가들, 초창 전문가들, IAEA에서 위촉한 전문가들, IAEA 직원들 그리고 INSAG 위원들간의 실무분과에서 논의된 많은 요약결과들을 수록하고 있다. 비록 보고된 얼마간의 자료들은 불확실성 때문에 예비적인 것이긴 하나 이 과정에서 명확한 이해가 이루어졌다. 이 보고서의 주요 과제는 가능한 자료들을 준비하여 예비적인 결론들과 건의사항들을 제공하는데 있다. 그럼에도 불구하고 이 보고서의 내용들은 INSAG 위원들간에 많은 의견 일치를 보여주고 있다.

체르노빌원자력발전소 사고에 관한 INSAG의 최초 보고서인 INSAG-1에서는 사고가 전적으로 운전원들의 잘못에 기인한 것이라는 옛 소련 사고진상조사단의 의견에 치중하였다. 그러나 1992년 새로 발간된 개정판 보고서인 INSAG-7에서는 운전원들 잘못의 비중은 줄고 발전소 설계상의 문제점들을 부각시켰다. 본 기고에서는 INSAG-1과 새로 발표된 INSAG-7의 내용들을 위주로 기술하였다.

체르노빌원전 4호기의 개요

전기출력 1,000MWe, 열출력 3,200MWth인 체르노빌 4호기 원전은 옛 소련내에서 가동중인 15개 RBMK형 원자로 중 하나였다. 체르노빌에 모두 4개의 발전소가 가동중이었으며 2개는 건설중이었다. RBMK형 원자로는 보통 두 개의 쌍으로 건설되며 단일건물내에 서로 마주 보도록 설치된다. 체르노빌 3, 4호기도 이런 방식으로 연결되어 있었고 어떤 계통들에 대해서는 서로 공유하도록 되어 있었다.

RBMK형 원자로는 흑연감속 가압튜브 방식의 원자로이다. 이 원자로는 경수를 순환시켜 냉각시키는 방식으로 물을 끓여 수직 가압튜브 상부에서 증기를 발생시킨다. 각각 840개의 핵연료 채널, 2개의 증기분리기, 4대의 냉각재펌프 및 이와 관련된 장치들로 이루어진 2개의 냉각유로내에서 증기는 생성된다. 증기분리기들은 증기를 직접 2대의 500MWe급 터빈발전기들로 공급시키고 각각 응축기와 급수계통으로 보내진다. 원자로는 특수기계에 의해 온라인으로 재장전할 수 있도록 되어 있다.

냉각회로의 거의 모든 부분들이 일련의 단단한 격납실내에 설치되어 있다. 이들은 냉각재의 누출에 의해 격납실내로 방출되는 증기를 모아 응축시키기 위해 원자로 하부에 물로 채워진 억압계통들에 의해 연결되어 있다.

정상적인 평형상태에서의 핵연료 조사시 RBMK형 원자로는 양의 기포반응도를 갖는다. 그러나 핵연

료 온도계수는 음의 효과를 나타내며 출력변화의 최종적인 효과는 출력준위에 따라 변한다. 정상운전상태에서 최종적인 효과(출력계수)는 총출력에서 음의 효과를 나타내고 총출력의 20% 이내에서는 양의 효과를 나타낸다. 열출력 700MWth 미만에서의 원자로 운전은 열수력학적 매개변수들이 정상운전 범위 내에서 유지되도록 하기 위하여 여러가지 운전절차들에 의해 제약을 받는다.

RBMK형 원자로는 전체 및 위치에 따른 출력분포 조절과 비상정지에 사용되는 211개의 흡수봉들을 포함하고 있다. 비상정지는 모든 흡수봉들을 최고속도 0.4m/s로 삽입함으로써 수행된다. 주어진 출력분포와 비상상태시 음의 반응도 효과를 보충기 위해 30개보다 적지 않은 흡수봉들이 노심내에 삽입되어야 한다고 운전규정에 명시되어 있다.

체르노빌사고의 개요

사고는 예정된 정상 원자로 정지시 터빈발전기에 수행된 시험중 발생하였다. 이 시험은 발전소 정전시 대기용 디젤발전기가 비상용 전원을 공급할 수 있을 때까지 전기 에너지를 공급할 수 있도록 터빈발전기의 능력에 대해 시험되어 졌다. 안전성 측면에서 잘못 작성된 시험용 절차서와 운전원들의 기본 운전규칙 위반 등으로 인해 수동운전으로 안정되게 유지할 수 없는 냉각재 유속과 냉각조건 상태가 되게 하였고 이로 말미암아 원자로를

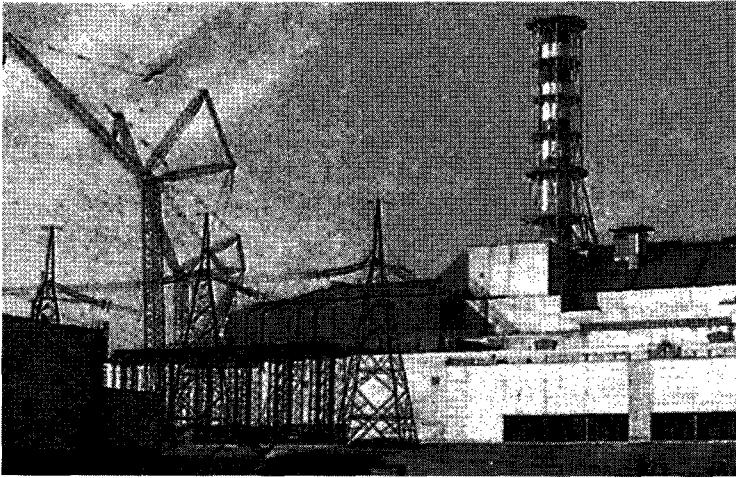
저출력(200MWth) 운전상태로 물고 갔다. 앞에서 언급된 특별한 설계특성(저출력 준위에서 양의 출력계수) 관점에서 볼 때 원자로는 안전치 못한 영역에서 운전되고 있었다. 동시에 운전원들은 임의로 운전규칙을 위반하여 거의 대부분의 제어봉들과 안전봉들을 노심내에서 인출하였고 중요한 안전계통들의 작동도 꺼버렸다.

잇따른 사고로 노심내 증기기포의 발생량을 증가시켜 양의 반응도를 일으키게 하였다. 출력의 급격한 증가가 시작되었고 수동으로 핵분열연쇄반응을 멈추려는 시도가 있었다. 그러나 원자로의 신속한 자동정지 가능성은 거의 모든 제어봉들이 노심내에서 완전히 인출되었기 때문에 제한되었다.

기포발생으로 인한 연속된 반응도 첨가는 출력을 초급발 임계폭주(Super-prompt Critical Excursion) 상태로 물고 갔다. 옛 소련 전문가들은 계산결과 초기 침투출력 값이 4초내에 정상출력값보다 무려 100배 이상으로 증가하였다고 했다.

출력폭주로 인해 핵연료내에서 방출된 에너지는 핵연료 일부분을 작은 파편들로 급격하게 분쇄시켰다. 이 파열과정은 안전성연구 프로그램에서 수행된 실험들로부터 잘 알려져 있다. 작고 뜨거운 핵연료 입자들(또는 기화된 핵연료)이 증기폭발을 야기시켰다.

방출된 에너지는 1,000톤 가량의 원자로 덮개판을 움직여 원자로 덮개 양면에 있는 모든 냉각채널들을 끊어지게 하였다. 2, 3초 후 2차폭



발이 일어났으며 뜨거운 원자로 파편들이 부서진 원자로건물 외부로 방출되었다. 수소가 이 폭발에서 어떤 작용을 하였는가는 아직 불투명하다. 원자로 파손으로 공기가 흡입되어 흑연발화를 일으켰다.

사고로 발화된 흑연들과 핵연료들이 인근 다른 건물 지붕위로 날아갔다. 4호기 건물내, 3호기 지붕 위 그리고 두 원자로들의 터빈발전기들이 설치된 기계실 지붕위에서 화재가 발생하였다. 구역내에 경보가 울리자 수분 이내에 발전소의 소방직원들이 현장에 도착했다.

화재는 발생 3.5시간후인 4월26일 05시에 완전하지는 않지만 진화되었고 거의 손상을 입지 않고 운전중이던 3호기가 거의 동시에 정지되었다. 1, 2호기들은 4월27일 아침 일찍 정지되었다. 3개의 발전소들은 경비원 경비하에 계속 정지된 상태로 두었다. 방사능을 띤 핵분열물질들은 사고 발생후 9일째인 5월5일까지도 어느 정도의 양이 4

호기로부터 계속 방출되었다.

사고 초기에 핵분열물질들의 방출은 발생한 열에 의해 고온인 상태로 있는 흑연의 발화와 관련이 있었다. 핵분열물질들의 방출을 막기 위해 많은 양(총 5,000톤, 납 2,400톤 포함)의 붕소, 백운석, 모래, 진흙, 납들이 원자로 위로 부어졌다. 5월1일 이후 얼마 동안은 원자로내로 부어졌던 물질들이 노심을 절연함에 따라 휘발성 핵분열물질들의 방출이 실제적으로 증가하였고 따라서 다시 열을 발생케 하였다. 그러나 5월5일에는 화재가 발생한 흑연의 불이 꺼짐에 따라 열손실 속도가 열발생 속도를 넘어서기 시작했다.

방사능핵종 방출과 공중 구성원들의 방사능 노출

노심내 구조물들의 파손과 격납 건물의 파손은 발전소로부터 많은 양의 방사능물질들을 방출시켰다.

옛 소련 전문가들은 100%의 비활성가스 방사능핵종들이 발전소로부터 방출되었다고 추정했다. 나머지 응축성 방사능핵종들 중에서 방출량은 약 $2 \times 10^{18} \text{Bq}$ ($5 \times 10^7 \text{Ci}$) 또는 노심내 방사능물질들의 3~4% 정도였다. 이 방출물질들의 양은 Cs, I 및 Te 재고량의 약 10~20%를 구성하였고, 다른 방사능핵종들의 약 3~6%를 구성하였다.

체르노빌발전소로부터 방사능핵종들의 방출은 단 시간내에 발생한 심각한 사고라기 보다는 초기에는 급격한 파손으로 인해 심한 방출이 있었고 사고후 대책 등으로 인해 방출속도가 며칠 동안에 점점 감소하였다고 볼 수 있다. 사고발생 5일 후에 방출률은 약 $7 \times 10^{16} \text{Bq/d}$ ($2 \times 10^{16} \text{Ci/d}$)가 되었고 이 시점에서 방출률은 점점 증가하여 발생 9일후에는 $3 \times 10^{17} \text{Bq/d}$ ($8 \times 10^{16} \text{Ci/d}$)가 되었다. 그리고 나서 방사능핵종들의 방출률이 $4 \times 10^{13} \text{Bq/d}$ ($1 \times 10^{13} \text{Ci/d}$)로 급격히 감소하였고 방출률은 이 시점에서 계속 감소하였다.

이 사고는 가상적인 방출량(주로 길게 평가됨)을 대상으로 방사선학적 평가를 하는 사고들과는 본질적으로 달랐다. 즉 시간에 따라 방출률과 방사능핵종들의 구성비율이 변하였고 기상학적 조건이 매우 복잡하였다. 이러한 특성들이 옛 소련과 다른 국가들의 땅 위에 복잡한 형태로 대기침전을 이루게 하였다. 침전형태는 환경감시망을 통해서 신속히 알 수 있었다. 침전된 방사능핵종(특히 I-131과 Cs 동위원소들)들은 지상의 먹이사슬내로 유

입되었다. 각종 식량들에 대한 소비규제강령들이 도입되어 실시되었고 옛 소련내에서 필요한 곳에 오염되지 않은 식수를 공급키 위해 여러 대책들이 강구되었다.

초기 방사선평폭선량 추정치는 예측 모델링에 의해서 구해진 환경감시 데이터로부터 얻을 수 있었다. 크게 직접적인 측정은 각 개인 특히 어린이들의 갑상선에 축적된 I-131을 대상으로 수행되었고, 전신평폭선량 측정은 Cs-137의 방사능준위를 결정함으로써 수행되었다. 이러한 직접적인 측정으로 실제적인 피폭선량을 비교적 잘 평가할 수 있었다.

옛 소련내에서 축적피폭선량(즉 주민에 대한 총피폭선량)과 개인전신평폭선량에 가장 많은 기여를 한 방사능핵종은 Cs-137이었다. 향후 50~70년만에 걸쳐서 유럽내 옛 소련 주민들에 대한 축적피폭선량은 거의 모든 주민들이 그들의 수명 동안 자연방사선으로부터 받는 피폭선량보다 적은 $2 \times 10^6 \text{man} \cdot \text{Sv}$ 크기 정도로 추정되어 진다. I-131은 짧은 기간 동안은 공중구성원 개별적인 개인들의 갑상선에는 비교적 높은 피폭선량을 나타내지만 장기간 동안 각 개인 또는 전인구에 대한 총피폭선량에는 큰 기여를 하지 못한다.

비상대책 및 방사능오염 제거

모스크바에 경제소식이 전해지자마자 전문가팀들이 지역당국과 발전소의 사고처리를 돕기 위해 사건현지로 급파되었다. 대응조직을 지

도하기 위해 모든 권한과 힘을 가진 중앙비상센터가 설치되었다.

비행기와 헬리콥터들의 도움으로 기상학적 감시망과 방사선학적 감시망이 구축되었으며 의료구조단들이 비상경계태세에 돌입하였다. 시간에 따른 환경오염의 전개에 따라 주민들을 집안에 있게 하거나 옥소예방, 대피 등과 같은 비상대응대책들이 수행되었다.

주민대피, 사람과 가축들의 재배치, 의료 및 사회원조 감시 그리고 수송과 병참업무 등과 같은 광범위한 분야들에 걸쳐 여러가지 문제점들이 제기되었다. 처음 이틀 동안 발전소 직원들과 구조대원들 중 약 300명의 사람들이 방사선부상과 화상으로 인해 병원으로 후송되었다. 발전소 인근 30km 이내에 거주하는 대피주민 135,000명 중 방사선부상을 입어 병원으로 후송된 사람은 아무도 없었다.

비상대응으로부터 맺어진 전반적인 결론은 비록 사고가 지방 한 지역에서 발생되었다더라도 전체적인 비상상황과 대응의 실제적인 운영은 자원위원회의 신속한 추진력을 필요로 한다. 사고의 규모 때문에 이러한 자원과 권한은 지역적인 수준에 머무를 수 없었다. 이와 같은 심각한 사고에 대해서는 발생지역에 무관하게 주민과 환경에 대한 심각한 결과들을 줄이고 상황통제를 올바르게 하기 위해 막강한 인적자원과 기기자원들이 필요한 것이다.

발전소 부지와 인근지역에 대한 오염의 정도는 선례가 없었던 일이다. 이 지역들의 오염제거를 위한

시도에서 당면한 문제점들은 1. 많은 양의 오염된 토양의 안전한 처리 2. 토양지층의 제거와 작업자들에 대한 피폭선량 통제 3. 토양내 방사능핵종들의 고착화 4. 산림과 물의 오염을 제거하기 위한 방법들의 개발 등이다. 이런 분야의 경험들은 상당히 중요하고 국제적인 경험들의 교류가 매우 절실히 요구되어 IAEA가 주관이 되는 국제공동연구로 연결되게 되었다.

사고책임소재에 대한 논란

체르노빌사고에 있어서 운전원 실수와 설계의 결함 중 어느 것이 더 결정적인 원인이었나에 대하여 격렬한 논쟁이 계속되고 있다. 체르노빌사고의 책임을 지고 4년 동안 옥고를 치르고 출감한 체르노빌 발전소 기술담당 부주임인 Anatolij Diatlov氏는 자신에게 내려진 죄목이 잘못된 것이라는 서한을 IAEA 사무총장에게 보냈다. 그는 편지를 통해 발전소 운전원들은 비극적인 원인이 된 체르노빌발전소 터빈의 출력감소시험을 올바르게 수행했다는 것을 확신하고 있다고 말하면서 운전원들이 운전규칙을 준수하지 않았다는 것은 사실이 아니라고 주장했다.

Diatlov氏는 IAEA에 의해 주도되는 국제 원자력학계에 대해서도 많은 불만을 가지고 있었는데 그들은 그들이 RBMK형 발전소의 운전절차나 상세설계에 관한 옛 소련 당국의 공식발표를 아무런 비판없이 받아들였다고 비난하였다.

그가 지적했던 몇가지 문제점들

은 다음과 같다. 첫째 RBMK형 발전소를 700MWth 이하로는 운전하지 말아야 한다는 규칙은(체르노빌 4호기 운전원들이 위반했다고 주장되고 있는 규칙) 사고 당시에는 있지도 않았으며 1986년 5월에 새로 공표되었다.

둘째 Diatlov氏는 30개의 제어봉 이하의 반응 여유도를 갖도록 발전소를 운전할 책임을 지고 있었는데 운전원들은 제어봉들의 수를 알려주는 통제실의 기록을 보지 않는 것이 일반적이었기 때문에(기록은 통제실에서 50m나 떨어진 곳에 가서나 볼 수 있었으며 또한 현재의 기록은 시간이 한참 지연된 후에나 나온다) 현재의 반응 여유도가 허용 최저치인 15개의 제어봉 이하로 떨어져 있다는 사실을 알지 못했다.

셋째 발전소 운전원들은 저출력에서는 기포 반응도가 양의 값을 갖는다는 사실을 알지 못했으며 그들은 단지 이 계수가 정상출력하에서는 음의 값을 갖는다는 사실만을 알고 있었다.

넷째 그들은 남아 있는 제어봉의 수를 줄이기 위해 비상단추를 누르는 것이 사실상 기포계수를 위험수위 이상으로 끌어 올려 추가의 흑연봉을 몰로 대체시켜 원자로의 계속적인 폭발에 방아쇠를 당기는 결과가 된다는 사실을 알지 못하고 있었다.

다섯째 운전원들이 위반했다고 문책된 또 하나의 문제인 최대허용 냉각재 유입에 관해서는 아무런 운전규칙도 없었다.

여섯째 Diatlov氏는 비상노심냉

각계통은 터빈시험을 수행하기 위해 11시간 동안 가동정지상태에 있었다고 말했다. 이러한 상태는 지난 3년간 다른 발전소에서 동일한 시험을 할 때도 마찬가지였었다. 비상노심냉각계통의 불능 확률이 10^{-6} reactor-year이므로 11시간 동안 가동정지시켰을 경우 사고발생 확률이 1.3×10^{-9} 이므로 아무런 문제가 없을 것이라고 생각했다고 말했다.

한편 옛 소련의 RBMK형 원자로의 주설계자들은 운전원들이 충분한 반응 여유도를 유지하도록 하는 기본운전규칙들을 준수했었다더라면 원자로는 결코 폭발되지 않았을 것이라고 말하고 있다. RBMK형 원자로에 대한 설계 책임이 있는 모스크바 RDIPE(Research & Development Institute of Power Engineering)의 E. Adamov 원장은 다음과 같이 말했다.

반응도의 순간적인 주입을 가능하게 만든 것은 제어봉의 설계가 아니라 운전원이 원자로를 제어했던 방법이었다. 특히 냉각재 유입을 급격히 감소시켰으며 냉각재를 거의 비등점에 이르도록 가열시키는 한편 주순환펌프의 공동 여유도(Cavitation Margin) 고갈(허용되지 않는 높은 유량으로 펌프를 운전한 결과)과 뒤이은 8대의 펌프 중 4대의 정지를 초래한 것을 그 예로 들었다.

그 결과로 생긴 냉각재 기포는 저출력에서 더 큰 값을 갖는 원자로의 양의 기포계수로 인해 높은 반응도 증가를 초래하게 되었다. RDIPE에서 수행된 계산에 의하면

반응 여유도가 2~7개의 제어봉과 같은 정도로까지 감소되었기 때문에 수동적인 반응도 삽입은 불가능했다. 만약 운전원들이 반응 여유도를 그렇게 낮게 떨어뜨리지 않았었다면 다른 모든 조건들이 사고시와 동일하더라도 원자로 파손은 일어나지 않았을 것이라고 Adamov 원장은 주장했다.

INSAG은 1991년 3월 회의를 열어 Diatlov氏의 편지에 대해 논의했다. 그러나 이 회의에서 그의 주장이 상당 부분 공감을 주지만 INSAG-1 보고서의 주요 결론을 바꿀 정도는 아니라고 결정하였다. 그럼에도 불구하고 옛 소련 원자력 고위간부들은 RBMK형 원자로를 700MWth 이하로 운전시키지 말아야 한다는 규칙이 사고 후 공표되었다는 것을 포함하여 Diatlov氏의 몇몇 주장이 사실이었다는 것을 시인하였다. 아직도 옛 소련내에서는 체르노빌사고에 있어서 설계의 결함과 운전원 실수 중 어느 것이 더 결정적인 원인이었나에 대하여 격렬한 논쟁이 계속되고 있다고 한다.

RBMK형 원자력발전소 안전성을 증진시키기 위한 대책들

현재 운전중인 RBMK형 원자력 발전소들의 안전성을 증진시키기 위한 조직적, 기술적인 대책들이 체르노빌사고 후 즉각적으로 강구되었다. 이들 대책들은 나머지 RBMK형 발전소들에 대해 제한사항을 두거나 수정사항들을 첨가하거나 안전성 관점에서 도움이 되는

변경을 하는데 있다.

첫째로 INSAG은 다음과 같은 사항들을 목표로 하고 대책을 세웠다.

1. 양의 기포반응도와 노심의 완전기포상태의 반응도 효과를 줄인다.

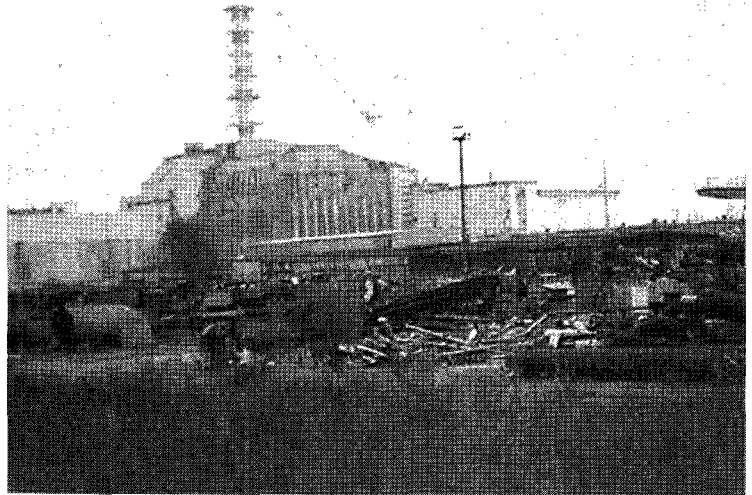
2. 원자로 정지시스템의 응답속도를 향상시킨다.

3. 운전반응여유도(ORM, Operating Reactivity Margin)에 대한 새로운 계산코드를 반영시켜 주 제어실내에서 ORM의 지시치를 알 수 있도록 한다.

4. 운전제한 요구조건과 우회조치에 대한 2개의 키 계통(Key System)의 설치를 통해 원자로가 운전중일 때 비상정지시스템이 우회하는 가능성을 미리 배제시킨다.

5. 원자로 입구의 냉각재에 대한 핵비등 이탈(DNB, Departure from Nucleate Boiling) 여유도의 감소를 야기시키는 운전영역을 피한다. 이것은 노심 입구관에서의 적당한 서브쿨링(Subcooling)의 문제점에 역점을 둔다.

INSAG은 기포반응도 계수의 감소는 모든 RBMK형 원자로 노심내에 부가적인 고정 흡수체(90개까지 가능)의 부착이나 2.4%의 U-235 농축 핵연료를 사용함으로써 가능하다고 했다. 모든 1,000MWe 원자로들은 부가적인 고정 흡수체를 보충하기 위해 필요한 고농축의 핵연료로 공급되어 졌다. 핵연료 농축도의 증가로 인한 이점은 핵연료 소비기간의 연장이 없을 때만 나타날 수 있다. 만약 첨가된 핵연료농축이 핵연료 수명을 연장하는



데 사용되었을 경우 말기 핵연료사이클에서의 핵연료는 부족한 U-235, 파잉의 Pu-239를 포함할 것이고 이것은 양의 기포 반응도를 높이는 작용을 할 것이다.

운전반응 여유도는 원자로에 따라 43개와 48개의 제어봉들 사이에 있도록 증가되어야 한다. INSAG은 현존하는 제어봉 및 안전봉들은 하부에 물이 지나가는 기둥이 없고 흡수부분이 없는 설계상 향상된 것으로 바뀌었다고 통보받았다. 또 제어봉 및 안전봉들의 삽입속도가 노심내에 완전히 삽입했을 때의 시간이 18초에서 12초로 증가되었다고 통보받았다.

INSAG은 고속비상정지(FAEP, Fast Acting Emergency Protection) 계통이 모든 운전 원자로들에 설치되었다고 통보받았다. 이 계통은 24개의 부가적인 안전봉들을 포함하고 있다. FAEP는 필요시 음의 반응도가 2β (β 는 지연 중성자율) 이상으로 2.5초 이내에 삽입이 되도록

설계되었다. 2β 값은 보수적으로 원자로로부터 냉각재가 완전히 상실되었을 때의 반응도도 충분히 견딜 수 있도록 계산되었다.

INSAG은 체르노빌사고로부터 얻은 교훈들을 고려하기 위해 운전 규정사항들을 개선하였다는 통보를 받았다. 새로운 규정들 중 RBMK형 원자로의 정상운전에 최소허용출력이 700MWth이라는 것이다.

일반적인 관측보고 및 결론

1. INSAG은 옛 소련 당국에 의해 1986년 8월 빈에서 열린 사고 후 조사회의에 발표된 자료들을 근거로 체르노빌사고와 그 원인에 대한 보고서 INSAG-1을 발간하였다. 그 이후 새로 밝혀진 자료들에 의해 사고원인을 운전원 실수에 비중을 크게 둔 INSAG-1의 내용에 영향을 미쳤다. 따라서 새로 발간된 개정판 INSAG-7에 의하면 이제 사고는 원자로심의 불안정한 물

리적인 특성들, 제어봉의 잘못된 설계형태, 원자로가 절차서에 의해 규정되지 않은 상태에서의 운전된 것과 같은 여러 원인들이 동시에 발생하여 일어난 것으로 볼 수 있다. 그러나 가장 큰 이유는 불안정한 원자로심의 특성이라고 볼 수 있다.

2. INSAG은 체르노빌에서 발생한 주요 사고범주를 노심파괴사고(CDAs, Core Disruptive Accidents)라고 명명하였다. 원자력안전에 대한 이해를 증진시키기 위해 세계의 안전성 전문가들이 이 비극적인 사고로부터 충분한 교훈을 얻을 수 있었다. 이 사고는 원자력에너지의 위험측면에서 「가장 심한 사례」라고 볼 수 있다.

3. RBMK형 원자로의 2가지 이전 사고들인 1975년 상트페테르부르크(옛 레닌그라드) 1호기 사고와 1982년 체르노빌 1호기의 핵연료괴손 사고는 일찍이 RBMK형 발전소의 특성과 운전에 중요한 약점으로 나타났다. 상트페테르부르크 1호기에서 일어난 사고는 몇몇 사람들에게 의해 체르노빌사고의 전조와 같이 생각되어 졌다. 그러나 이 사고들에서 얻은 교훈들은 기껏해야 제한된 설계상의 수정이나 실제 운전에서의 향상들로만 자극을 주었다. 통신의 취약과 서로 다른 운전 조직들간의 정보교환의 취약 등으로 말미암아 체르노빌에서의 운전원들은 상트페테르부르크 1호기에 대한 본질과 원인들을 숙지하지 못했다.

4. 출력폭주현상이 어떻게 일어나서 체르노빌 원자로를 파괴했는

지는 정확하게 알려져 있지 않다. 냉각재 유량이 감소하면서 기포발생률이 증가함에 따라 어떤 양의 반응도가 가해졌을 것이다. 시험시 완전 인출되었던 제어봉과 안전봉들이 다시 삽입됨에 따라 양의 반응도가 더욱 더 크게 인가되어 사고의 주요 원인으로 작용하였을 것이다. 후자의 효과는 잘못 설계된 제어봉의 결과로서 1983년 Ignalina 원자력발전소에서 판명되었다. 그러나 Ignalina에서 판명된 사실로 아무런 교정조치나 방어대책이 취해지지 않았고 운전원들에게 통보되지 못했다.

5. 사고는 체르노빌발전소 뿐만 아니라 옛 소련 전역에 걸쳐 그 당시 운전 및 규제기관들의 「원자력 안전문화」의 부족으로부터 유발되었다고 볼 수 있다. 즉 체르노빌사고의 평가는 안전문화의 부족이 고유하게 운전단계에만 있지 않고 원자력발전소와 관련된 다른 분야 예를 들면 설계, 공학, 건설, 제조 및 규정들에도 있다는 것을 시사해 주었다.

6. 1986년 체르노빌사고에 관한 INSAG의 최초 보고서인 INSAG-1 보고서는 사고가 전적으로 운전원들의 잘못에 기인한 것이라는 옛 소련 진상조사단의 의견에 치중하였으나, 1992년 발간된 INSAG-1의 개정판인 INSAG-7 보고서에서는 운전원 잘못의 비중이 많이 줄어들었다. INSAG-1에서 판명된 운전원들의 규정위반은 사실상 위반이 아니었다. 그럼에도 불구하고 아직 INSAG은 운전원들의 심각한 행동이 사고를 가장 나쁘게

몰고 갔다는 견해를 갖고 있다. INSAG-1에서 지적했듯이 인간 공학적 요소는 사고를 유발시킨 가장 큰 원인으로 보고 있다. 운전절차서의 부적절, 혼돈되는 단어사용 등이 발전부장을 포함한 운전원들에게 심각한 부담이 되었다. 또 계기의 형태와 수 뿐만 아니라 주제어실 배치가 안전치 못한 원자로 상태를 감지하는데 어려움을 주었다는 것을 지적할 수 있다. 하지만 운전규칙들이 위반되었다. 전체적으로 말해서 비록 발전소가 시험에서 의도한 것과 상당히 동떨어진 상태에 있었으나 승인되지 않은 시험절차로의 변경이 의도적으로 운전원들에 의해 행해졌다.

7. 요약해서 정리하면 다음과 같은 광범위한 분야에서 사고의 문제점들이 부각되었다.

- (1) 설계시 원자력발전소에 대한 안전표준원칙의 부족
- (2) 부적당한 안전성분석
- (3) 충분치 못한 독립된 안전성 검토 수행
- (4) 운전절차들의 안전성분석 부족
- (5) 운전원 상호간 또는 운전원과 설계자들 사이에 충분치 못한 중요 안전자료의 교류
- (6) 발전소 안전성 측면에서의 운전원들의 부적절한 이해
- (7) 운전 및 시험절차들의 정식 요구조건들에 대해 운전원 측면에서의 충분치 못한 관심
- (8) 부적당한 유효규정의 범위
- (9) 국가적 또는 지역적으로 원자력에 대해 충분치 못한 원자력안전문화 등이다.■