

<토론> ⑤

1. 아래의 상황에 대한 기사들을 읽고 자신의 생각을 다른 학우들과 토론 하시오. 어떤 문제가 있다고 생각하는가?
2. 아래의 두 가지 물음에 답하십시오.

1

후쿠시마 원전 사고 9년…그린피스 “재오염 진행 중”, “태풍에 날린 세슘, 도로와 주택으로 퍼져” (출처: 한겨레, 2020년 3월 19일)

2011년 3월 일본 후쿠시마에서 발생한 원자력 발전소 폭발 사고 이후 9년 동안 일본 정부가 방사성 오염 물질을 제거해왔지만 오히려 주변 지역으로 오염이 확산했다는 환경단체의 조사 결과가 나왔다. 국제환경단체 그린피스는 9일 공개한 '2020 후쿠시마 방사성 오염의 확산 : 기상 영향과 재오염' 보고서를 통해 "일본 현지에서 방사성 오염 물질이 이동해 재오염이 진행된 증거를 발견했다"고 밝혔다. 방사선 방호 전문가로 꾸려진 조사팀은 일본에서 조사해보니, 지난 10월 강풍과 폭우를 동반한 태풍 하기비스의 영향으로 고준위 방사성 물질인 세슘이 제염이 불가능한 산림 지역에서 주변 도로와 주택 등으로 퍼져 나갔다는 것이다. 이 팀은 지난해 10월과 11월 3주에 걸쳐 후쿠시마 현지를 조사했다. 조사팀은 일본 정부가 주민 귀환을 지시한 나미에와 이타테의 피난지시 해제 지역을 관찰했는데, 나미에 마을 내 조사지점 5581 곳 가운데 강 제방과 도로의 99%가 일본 정부의 제염 목표치를 웃돌았다. 이들 지점의 방사선 평균 선량은 시간당 0.8μSv(마이크로시버트)이며, 최대 1.7μSv까지 나와 사고 이전보다 20배가량 높은 수치를 보였다. 조사팀은 또 마을 안 학교 주변 지역 중 45%에서 1년동안 연속 노출될 때 최대 시간당 17mSv의 피폭을 당할 수 있는 수치가 나왔다고 밝혔다. 이는 국제방사선방호위원회의 일반인 연간 한도 선량의 17배에 달한다. 조사팀은 이와 함께 도쿄올림픽 성화가 출발하는 '제이(J)발리지'도 조사했는데, 이 지역에서 시간당 71μSv에 달하는 방사선 고선량 지점인 '핫스팟'을 발견했다고 밝혔다. 이는 2011년 사고 이전과 견주면 1775배에 이르는 것으로, 그린피스는 "지난해 11월 그린피스의 방사성 조사 결과 서신을 받은 일본 정부가 제염 작업을 실시했지만, 오염 관리가 제대로 되지 않았다는 것"이라고 지적했다. 이런 핫스팟은 후쿠시마 시내 중심부에서도 45곳이 발견됐다. 그린피스 조사팀은 후쿠시마 시내 도쿄행 신칸센 탑승구 근처와 도로 등에서 시간당 5.5μSv(10cm 높이에서 측정)의 방사선 선량을 확인했다. 이들 핫스팟은 국제원자력기구(IAEA)가 위험 물질로 지정한 수치(시간당 0.3~0.5μSv)를 초과한 것이다. 스즈키 카즈에 그린피스 일본 사무소 기후에너지 캠페이너는 "태풍 등 기상으로 인한 방사성 재오염은 여러 세기에 걸쳐 지속할 것"이라며 "일본 정부가 강조하는 '모든 것이 정상화되고 있다'는 표현은 현실과 다르다. 일본 정부는 제염 작업에 실패했다"고 비판했다. 손 버니 그린피스 독일사무소 수석 원자력 전문가는 "일본 정부는 올림픽 관람을 위해 이곳을 방문할 전 세계 시민과 후쿠시마 시민의 안전을 위해 오염 실태를 투명하게 공개하고 대책을 마련해야 한다"고 강조했다.

2

후쿠시마 사고 발생 및 악화의 기술적 원인

(출처: 한국원자력학회 후쿠시마 위원회, 2012년 8월 28일)

1) 초대형 쓰나미에 대한 무방비

후쿠시마 제1원전 사고의 가장 직접적인 원인은 높이 15m 수준에 이른 초대형 쓰나미였다. 지진으로 인해 외부에서 공급되는 교류 전력망이 완전히 붕괴되었으나, 12대의 비상용 디젤발전기가 가동하여 안전 기능 유지에 필요한 핵심적인 교류 전력을 공급하고 있었다. 그러나 쓰나미는 1~4호기의 모든 교류전원을 순식간에 무용지물로 만들었고, 1,2호기의 모든 직류전원을 비롯한 대부분의 직류전원도 축전지 또는 전력패널의 침수로 인해 성능을 상실하였다. 이와 더불어 해변 쪽에 위치한 펌프, 밸브, 열교환기, 탱크 등 최종 열제거 기능(Ultimate Heat Sink)과 관련된 거의 모든 설비들도 심하게 훼손되어 전력망 복구 이후에도 제 기능을 할 수 없었다. 위의 상황은 후쿠시마 원전에 대해 설계기준 쓰나미가 매우 단일하게 결정되었을 뿐만 아니라, 이를 초과하는 쓰나미에 대해서는 구체적인 대책이 수립되지 않았기 때문이다. 쓰나미에 대해 합리적인 고려를 했다면 안전 관련 핵심 설비들의 설치 위치를 변경하거나, 차단벽이나 방수설비 등을 크게 보강했을 것이다. 결국 설계 기준을 크게 초과하는 쓰나미에 대해서는 대응설비 등 하드웨어 측면이나 절차서 및 교육훈련 등 소프트웨어 측면에서 완전히 무방비 상태였고, 이것이 중대한 사고 발생의 직접적인 원인이었다고 할 수 있다.

2) 중대사고 대책 미흡

후쿠시마 원전에 대해서도 1990년대에 중대사고에 대비한 설비 개선과 중대사고 관리 절차서(Severe Accident Management Guidelines: SAMG) 도입이 이루어졌다. 원자로 및 격납용기로의 냉각수 주입 방법을 다양화하고 소방차로부터의 주입 라인도 확보했으며, 격납용기에서의 수소가스 폭발을 방지하기 위해 질소주입계통을 설치하고 배기계통을 강화했다. 또한 인접 호기와의 전력망 연결 등을 통한 신뢰도 향상을 꾀했으며, 당초 10대의 수냉식 비상디젤발전기만 갖추고 있던 후쿠시마 원전에 3대의 공랭식 비상 디젤발전기를 추가로 설치하였다. 이와 같이 보강된 설비들은 사고의 초기 진행을 억제하는 데에는 큰 도움이 되지 않았지만, 사태를 궁극적으로 수습하는 데에는 많은 역할을 수행한 것으로 판단된다. 그렇지만, 종합적인 관점에서 보면, 후쿠시마 원전의 중대사고 대책은 크게 미흡하였다. 우선 중대사고 절차서가 다분히 형식적이었던 것으로 보고되고 있고, 운전원들은 완전전원상실(SBO) 시의 원자로 거동에 대한 이해가 충분하지 못하였다. 이미 많은 양의 핵연료가 용융되고 일부는 원자로 용기 밖으로 누출되었을 것이 확실했던 시점까지도 냉각수 주입과 관련하여 비현실적인 논의가 계속되었던 것은 의사 결정자들이 중대사고 시의 원자로 거동을 충분히 이해하지 못했기 때문으로 추측된다. 또한, 다수 호기에서 동시에 중대사고가 진행되는 상황에 대해서는 전혀 대비가 없었는데, 이는 다른 나라에서도 마찬가지였다고 할 수 있다.

3

3) 지진과 쓰나미에 의해 악화된 작업 환경

후쿠시마 원전에서 다수 호기의 중대사고가 진행된 것은 지진과 쓰나미에 의해 발전소에 접근하는 도로 및 발전소 내부 이동 경로의 환경이 크게 악화되어 이동식 비상 설비들을 손쉽게 활용하지 못한 데에도 큰 영향을 받았다. 만일 정상적인 환경이었다면 이동식 발전기나 펌프 등의 핵심장치를 훨씬 더 쉽게 이용함으로써, 중대사고로의 진행을 억제할 수 있었을 것이다. 지진이 발생한 3월11일의 경우, 지진과 쓰나미로 인해 발전소 현장에서 유선 및 무선 통신망이 거의 마비되어 수습 대책 수립을 어렵게 한 것으로 알려지고 있다. 사고가 급속하게 진행된 1호기에 대해서는 악화된 작업 환경이 큰 영향을 주지 않았을 것이다. 그러나 피동계통이 작동하여 2~3일 동안은 원자로에 대한 비상 냉각이 이루어졌던 다른 호기들의 경우에는 작업 환경만 좋았다면 대량 노심 용융이나 수소가스 폭발은 예방되었을 가능성이 높다.

4) 사고 진행 과정에서의 부적절한 대응

부적절한 사고 대응과 관련하여 가장 중요하게 지적할 수 있는 사항으로 다음 3가지를 들 수 있다.

- ① 1호기 격리응속기(IC) 작동 상태에 대한 오판: 전원상실 시의 밸브 작동 특성에 따라 쓰나미에 의해 직류전원이 상실된 이후에는 격리응속기가 정상적으로 기능할 수 없었으나 상당기간 동안 정상 작동하는 것으로 오인함. 또한, 작동하지 않는 상태를 확인한 이후에도 상부에 제대로 보고하지 않아서 원전 상태에 대한 오해와 부적절한 대응의 원인이 됨
- ② 3호기 냉각수 주입에 대한 부주의한 제어: 3호기는 축전지에 의한 직류전원이 살아남았기 때문에 초기에는 원자로심격리냉각계통(RCIC), 이후에는 고압냉각수주입계통(HPCI)에 의한 냉각수 주입이 이루어짐. 3월13일 새벽 임시 설치된 디젤구동 소화수펌프를 이용하여 냉각수를 주입기로 결정하고 불안정해진 HPCI를 정지시켰으나, 축전지 고갈로 원자로 감압밸브 작동이 실패함에 따라 냉각수 주입에 실패했는데, 축전지 상태를 사전에 파악하지 않은 것이 큰 실수였음
- ③ 격납용기 배기밸브 작동 문제: 사고에 대비한 배기밸브 작동 훈련은 주로 제어실에서 간단히 버튼을 누르는 것으로 실시되었기 때문에, 전원이 상실되고 제어실이 기능을 하지 못하는 상황에서 운전원들은 밸브의 설치 위치 확인, 작동에 필요한 압축공기 및 기동전원 확보 등에서 커다란 어려움에 봉착함. 특히 2호기에서는 배기밸브의 개방을 결정한 이후 밸브 위치와 개방 방법을 파악하는데 수 시간이 걸렸을 뿐만 아니라, 다양한 이유로 개방에 실패한 상황에서 격납건물 손상이 일어나서 많은 양의 방사성물질이 대기로 방출됨

사고의 흐름을 살펴보면 3월12일 15시36분 발생한 1호기 원자로건물에서의 수소가스 폭발이 첫 번째 큰 사건이었고, 3월14일 11시01분 3호기 원자로건물에서의 수소가스 폭발이 두 번째 큰 사건이었다. 3월 15일 오전에는 4호기 원자로건물에서 수소폭발이 발생하기도 했지만, 이보다 더 중요한 것은 아직 정확하게 규명되지 않은 2호기 격납용기의 손상으로 대규모 방사능 누출이 발생한 일이다. 위에서 지적한 부적절한 대응 중에서 한두 가지가 잘 진행되었다면, 1호기 수소가스 폭발부터 예방할 수 있었거나 그 이후의 사고 진행을 억제시킬 수 있었을 것이다. 2호기 배기밸브만 제대로 작동했다면 방사성물질 누출량을 크게 줄일 수 있었다고 평가되고 있다. 후쿠시마 제1원전에 초대형 쓰나미가 휩쓸고 간 이후의 상황을 돌이켜보면, 사고의 악화를 며칠 내로 진정시킨 운전원들의 노력을 인정하지 않을 수 없다. 그러나 운전조작이 사고 시의 발전소 거동에 대해 좀 더 알고 있었거나 관련된 사람들 간의 의사소통이 좀 더 원활하게 이루어졌다면 사태의 악화를 더 일찍 중단시킬 수 있었으리라는 아쉬움이 크다.

4

5) 원자로 내부 상태에 대한 정보 부족

발전소 상태에 대한 이해 없이는 사고에 대한 적절한 대응이 매우 어렵다. 따라서 운전원들은 방사선량이 증가하고 있는 깜깜한 암흑 속에서 온도, 압력, 수위 등 핵심적인 정보를 얻기 위해 사투를 벌였다. 그럼에도 불구하고 후쿠시마 사고의 대응은 원자로 내부 상태에 대한 정보가 매우 부족한 상태에서 이루어져야만 했고, 때로는 잘못된 정보로 인한 혼란도 피할 수 없었다. 교류전원뿐만 아니라 직류전원도 거의 상실되고 특히 주제어실의 기능을 잃은 상태에서 원자로 온도, 압력 등 기본적인 상태조차 실시간으로 알기 어려웠다는 점이다. 운전원들은 손전등과 이동 전원을 이용하여 주기적으로 주요 변수들을 확인했는데, 원자로 내부의 상태를 신뢰성 있게 추측하기에는 한계가 있었다. 특히, 원자로 수위계의 성능이 지진 등의 영향으로 저하된 것으로 보이는데, 잘못된 값을 표시함으로써 원자로 내에 상당한 양의 냉각수가 존재하고 있는 것으로 오해하게 만들었다. 물론 후쿠시마 원전에 설치되었던 대부분의 계측기들은 중대사고 환경에 대해 검증되지 않은 것들이었다. 의존할만한 계측기가 매우 제한적이고 현장이 매우 혼란 상황에서는 외부 전문가들을 최대한 활용하여 다양한 사고 시나리오를 분석하면서 원자로 내부의 상태를 추정하고 사고 관리에 활용했어야 했다. 그러나 후쿠시마 사고의 초기 과정에서는 JNES 등의 중대사고 전문가들조차도 의사결정 과정에서 자기 목소리를 내지 못하였고, 많은 의사 결정이 잘못된 정보 또는 상식적인 판단에 따라 이루어진 것으로 보인다.

6) 다수 호기에서의 동시 중대사고 전개

동일본 대지진은 총 14기의 원전에 직접적인 영향을 주었고, 동경전력의 후쿠시마 제1원전(총 6개 호기)과 제2원전(총 4개 호기)는 각각 비상대피 선언을 해야 하는 상황을 맞았다. 다행히 제2원전의 상황은 곧 수습되어 저온 정지(Cold Shutdown) 상태를 확보했지만, 어쨌든 사고 초기에 동경전력은 2개 원전 부지, 10개 호기에서의 위기 상황을 동시에 파악하면서 통제해야 하는 상황에 내몰렸던 것이다. 특히 이사장과 사장이 모두 동경에 없었고 통신망도 매우 혼란스러운 상황이었기 때문에 초기 대책 수립에 큰 어려움을 겪었을 것이다. 이보다 더 중요한 것은 제1원전의 6개 호기, 특히 1~4호기에서 동시에 문제가 발생하면서 소수의 인력이 대응하는데 커다란 어려움을 겪었다는 점이다. 교대 운전원을 포함한 많지 않은 수의 작업자들은 각 원자로의 상태를 최대한 파악하면서, 위기 상황이 발생하는 호기에 우선하여 대응할 수밖에 없었다. 따라서 각 원자로별 상황을 체계적으로 파악하면서 대응책을 일관성 있게 추구하기가 매우 어려웠고, 우선순위를 결정하는 데에도 혼란이 있었다. 특히 12일의 1호기 수소가스 폭발과 14일의 3호기 수소가스 폭발은 인근 호기에서 진행 중이던 복구 작업을 크게 방해하였다. 거의 준비되었던 냉각수 주입 라인을 망가뜨리기도 하고, 작업자들의 일시 피신을 가져오기도 하였다. 특히 사태가 진행되면서 방사능 준위가 계속 높아짐에 따라 작업 환경이 매우 악화되었다.

5

<물음>

1. 위의 사고에 고장예측 계통도 분석 혹은 사건발생 계통도 분석 중 적절한 것을 골라 적용하시오.
2. 원자력(핵) 발전소의 위험 관리에 대해 해결책을 제시하시오. 이때 해결책에는 대중과 전문인 각각의 역할을 어떻게 상정하는 것이 바람직한가?

6