

체르노빌 원전 사고 결과 종합 분석

- IAEA 국제 회의 결과를 중심으로 -

과학기술처 방사선안전과 제공

86

년 4월 26일 토요일 1시 23분경 옛 소련의 체르노빌 원전 4호기(83년 운전 개시)에서 원자로가 파괴되고 다량의 방사성 물질이 대기 중으로 방출되는 사고가 발생하였다.

4월 25일 23시경부터 원자로 운전 정지중 터빈의 회전 관성에 의해 소내 비상 전원 공급 시험에 착수하였으나, 출력 폭주가 일어나 4월 26일 1시 23분경 두 차례의 폭발(증기 및 수소 폭발)이 발생하였다.

체르노빌 원전 사고

1. 사고 개요

가. 사고 원인

불안전한 설계, 설비 결함 및 운전원의 안전 의식 결여 등이 복합된 총체적 안전 문화 부재가 사고의 원인이 되었다.

특히, 서방 원전의 원전 설계 개념과는 달리 사고시 방사성 물질의 환경 방출을 억제할 수 있는 격납 건물이

없었고, 저출력에서의 정반응도 효과로 인한 출력 폭주가 일어날 수 있는 설계 결함이 있었다.

또 원자로 운전원과 발전기 시험원간의 정보 교환 및 사전 협조 없이 시험이 수행되었으며, 시험 강행을 위해 사고에 대비한 비상 냉각 장치를 정지시키는 등 심각한 절차 위반이 있었다.

나. 사고후 조치

사고 직후 100여 명의 소방대원이 투입되어 흑연 화재 진화에 노력하였으나 효과가 없었으며, 사고 다음날인 4월 27일부터는 헬기를 이용하여 붕소·납·점토 등을 투하하여 5월 6일부터 온도 상승과 방사성 물질의 방출이 중지되었다(초기 진화 및 방사능 방출 차단에 약 2주 소요).

사고 다음날인 4월 27일 14시경부터 시작하여 약 135,000여 명의 주민을 소개·이주시키고 사고 후 5년 동안 연인원 80여만 명이 사고 복구 및 피해 확대 방지 작업에 투입되었다.

반경 30km 이내는 심각한 방사능

오염 때문에 10년이 지난 지금까지도 '제한 구역'으로 지정, 일반인의 출입을 통제하고 있다.

다. 현재 상태

파괴된 원자로를 콘크리트로 덮은 석관(sarcophagus, 86. 11. 완공)은 방사능 물질의 방출을 차단하는 등 중요한 방호 수단으로서 기능하였으나, 석관 구조물의 지지대가 용접이나 볼트로 고정되지 않고 원격 조정으로 건설되었기 때문에 석관 자체의 잠재적인 불안정이 심각한 문제이다.

강풍·지진 등 외부 요인에 의해 부분 또는 전체적인 붕괴의 위험성도 배제할 수는 없으나, 최악의 경우 전면 붕괴가 일어난다 하더라도 사고 당시와 같은 광범위한 영향은 예견되지 않는다.

2. 사고 영향 평가

가. 방사선 피폭으로 인한 사망

사고 후 급성 방사선 장애자 237명이 발생, 134명이 병원에 입원하여 이 중 28명이 방사선 피폭으로 사망

하였고 사고 지역에서 방사선과 관련 없는 다른 이유로 3명이 사망하여 총 31명이 사망하였다.

이후 지난 10년 동안 추가로 14명이 사망하였으나, 사망 원인을 급성 방사선 장애에 의한 것으로 직접 연관 지을 수는 없다.

나. 만성 영향 및 기타 영향

벨로루시와 우크라이나에서 86~94년 기간 중 0~15세 어린이 800명의 갑상선암 발생이 있었으며, 암 발생 원인이 완전히 방사선에 기인된 것인지 다른 요인이 가미되었는지는 더 정확한 정보와 연구가 필요하다.

갑상선암을 제외하고는 다른 암의 발생률은 큰 차이가 없다.

사고로 인한 심리적 불안, 스트레스, 정신질환 등의 발생 빈도가 늘어나고 있으며, 이는 앞으로도 영향을 미칠 것으로 보인다.

다. 환경 영향

환경으로부터 방사능을 섭취하는 주요 경로는 지표면에 있는 방사성 물질에 의한 외부 피폭과 방사능에 오염된 음식 섭취에 의한 내부 피폭으로 구분된다.

생태계에 대한 영향은 원전 지역 10km 내에 서식하는 침엽수 및 작은 동물에 영향을 미쳤으나, 86년 가을에는 사고 주변 지역의 방사선량은 100분의 1까지 떨어졌으며, 89년부터는 자연 환경의 회복이 시작되었다.

장기적으로 주민이나 생태계에 영향을 주는 요소는 관찰되지 않았다.

라. 사회·경제적 영향

사고 초기에 명확한 정책적·기술적 대책의 부재로 혼란이 초래되었다.

전력 생산의 축소(사고 당시 원자력이 12% 담당), 오염 지역에서 생산되는 농산물·축산물의 폐기, 대피 주민에 대한 조치, 유언비어 등으로 혼란이 가중되었다.

복구 작업에 막대한 인적·물적 자원 동원으로 국가 재정상 심각한 어려움이 초래되었다.

마. 앞으로의 전망

사고 지역 주변 30km 내에서의 제거하는 거주 지역 주변에 방사성 물질이 존재하고 있고 주변 지하수의 오염 등의 문제로 아직도 어려운 상태이다.

복구 작업자와 주변 30km 지역 주민의 경우, 어린이 갑상선암의 증가 이외에는 다른 암의 발생이 증가되었다는 과학적인 증거가 없으며 피폭자에 대한 지속적인 역학 조사가 필요하다.

앞으로도 갑상선암은 증가할 것이나, 갑상선암은 초기에 발견하고 적절히 치료한다면 90% 정도는 성공적으로 치료할 수 있다.

경제적 어려움 등의 여러 요소가 주민들의 건강에 중요한 역할을 하고 있으며, 심리적 장애 등은 앞으로도 오랫동안 영향을 미칠 것으로 보인다.

3. 사고의 의미와 교훈

체르노빌 원전 사고는 방사능의 대량 방출을 동반하는 원전의 중대 사고

가 초래할 피해의 심각성을 실감케 한 사고로서 피해의 범위가 원자력 사업에 국한되는 것이 아니라 국가의 정치·경제·사회에까지 심각한 문제를 야기한다.

체르노빌 사고는 RBMK형이 아닌 서방형 원전에서는 일어날 수 없는 유형이어서 TMI 사고와는 달리 안전성 보안을 위하여 설비 개선 등의 필요성을 시사하는 바는 없으나 안전 문화가 매우 중요함을 개인식하게 되었다.

Human factor, man-machine interface를 최적화하여 원전의 안전 운전을 지원하기 위한 연구, 운전 및 보수 지침서의 개발과 교육 훈련의 개선에 관한 적극적 대응이 필요하다.

방사성 오염이 국경을 초월하여 영향을 미치는 특성을 비상 계획에 포함할 필요성이 입증되었고, 안정 옥소 배포나 주민 소개와 같은 개입 활동과 관련된 지원 문제는 사고가 전개되는 짧은 시간 동안에 효율적으로 이행될 수 있도록 사전에 준비가 요구된다.

4. 분석 및 대책

체르노빌 사고는 최악의 상황으로 설정한 가상 사고가 실제로 일어난 것으로, 사고의 규모에 비해 사람이나 생태계에 미친 방사선 영향이 당초 예상보다는 적으나, 사고의 사회·경제·심리적인 영향 등 총체적 피해가 심각하므로 사고의 사전 예방만이 최선의 대책이다.

세계적으로 500여 기의 원전이 운

영되고 있으나 안전 관리 수준과 기술 능력이 상대적으로 낮은 원전에서 사고가 발생할 개연성은 있다.

특히 사고의 광역성으로 인해 인접 국에도 영향을 미칠 수 있어 국제원자력기구(IAEA)를 중심으로 사고시 조기 통보 및 상호 지원 협약, 원자력안전협약 등이 체결되는 등 원자력발전이 국제적인 기준과 관리하에 운영될 수 있도록 체제가 대폭 보강되었다.

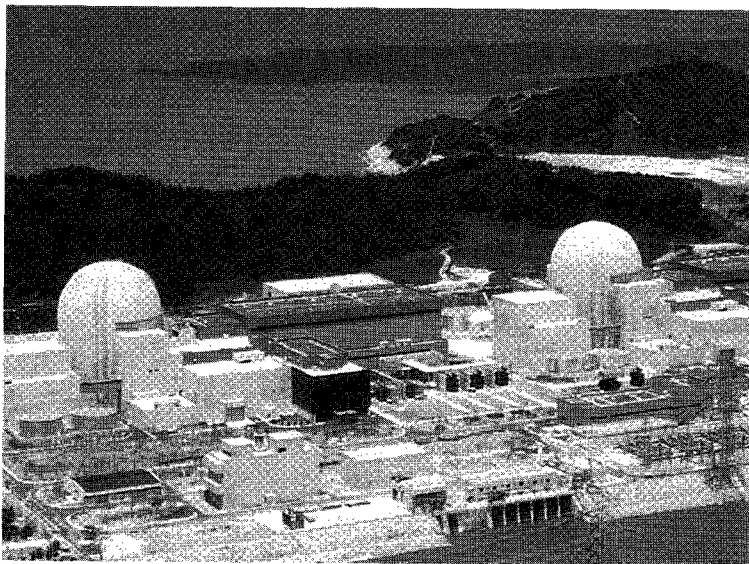
TMI 및 체르노빌 사고를 계기로 중대 사고의 발생 가능성이 기정 사실화되어 원전의 설계 및 운영 전반에 걸쳐 많은 개선과 보강이 이루어졌다.

실천적인 안전 문화의 정착이 강조되었으며 중대 사고 대책으로서 원전 설계·운영 과정에서 종합적인 안전 관리 기법이 개발 반영되었다.

기존의 비상 대책을 재검토하여 사고 발생시 피해 규모를 최소화할 수 있도록 신속하고 효과적인 방사선 비상 대응 체계를 갖추는 계기가 되었다.

우리 나라 원전은 체르노빌 사고의 원인이 되었던 근본적인 설계 결함이 없고 격납 용기가 갖추어져 있어 최악의 경우에도 체르노빌과 같은 사고 발생 및 방사능 방출 가능성은 없으며, 그 동안 설계 및 제작에 관한 기술 자립과 운전 경험 축적으로 국제적으로도 우수한 수준에 있다.

국제원자력기구의 운영안전성평가팀(OSART)에 의한 정기적인 국제 전문가 점검결과에서도 입증되고 있



우리 나라의 원전은 체르노빌 사고의 원인이 되었던 근본적인 설계 결함이 없고 격납용기가 갖추어져 있어 최악의 경우에도 체르노빌과 같은 사고 발생이나 방사능 방출 가능성은 전혀 없다. 사진은 영광 3·4호기의 모습

다.

국내 원전의 안전성 향상 사례

1. 환경 방사능 감시 체제 강화

우리 나라 원전(PWR, CANDU)과 체르노빌 원전(RBMK)과의 설계, 구조 및 설비 등의 차이 때문에 체르노빌 사고로 인해 직접적인 설비 개선 보다는 안전 운영 개선과 비상 대책 향상에 역점을 두어 왔다.

86년 5월 6일~5월 20일(2주간)까지 당시 가동중이던 5기의 원전에 대한 특별 안전 점검을 실시하였다.

다만 체르노빌 사고가 스웨덴의 환경 방사능 감시 체제에 의해 최초로 탐지, 서방 세계에 사실이 알려지면서

원자력 시설에서의 방사성 물질 이상 방출에 대한 조기 탐지 수단으로서 환경 방사능 감시의 역할과 기능이 입증됨에 따라 우리 나라도 체르노빌 사고를 계기로 전국도 환경 방사능 감시 체제의 보강에 착수하였다.

86년 당시 6개소에 불과하던 지방 측정소를 96년 현재 중앙 측정소(한국원자력안전기술원)를 중심으로 9개 지방 측정소(서울·대전·부산·대구·광주·목포·강릉·춘천·제주)와 2개 간이 측정소(울릉도·백령도)로 확충한 바 있다.

방사선 감시기의 무인 자동화 사업에 착수하여 11개 지방 측정소와 4개 원전 등 전국 16개 측정 지점을 통신망으로 연결, 자동 감시망을 구성하는

〈표 1〉 옛 소련 RBMK 원전과 국내 원전의 중요 안전 설계 비교

구 분	우리 나라 원자로	RBMK-1000
다 중 방 어	<ul style="list-style-type: none"> • 1차 냉각재 압력 경계는 2차 계통과 분리 • 격납 건물은 2인치 두께 철판과 4피트의 콘크리트 구조물로 구성 • LOCA 등 설계 사고시 방사능 물질 외부 누출 극소화(TMI 사고) • 비응축성 기체(수소) 폭발에 견딜 	<ul style="list-style-type: none"> • 1차 냉각재 압력 경계는 2차 계통과 직접 연결 • 원자로 건물은 상자형 지붕 형태의 일반 구조물 • 중대 사고시 방사능 물질 누출을 방지 못함(최대 취약점) • 비응축성 기체 폭발에 취약
감 속 재	<ul style="list-style-type: none"> • 경수(PWR) 또는 중수(CANDU) • 중대 사고시 노심의 냉각을 위한 냉각수 제공 	<ul style="list-style-type: none"> • 흑 연 • 감속 계통과 냉각 계통이 분리된 채널형이어서 원자로가 대형화 • 정기포 계수 효과로 저출력 운전시 출력 폭주 가능성 • 관계 계통은 복잡하여 운전에 주의
설 계 개 념	<p>(안전 위주)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 다중 방어 설계로 안전성 확보 • 신뢰성 있는 공학적 안전 설비의 설계 및 설치 • 신뢰성 있는 비상 전원 확보 • 엄중한 품질 관리 	<p>(경제성 위주)</p> <ul style="list-style-type: none"> • 고가의 격납 건물 없음 • 특별한 설계 변경 없이 출력 증가 용이 • Man-machine interface 고려치 않음 • 공학적 안전 설비 및 비상 전원의 신뢰성과 완벽성 부족 • 필수 계통의 자동화 부족

사업이 금년중에 완료된다.

환경 방사능 자동 감시망은 평소 매 5분 간격으로 자연 방사능 측정 자료를 중앙 측정소(한국원자력안전기술원)로 전송하도록 되어 있으나 이상치가 검출되면 실시간으로 연속해서 자료를 전송하도록 설계되어 있다.

중앙 측정소에서는 이들 자료를 저장·보관·관리하면서 기상청의 기상 관측 자료, 원전 운전 정보 자료와 함께 방사능 영향을 자동으로 분석·처리하여 과학기술처, 지방 자치 단체 및 한국전력공사에 그 결과를 통보, 비상 대책의 이행을 지원하고, 사고시 조기 통보 협약에 따른 국제원자력기구(IAEA)·미국·일본 등과의 통보 조치도 자동으로 처리하게 된다.

앞으로 과학기술처는 중국이 황해 연안에 대규모 원전 건설을 추진하는 등 주변 여건 변화에 대응하여 연차적으로 지방 측정소를 확대하고 자동 감시망의 기능을 더욱 발전시켜 보다 완벽한 환경 방사능 감시에 만전을 기할 예정이다.

2. 비상 대응 설비 설치

우리 나라는 체르노빌 사고 이전에 미국 TMI 원전 사고(79년) 이후 꾸준한 설비 보완과 운영 관리 개선에 노력하여 왔다.

한국전력공사 본사에 각 원전의 안전 운전 정보를 전송·표시하는 안전 정보 표시 장치(SPDS, Safety Parameter Display System)를 설

치하였다.

사고에 대비한 원전별 비상 대응 설비(ERF, Emergency Response Facility), 기술 지원 센터(TSC, Technical Support Center)를 구성하였다.

Man-machine interface를 고려한 제어반(main control board)을 개선하였다.

운전 담당 부서를 4조 3교대 근무에서 6조 3교대로 개선, 운전원에 대한 교육·훈련을 강화하였다.

3. 중대 사고 대책 수립

안전성 평가 방법이 과거 최악의 단일 사고를 기준으로 하는 결정론적 평가 방법(deterministic safety analysis)에서 사고의 원인과 진행 과정, 다른 계통·설비에 미치는 영향까지를 고려하는 확률론적 평가 방법(probabilistic safety assessment)으로 바뀔에 따라, PSA 기법 연구·개발에 노력하면서 국내 원전의 사고·고장 정보를 데이터베이스화하여 본격적인 PSA 기반을 구축하였다.

또 건설중인 원전에 대하여는 안전 심사 과정에서 PSA 기법을 적용, 안전 문제를 사전에 도출, 개선 보완을 유도하고 있다.

운전중인 원전에 대하여는 안전성 재평가(IPE, Individual Plant Examination)를 통해 기술 지침서(Tech. Spec.) 및 각종 비상 운전 절차서(Emergency Operating Pro-

cedure)의 개선·보완에 노력하고 있다.

4. 국제 전문가단의 안전성 검토

국제원자력기구(IAEA)·세계원전사업자협회(WANO) 등의 전문가단을 초빙, 국내 원전의 안전성을 평가하고 그 결과를 안전성 향상에 활용하였다.

건설중인 원전에 대한 IAEA의 설계 검토는 3회로 영광 3·4호기(85. 5), 월성 2호기(92. 4), 울진 3·4호기(95. 5) 등이다.

운전중인 원전에 대한 IAEA의 안전 운영 평가는 4회로 고리 1호기(83), 고리 3·4호기(86), 월성 1호기(89), 울진 1·2호기(94) 등이다.

5. 안전 문화 평가 지표 개발

원자력 종사자의 안전 의식과 조직

(표 2) 피폭 선량별 급성적 신체 영향

피폭선량	증상 및 영향
25rem 이하	• 임상적 증상 없음
25~100rem	• 약간의 혈액 변화 후 곧 회복
100~200rem	• 파로·권태·탈모·식욕부진
450rem	• 30일 내에 50% 사망
700rem	• 30일 내에 100% 사망
1,000rem 이상	• 중추신경 마비로 혼수 상태 후 1~2일 내 사망

(표 3) 법적 허용 기준

구분	일반인	원전종사자
연간허용치	500mrem	5rem
비고	개인의 자연 방사선 피폭량: 연간 240mrem 엑스선 촬영시 피폭량: 흉부 1회 촬영시 약 100mrem	

관행이 안전성 확보에 중요함이 인식되면서 안전 문화의 정착과 생활화에 노력하고 있다.

IAEA가 개발한 ASCOT 가이드라인을 기초로 우리의 고유 문화를 반영한 평가 지표를 개발 완료하였다(95년 말).

금년부터 이를 시범 적용, 미비점을 개선·보완하여 안전문화를 평가한다.

6. 방사선 비상 대책 개선·발전

사업 운전을 개시하기 전에 원전 호기별로 비상 대책을 수립하고 주기적인 비상 훈련을 실시하며 미비점은 지속적으로 보완·발전시켜 나가고 있다.

사업자 자체 훈련은 매분기 1회, 합동 훈련은 원전 부지별로 매 3년마다 1회 실시하고 있다.

지방 자치 단체, 지역 주민에게도 참여 및 참관의 기회를 제공함으로써 상호 이해와 비상시 대처 능력을 향상시키고 있으며, 금년부터는 외국의 관계자도 참관토록 할 예정이다.

7. 국제 협력

우리 나라는 사고시 조기 통보 및 상호 지원 협약, 원자력안전협약 등에 가입하여 원자력 안전 정보의 상호 교환과 전문가 방문 등 안전성 향상을 위한 국제적 노력에 동참하고 있다.

미국·캐나다·프랑스 등 원전 도입국과 사고시 특별 지원에 관한 협력

도 강화하고 있으며, 특히 미국·일본과는 연 1회 통신 훈련을 실시, 상호 지원 태세를 확인하고 있다.

8. 차세대 원자로 개발

선진국의 원전을 터키 방식으로 건설하던 우리 나라는 '원자력 발전 기술 국산화 계획'을 통해 원전의 자력 설계·건설 능력을 확보하고 95% 이상의 기술 자립을 이룩한 바 있다.

특히, 우리 기술진에 의해 자체 개발한 한국형 표준 원전은 대북 경수로 지원 사업을 통해 북한에도 제공되고 되어 있으며 중국과 동남아 국가에 수출도 적극 추진하고 있다.

이러한 기술력을 바탕으로 기존의 원자로보다 안전성이 10배 정도 향상된 새로운 원자로 개발에도 착수하였으며, 이 사업이 계획대로 성공적으로 완료되면 2000년대 중반에는 실용화 될 수 있을 것이다.

9. 결 언

이러한 우리의 노력과 성과가 결집되어 우리 나라는 후발 원자력국으로서 가장 성공적이고 모범적인 세계 10위권의 원자력 발전국으로 평가받고 있다.

이에 따라 개도국은 물론 국제 기구로부터 경험과 기술의 전수 등 국제 사회에서의 기여를 확대해 주도록 요청받고 있다. ☉