

## 후쿠시마 원전 사고 10년: 후쿠시마 현황과 교훈



**백원필**  
한국원자력연구원 前 부원장

- 서울대학교 원자핵공학 학사
- KAIST 원자력공학 석사·박사
- 前 한국원자력학회 후쿠시마위원회 위원장
- 前 한국원자력연구원 열수력안전연구부장
- 前 한국원자력연구원 원자력안전연구본부장
- 前 한국원자력연구원 부원장

**동** 일본대지진에 의한 초대형 쓰나미를 견디지 못하고 후쿠시마 제1원전에서 사고가 발생한 지 10년이 지났다. 세부적인 사고 진행은 기억에서 멀어져가지만, 토요일이던 3월 12일 오후 1호기에서 수소가스 폭발이 발생하던 영상은 지금도 생생하다. 후쿠시마 원전 사고는 당사국인 일본은 물론 인접국인 우리나라를 비롯한 전 세계에 엄청난 충격을 주었다. 일본은 경제적, 정신적, 문화적으로 막대한 피해를 보았고, 사고 원전 폐로 작업은 아직도 본궤도에 들어섰다고 보기 어렵다. 세계적으로는 21세기에 들어서면서 가시화되던 원자력 르네상스가 사라졌다. 특히 우리나라에서는 원자력이 경제적이고 안정적인 국내 전력 공급뿐만 아니라 수출 산업으로 발돋움하고 있었음에도 탈원전 정책을 채택하는 상황까지 이어졌다.

사고 발생 10주년을 맞아 다양한 행사들이 국내외에서 개최되고, 많은 언론 기사와 보고서들

이 나오고 있다. 사고의 원인과 교훈, 사고의 피해 규모, 사고 원전의 현재 상황과 폐로 문제, 일본 국토 제염의 효과와 방사선 안전, 농수산물 등 식품 안전, 원전의 역할과 안전성 등 다양한 주제들이 논의된다. 물론 원자력에 대한 기본 인식이 팩트의 수용, 논의의 초점, 결론 등에 큰 영향을 미친다. 특히, 국내에서는 정부의 탈원전 정책 이후 원자력에 대한 찬반 대립이 극심해져서, 소셜미디어는 물론 언론까지 진영논리에 따라 움직이는 경향이 크다.

필자는 사고 상황 파악, 교훈 및 후속대책 도출, 정부 정책 및 연구 방향 수립, 국민 및 언론과의 소통 등에 직간접적으로 참여해왔다. 원자력 안전 연구자로서 안타까움과 보람을 함께 느낀 10년이었다고 볼 수도 있다. 이 글에서는 후쿠시마 제1원전과 후쿠시마 지역의 현재 상황을 요약하여 소개한 후, 개인적 관점에서의 사고 원인과 교훈 및 안전 확보 방향을 논의하고자 한다.

〈표 1〉 동일본대지진 및 후쿠시마 원전 사고 후의 주요 상황 전개

구분		재해/사고 직후	중간 상황	최근 상황
피난지시구역 구분		경계구역, 계획적 피난구역, 긴급피난준비구역	귀환곤란구역, 거주제한구역, 피난지시해제준비구역	귀환곤란구역만 유지 (내부 '특정부흥재생거점구역' 지정 => 추가 해제 추진)
피난지시구역 면적		최대 1,595km <sup>2</sup> (2011.4) (후쿠시마현 면적의 11.5%)	개편 후 1,150km <sup>2</sup> (2013.5) (후쿠시마현 면적의 8.3%)	336km <sup>2</sup> (2020.3 이후) (후쿠시마현 면적의 2.4%)
피난자 수	전체	최대 47만명(2011.3)	17.1만명(2016.3)	4.1만명(2021.2)
	후쿠시마현	최대 16.5만명(2012.5)	9.7만명(2016.3)	3.6만명(2021.1)
피난지시해제구역으로 복귀한 주민 수		-	-	1.4만명(2020.10)
후쿠시마시 공간선량률		2.74μSv/h(2011.4)	0.69μSv/h(2012.9)	0.13μSv/h(2020.9)
사용후핵연료 반출		사용후핵연료저장조에 저장 (1~4호기)	2014년말 4호기 반출 완료 (1,535개 집합체)	2021년 2월말 3호기 반출 완료 (566개 집합체)
용융노심 데브리 반출		1,2,3호기 노심의 용융 (정확한 상황 파악 불가)	격납용기 조사 등 수행 (데브리 위치 확인 및 추정)	2호기 데브리 시험반출 준비 (2022년 예상)
방사성 오염수 발생		건물 및 시설에 오염수 대량 축적	지하수 유입 등으로 오염수 보관량 지속 증가	약 125만톤 보관(2021.2) (저장탱크 총용량: 137만톤)
오염수 처리·처분		10년 내 모든 오염수 처분 완료 계획	부지 내 탱크에 보관하면서 처분방안 검토	해양 희석 방출 방안을 유력하게 검토
후쿠시마현 산업 (2010년 대비)	농축산업 생산량	2011년 79%	2015년 85%	2018년 91% (일본 평균 111%)
	해양수산업 생산량	2012년 35%	2015년 52%	2018년 53%
	제조품 출하량	2011년 85%	2016년 98%	2018년 103% (일본 평균 115%)
	연간 외국 관광객 수	2011년 36%	2016년 128%	2019년 332%

### 현재의 후쿠시마 상황

일본 부흥청, 환경성, 경제산업성, 후쿠시마현, 도쿄전력 등의 자료를 참고하여 동일본대지진 및 후쿠시마 원전 사고 후 최근까지의 상황 전개를 〈표 1〉에 나타냈으며, 주요 내용은 다음과 같다.

- 후쿠시마 원전 현장에서의 폐로 작업은 전체적으로 착실하게 진행되고 있으나, 2011년만 수립된 중장기로드맵의 일정보다는 조금씩 늦어지고 있다. 대표적으로 애

초 10년 이내에 완료할 계획이던 건물 내 오염수 처리와 사용후핵연료 반출이 완료되지 않았고, 특히 오염수 관리 문제가 애초 예상보다 크게 중요해졌다.

- 사고 원전 폐로 과정에서 가장 중요한 과제가 원자로용기 하부와 격납용기 바닥에 주로 머무는 것으로 알려진 용융핵연료 잔해물(데브리) 반출이라 할 수 있다. 현재 격납용기 내부 상황을 어느 정도 파악하게 되고, 특히 2호기 격납용기에 있는 잔해물의 이동

성을 확인한 것은 큰 성과라 할 수 있다.

- 현재 사고 원전은 비교적 안전하게 관리되고 있으며, 향후 지진 등 자연재해나 인적 실수 또는 기기고장에 의해 소규모 사건이 간헐적으로 발생할 가능성은 있으나, 주민의 안전을 우려할만한 큰 사고가 발생할 가능성은 희박하다. 가장 큰 이유는 사용후핵연료 및 용융핵연료 잔해물에서 발생하는 붕괴열이 매우 작아져서 냉각장치가 고장이 나더라도 상당 기간 견딜 수 있기 때문이다.
- 오염 지역에 대한 대대적인 제염작업으로 후쿠시마현 면적의 11.5%였던 피난지시구역이 귀환곤란구역(후쿠시마현 면적의 2.4%)을 제외하고 모두 해제되었고, 귀환곤란구역에서도 특정부흥재생거점구역을 지정하여 집중적인 제염을 시행하고 있다. 그 결과 후쿠시마 지역의 주요 철도망과 간선도로망은 모두 정상화되고, 최대 16.5만 명이었던 후쿠시마현 피난민 수도 3.6만 명 수준으로 감소했다.
- 일본의 국토 제염은 주거지역, 학교, 공원, 도록, 농지 및 생활구역 인근 산림지역을 중심으로 이루어졌고, 넓은 면적을 차지하는 대부분의 산림지역은 제외되었다. 따라서 귀환곤란구역 밖에도 방사능이 높은 지역이 있고, 방사능이 특히 높은 핫스팟이 간헐적으로 발견될 가능성이 있다.
- 피난지시구역을 제외한 후쿠시마현의 산업 생산은 해양수산업 분야를 제외하고는

사고 이전 수준으로 회복되어가고 있다. 다만, 후쿠시마산 식품에 대해 엄격한 검사가 이루어지고 기준치를 초과하는 경우는 거의 나타나지 않음에도 불구하고, 육류나 과일 등의 가격은 일본 평균의 80~90% 수준으로 낮게 형성되고 있다.

- 후쿠시마 원전 사고에 따른 방사선 피폭이 원인이 되어 암을 비롯한 질병이 크게 증가했다는 주장이 지속해서 제기되었으나, 일본 정부와 후쿠시마현의 광범위하고 체계적인 조사 결과 사실을 오해했거나 왜곡한 것으로 확인되었다. 가장 우려했던 소아 갑상선암 증가도 통계적으로 확인되지 않고 있는데, 이에 관해서는 지속적인 조사연구가 바람직하다.
- 사고 전 일본에서는 총 54기의 원전(비등경수로 30기, 가압경수로 24기)이 가동 중이었으나, 사고 후 21기는 영구중단이 결정되었고, 9기는 원자력규제위원회의 재가동 심사와 설비 개선 및 지자체 동의를 거쳐 재가동되었다. 일본 정부는 2030년 원자력 발전 비중 20~22%를 목표로 하고 있으나, 원자력에 대해 부정적인 여론을 고려할 때 실현될 수 있을지 불분명하다.

### 후쿠시마 원전 사고 원인과 교훈

2013년 3월 발행된 한국원자력학회 후쿠시마 위원회 보고서에서는 사고의 근본 원인으로 다

음 4가지를 제시한 바 있다.

- 일본 고유의 자연재해 특성 고려 미흡
- 최상의 지식에 기반을 두지 않은 의사 결정
- 제도/조직 및 규제의 실패
- 안전문화 미흡 및 유착 문화

후쿠시마 원전에 대한 최초 설계기준은 우리나라 원전보다도 낮은 0.18g(지진)과 3.1m(쓰나미)였다. 원전 건설 후 지진 대비는 적극적으로 강화되었지만, 쓰나미에 대해서는 그렇지 못했다. TMI 사고 후 중대사고에 대비하여 도입된 대처설비와 절차서들도 막상 사고가 나자 제 기능을 발휘하지 못했는데, 이는 지식이 부족했다기보다 중대사고를 진지하게 고려하기 어려웠던 조직 및 의사결정체계와 안전문화 미흡이 더 큰 배경이었다고 생각한다.

우리나라는 원자력과 관련한 정부조직 및 규제체계, 사업 및 연구 체계, 조직문화뿐만 아니라 지진, 쓰나미, 화산 등 자연재해 환경에서도 일본과 차이가 크다. 그러나 후쿠시마 원전 사고의 근본 원인이 우리와는 거리가 멀다고 하기 어렵다. 특히 최근에는 사실과 과학보다는 진영 논리가 다양한 의사결정에 깊숙이 침투하고 있어서 우려된다. 따라서 ‘우리는 일본과 다르다’는 믿음은 뒤로 하고, ‘우리는 제대로 하고 있는가’를 냉정하고 철저하게 평가할 필요가 있다.

일반적으로 예방, 대비, 대응, 복구를 재난안전관리의 4단계라고 한다. 원자력 발전 초기에는 중대사고가 발생할 가능성이 없지는 않더라도 설계기준사고 대응을 통한 예방 노력으로 발

생 확률이 매우 낮다고 생각했다. TMI 사고 이후에야 중대사고 실험 및 해석 연구, 확률론적 안전성평가와 중대사고관리지침서 도입 등 중대사고 대비가 본격화되었다. 그런데 중대사고 가능성을 부정하는 기류가 원자력계에 있었고, 일본에서는 특히 심했다고 생각한다. 후쿠시마 원전에서 중대사고를 실제로 일어날 수 있는 사고로 생각하고 대비했다면 사고 결과를 크게 완화했을 것으로 믿는다. 이에 비해 사고 진행 과정에서의 현장 대응은 그 당시의 환경을 고려하면 비교적 잘 이루어졌다고 판단한다. 다만, 사고 초기의 대응은 발전소장을 비롯한 현장 인력의 자체적 판단에 따라 이루어졌고, 외부 기관이나 전문가의 기여는 크지 않았다.

### 안전성 향상 방향: 올바른 일을 제대로!

후쿠시마 원전 사고의 교훈과 한국의 상황을 고려할 때, 기술적인 관점에서는 3가지가 중요하다. 첫째, 최상의 지식과 정보에 근거한 의사결정이 중요하다. 이를 위해서는 원자력 관련 기관과 직원들은 대내외적으로 적극적으로 소통하고 정보를 교류해야 하며, 안전 연구에서도 협력이 필요하다. 임직원이 최상의 지식과 정보에 접근하고 체득하려면 교육·훈련 시스템이 체계적으로 운영되어야 한다. 국제 수준의 전문가 그룹이 육성되고 세계적 시야를 갖도록 유도해야 하며, 안전 정책의 수립과 이행에서는 전문가의 견을 적극적으로 반영해야 한다.

둘째, 중대사고 예방대책과 완화대책을 균형 있게 추진해야 한다. 후쿠시마 원전 사고 이후 중대사고가 발생한 다음의 대응 대책이 강조되는 것은 자연스럽고, 지금까지 상대적으로 소홀했던 부분을 보강한다는 측면에서도 중요하다. 그러나 원자력시설에서는 어디까지나 중대사고가 발생하지 않도록 예방하는 것이 더욱 중요함을 잊어서는 안 된다. 일단 중대사고가 발생한 후에는 아무리 잘 대처하더라도 사회·경제적으로 큰 영향을 피하기 어렵기 때문이다. 후쿠시마 원전 사고 후 특별히 강조되는 자연재해 대책도 중대사고 예방 관점에서 더욱 중요하다. 그런데도 중대사고를 완벽하게 예방하는 것은 불가능하므로, 현실적 중대사고에 대해 충분히 대비하고, 발생 가능한 최악의 상황에서도 사회적으로 감당할 수 있는 수준으로 억제하기 위한 최후 수단을 갖추어야 한다. 최악의 환경에서도 사용할 수 있는 원전 부지 내 또는 인근의 튼튼한 비상대응시설은 이런 관점에서 중요하다.

셋째, 한국은 국토가 좁고 다수기가 밀집된 원전이 대도시 인근에 위치하므로, 방사성물질이 대량으로 누출될 가능성을 실질적으로 제거하겠다는 자세가 필요하다. 방사능 대량 누출을 유발할 수 있는 사고 시나리오들을 확인하여 실질적인 억제 대책을 이행해야 한다. 방사성물질의 대량 누출을 막는 최후의 보루인 격납건물의 건전성 확보는 당연하고, 격납건물이 손상되지 않더라도 방사성물질이 외부로 누출될 수 있는 시나리오들에 대한 대책도 충분히 세워야 한다.



<그림 1> ‘올바른’ 일을 ‘제대로’

안전성 확보 방향을 좀더 함축적으로 표현하기 위해 2012년부터 필자는 최상의 과학기술에 기반하여 ‘올바른 일을 제대로 하자(Do the Right Things Right!)’라는 표현을 사용하고 있다(<그림 1> 참조). 원자력 안전에서 ‘올바른 일을 잘 찾아내는 것’과 ‘이를 제대로 해내는 것’이 모두 중요하다는 점을 나타내기 안성맞춤이었기 때문이다. 처음에는 제대로 이행하는 것에 더 초점을 맞추었는데, 최근에는 안전에 대한 논의에서 ‘올바른 일’의 중요성이 쉽게 무시되는 점을 더 우려하고 있다. 그리고 “원자력 안전은 과학기술적 문제가 아니고 신뢰의 문제”라는 주장이나 ‘안심’을 지나치게 강조하는 것도 경계할 필요가 있다. 그 뜻을 모르지는 않지만, 이를 지나치게 강조하다보면 안전 문제에 대한 실질적 해결보다 정치적 해법을 찾는 데만 몰두할 우려가 있기 때문이다.

후쿠시마 원전 사고 10주년을 전후한 다양한 논의가 우리 원전의 실질적인 안전성과 대외경쟁력을 높이는데 기여하기를 기대한다. **KIIF**