

최종보고서

후쿠시마 원전 사고 분석

- 사고내용, 결과, 원인 및 교훈 -



2013.03.11



시단별인 한국원자력학회 후쿠시마위원회

발 간 사

2011년 3월 11일 일본의 후쿠시마 제1원전에서 사고가 발생한 지 2년이 지났습니다. 초대형 지진과 쓰나미에 의해 비롯된 후쿠시마 사고는 일반 국민들뿐만 아니라 원자력 전문가들에게도 큰 충격을 주었습니다. 원전을 운영하는 국가들은 사고 직후부터 사고의 진행 과정과 원인을 파악하면서 교훈을 도출하고, 이를 바탕으로 자국 원전의 안전성을 강화하기 위한 다양한 대책을 마련하여 추진하고 있습니다. 우리나라도 가동 중 원전에 대한 안전 점검을 신속하게 실시하여 안전성을 확인하고, 추가적인 안전성 향상 대책을 수립하여 적극 이행하고 있습니다. 또한 국내 원자력 전문가들은 다양한 방법으로 사고에 대한 정보를 교환하면서 원전의 안전성 향상을 위하여 노력하여 왔고, 후쿠시마 사고와 관련된 국제 협력 활동에도 활발하게 참여하고 있습니다.

한국원자력학회는 사고가 발생한 일본에 가장 인접한 이웃 국가의 원자력 전문가 단체로서, 후쿠시마 원전 사고의 원인, 진행, 결과, 교훈 등을 객관적으로 조사·분석하기 위하여 2011년 11월 '후쿠시마 위원회'를 발족하였습니다. 위원회에는 50여 명의 연·산·학 전문가가 참여하여 전문분야별로 사고를 분석하고, 위원들 간의 반복된 토론을 통해 교훈을 도출하였습니다. 이 보고서는 후쿠시마위원회 활동의 가장 중요한 결실이라고 할 수 있으며, 초안은 이미 2012년 8월 학회 홈페이지 등을 통해 공개한 바 있습니다. 초안에 대한 다양한 의견과 그 이후에 전개된 상황을 반영하여 부분적으로 수정한 최종보고서를 후쿠시마 사고 2주년에 즈음하여 발행하게 되었습니다.

이 보고서는 후쿠시마 사고의 다양한 측면을 체계적으로 정리하고 원전의 안전성 향상을 위한 구체적인 방향을 제시하고 있습니다. 국내 전문가들의 다양하고 심도 있는 의견이 반영된 이 보고서가 독자들이 후쿠시마 원전사고를 정확하게 이해하는데 기여하고, 도출된 사고의 교훈과 안전성 향상 방안은 향후 원자력 안전정책을 수립하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대합니다. 아울러 앞으로 다양한 분야에서 후쿠시마 사고와 관련된 연구를 수행할 때 중요한 참고자료로 활용되기를 희망합니다.

후쿠시마 사고 후 더욱 바빠진 업무 속에서도 귀중한 시간을 내어 위원회 활동을 하면서 훌륭한 보고서를 만들어내신 학회 후쿠시마위원회 위원님들과 위원회를 발족하고 보고서를 감수해주신 전임 학회장님께 감사의 말씀을 드립니다.

2013년 3월 11일

(사)한국원자력학회장 정 연 호

머 리 말

2011년 11월 발족한 한국원자력학회 후쿠시마위원회(이하 ‘위원회’라 함)는 일본의 인접국 전문가 그룹으로서 사고의 다양한 측면을 객관적이고 과학적으로 조사·분석하여, 향후 관련 연구를 수행하거나 정책을 개발할 때 중요한 참고자료로 사용될 수 있는 독립적인 보고서를 발행하는 것을 핵심 목표로 정했습니다. 이를 위하여 총 50여명의 위원들이 사고 분석, 환경 영향, 비상 대응, 정책·제도 등 4개 분과를 구성하여 활동하였습니다.

위원회는 후쿠시마 사고에 대한 ‘상세보고서’와 ‘축약보고서’의 작성을 병행하였습니다. 상세보고서는 2012년 4월까지의 분과별 작업을 통해 총 500여 쪽에 달하는 초안을 마련하였으나, 사고에 대해 불확실한 정보가 많은 점을 고려하여 보고서 완성 작업을 당분간 연기하기로 하였습니다. 그 대신 축약보고서에 노력을 집중하기로 하고, 상세보고서 초안으로부터 핵심적인 내용을 간추리고, 위원들 간의 논의를 통해 사고의 교훈과 안전성 향상 방안을 도출하여 2012년 8월 말 초안을 공개하였습니다. 이 최종보고서는 여러 전문가들의 의견과 새롭게 입수된 정보를 반영하여 초안을 부분적으로 수정·보완한 것입니다.

후쿠시마 사고 후 2년이 지난 지금까지도 원전 내부로의 접근에 어렵기 때문에 사고의 진행과 결과에 대해 불확실한 점이 여전히 많습니다. 사고 초기에 알려졌던 것과는 다른 사실이 뒤늦게 드러나는 일도 있고, 자료들이 서로 일치하지 않거나 그대로 받아들이기 어려운 경우도 있습니다. 본 보고서에서는 2012년 말까지 입수된 정보들을 최대한 객관적으로 평가하려 노력하였으나, 부족한 부분이 여전히 많을 것입니다. 또한, 가치 판단이 필요한 일부 사안에 대해서는 위원들의 의견이 꼭 일치하지는 않는 경우도 있었음을 밝힙니다.

축약보고서 초안에 대해 많은 분이 격려의 말씀과 함께 수정·보완 의견을 보내주셨으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다. 보내주신 의견은 내부 토론을 거쳐 반영하였으며, 부족한 부분은 추후 주기적인 개정을 통해 보완해나갈 것을 약속드립니다.

이 보고서가 학회 회원을 비롯하여 후쿠시마 사고에 관심이 있는 분들이 사고를 이해하는데 도움을 드리고, 우리 원전의 안전성 향상에 조금이나마 기여할 수 있기를 희망합니다. 아울러 본업에 바쁜 가운데서도 위원회 활동에 적극적으로 참여해주신 모든 위원님들과 지속적인 격려를 보내주신 전·현직 학회장님을 비롯한 학회 회원님들께 깊이 감사드립니다.

2013년 3월 11일

(사)한국원자력학회 후쿠시마위원회 위원장

백 원 필 배

요 약

사고의 특징

2011년 3월 11일 14시 46분 발생한 규모 9.0의 동일본 대지진과 이로 인한 초대형 쓰나미는 2만 명 가까운 사망·실종자와 수십만 명의 이재민을 발생시켰을 뿐만 아니라, 후쿠시마 제1원전의 안전설비들을 크게 손상시켜서 대량의 방사성물질이 외부로 방출되는 대형 사고를 유발하였다. 후쿠시마 원전 사고는 원자로의 정지는 잘 이루어졌으나 정지 후에도 계속 발생하는 붕괴열의 제거에 실패하여 노심(핵연료)이 용융된 사고로서, 다음과 같은 핵심적인 특징을 갖는다.

① 후쿠시마 사고는 극한 복합 자연재해가 유발한 최초의 원전 중대사고이다. 1979년의 쓰리마일아일랜드(TMI) 사고나 1986년 체르노빌 사고와는 달리 외부 사건(극한 자연재해)과 설비 내부 문제 및 인적 인자가 모두 결합된 사고라고 할 수 있다. 이로 인해 모든 교류전원, 대부분의 직류전원과 최종 열제거 기능이 상실되었다.

② 다수 호기에서 중대사고가 발생하여 장기간 지속되었다. 같은 부지의 원자로 3기에서 각각 노심 용융이 대량으로 진행하였고, 원자로용기와 격납용기도 손상된 것으로 추정된다. 특히 3개 호기의 원자로건물이 수소가스 폭발로 크게 손상되었고, 사고가 수 개월간 지속되었으며, 사용후연료저장조의 안전 문제도 가시화되었다.

③ 대량의 방사성물질이 외부로 방출되어 토양 및 해양을 광범위하게 오염시켰다. 체르노빌 사고의 20% 수준의 방사성물질이 누출된 것으로 추정되는데, 비상 대피가 비교적 신속하게 이루어져서 직접적인 방사선 피폭으로 인한 사망자는 발생하지 않았다. 그러나 심각한 토양 및 해양 오염과 많은 수의 이재민 발생으로 국가·사회적 위기가 유발되었다.

사고의 근본 원인

후쿠시마 사고의 가장 근본적인 원인은 원전의 설계·건설·운영 과정에서 지진과 쓰나미가 빈발하는 일본 고유의 자연 환경 특성을 적절하게 고려하지 못한 데 있다. 심지어 건설 당시 적용된 지진 및 쓰나미 설계기준이 한국 원전에 대한 것들보다도 오히려 낮은 수준이었다. 원전 건설 후 일본 사회에서 대형 지진이 핵심적인 위협 요인으로 인식되면서 내진 성능 평가와 보강 작업을 적극적으로 추진하고 설계기준을 크게 강화하였다. 그러나 쓰나미에 대한 연구는 활발하지 않았고, 1990년대 이후 얻어진 새로운 연구 성과를 반영한 설비 보강에도 소극적이었다. 후쿠시마 원전에서 현실적인 쓰나미 조건을 고려하였다면 핵심 안전설비들의 위치를 변경하거나 침수에 대비한 설계를 보강함으로써 대응 능력을 크게 향상시킬 수 있었을

것이다.

아울러 안전에 중요한 의사 결정들이 최상의 지식에 근거하지 않고 안전에 대한 막연한 믿음과 자만에 근거하여 이루어진 측면이 강하다. 원전 건설 이후에도 세계 각국의 원전에서 얻어진 사고 및 운전 경험과 중요한 연구 성과들을 성실하게 반영하지 않으면서, ‘우리 원전은 안전하다’는 잘못된 믿음을 계속 강화시켜 온 것이다. 최신 또는 최상의 지식이 제대로 활용되지 않은 배경으로 산업체(전력회사, 원전 공급업체)와 규제기관이 일본 내의 관련 연구계 및 학계로부터 의도적으로 고립되어 있었다는 점도 간과할 수 없다. 이들은 상용가압경수로 및 비등경수로 기술을 완성된 기술로 간주하고 학계와 연구계 전문가들의 지식과 지혜를 잘 활용하지 않았던 것으로 판단된다.

한편, 경제산업성 산하 자원에너지청이 원자력 발전 산업을 담당하고, 그 산하의 원자력 안전·보안원(NISA)이 규제를 담당하는 체제였으므로, 보이지 않는 유착문화가 형성되어 엄격한 안전규제가 이루어지지 않았다. 아울러 정부부터 원자력 산업계에 이르기까지 적절한 안전문화가 정착하지 못했음을 과거의 여러 사건들로부터도 확인할 수 있다.

<표> 후쿠시마 사고의 교훈 요약

분 야	교 훈
[1] 안전 철학 및 확보체계	1-1) 원전 안전을 위한 심층방어 전략을 보완하고 강화시켜야 한다. 1-2) 원전 안전 목표에 인명손실 측면과 사회적 위기 측면이 함께 고려되어야 한다. 1-3) 방사선안전기준, 비상대피기준 등의 정비와 국제적 조화가 필요하다. 1-4) 규제기관의 독립성과 전문성이 매우 중요하다. 1-5) 안전에 대한 운영기관의 책임이 더 강조되고 관련 인프라가 강화되어야 한다.
[2] 중대사고 예방을 위한 설계 안전성	2-1) 자연재해에 대한 설계기준을 재검토하고 대응능력을 향상시켜야 한다. 2-2) 전원공급계통의 다양성과 신뢰성을 강화해야 한다. 2-3) 피동 안전성 및 최종 열제거기능 강화를 통해 붕괴열을 신뢰성있게 제거해야 한다. 2-4) 원전 설계 및 운영에서 리스크 정보를 더욱 적극적으로 활용해야 한다. 2-5) 사용후연료저장조의 안전특성을 재확인하고 강화할 필요가 있다.
[3] 중대사고 대처능력	3-1) 원전의 중대사고를 가정하고 현실적인 대응능력을 갖추어야 한다. 3-2) 극한적 중대사고 대응까지를 포함하여 원전 절차서들이 개선되어야 한다. 3-3) 사고 대응에 중요한 계측기 등 원전 상태 감시설비가 보강되어야 한다. 3-4) 사고 대응은 최상의 매뉴얼 구비와 함께 인간의 창의성에도 의존해야 한다.
[4] 비상대응 (방재) 체계	4-1) 비상대응시설을 포함하여 대형사고에 대비한 비상대응시스템을 강화해야 한다. 4-2) 방사선 감시체계, 신속한 방사능 확산·영향 평가, 작업자 선량 관리가 강화되어야 한다. 4-3) 원자력시설 사고에 대비한 의료대응체계가 준비되어야 한다. 4-4) 원전 사고에 대비한 소통체계가 강화되어야 한다. 4-5) 인접국가 원전 정보를 확보하고 사고 영향을 평가할 수 있어야 한다.
[5] 원자력 안전 기반	5-1) 원자력 안전문화가 체질화되고 독립적으로 평가되어야 한다. 5-2) 원자력 안전연구가 강화되고 성과가 공유되어야 한다. 5-3) 방사선에 대한 이해를 증진시키기 위한 노력이 강화되어야 한다.

사고가 발생하고 악화된 기술적인 배경으로는 초대형 쓰나미에 대한 무방비, 중대사고 대책의 미흡, 지진과 쓰나미에 의해 악화된 작업 환경, 사고 진행 과정에서의 부적절한 대응, 원자로 내부 상태에 대한 정보 부족, 다수 호기에서의 동시 중대사고 전개 등 다양한 요인을 들 수 있다. 전체적으로 보면 쓰나미 후의 운전원들의 대응에도 일부 아쉬운 부분이 있기는 하지만, 이보다는 안전에 대한 무지, 과신, 자만, 태만의 결과로 사전 대비가 크게 미흡했다고 할 수 있다.

사고의 교훈 및 안전성 향상 방향

후쿠시마 사고에 대한 분석 결과를 바탕으로 하여 ① 안전 철학 및 확보체계, ② 중대사고 예방을 위한 설계 안전성, ③ 중대사고 대처 능력, ④ 비상대응(방재) 체계, ⑤ 원자력 안전 기반 등 5개 분야에서 총 22개 항목의 교훈을 도출하였다.(<표> 참조)

도출된 교훈을 바탕으로 국내 원전의 안전성을 향상시키기 위한 기본 방향을 다음과 같이 도출하였다.

- ① 후쿠시마 사고 후 안전 점검을 통해 도출된 안전성 개선 대책을 포함하여 가동원전의 안전성 향상을 적극적으로 추진해야 한다.
- ② 2011년10월 새롭게 출범한 원자력안전위원회를 중심으로 안전규제의 독립성·전문성·효과성을 지속적으로 강화해야 한다.
- ③ 국제기준과 조화를 이루면서도 독자성을 갖는 안전 철학·목표·원칙·기준을 발전시켜야 한다.
- ④ 원전 안전과 관련하여 운영기관인 한국수력원자력(주)이 더 주도적인 역할을 해야 한다.
- ⑤ 후쿠시마 사고의 교훈과 최근의 연구 성과들을 반영하여 안전성을 더욱 향상시키는 신형 원전 개발 노력을 지속해야 한다.
- ⑥ 원자력 안전 연구를 강화하고, 안전에 중요한 의사 결정은 최상의 지식에 기반하여 이루어져야 한다.
- ⑦ 원자력 안전 문화가 모든 원자력 관련 기관과 종사자에게 확고하게 자리 잡아야 한다.
- ⑧ 원전 개발 및 운영에 있어서 리스크 정보의 활용이 확대되어야 한다.
- ⑨ 국제 협력을 더욱 강화하고 실효성을 높여야 한다.

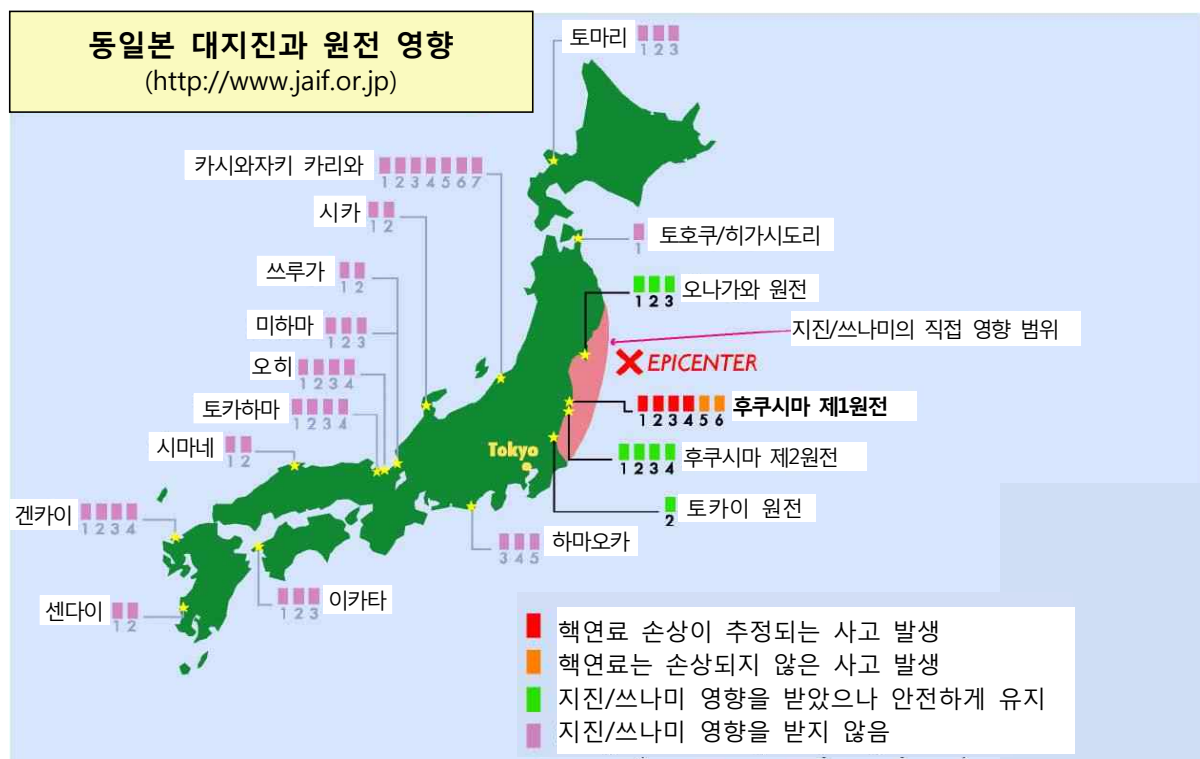
TMI 사고 후속조치를 통해 원전의 안전성이 크게 향상되었듯이, 후쿠시마 사고의 교훈을 충실하게 반영함으로써 새롭게 건설되는 원전은 물론 이미 가동 중인 원전들까지 포함하여 원전의 안전성을 지속적으로 향상시켜야 할 것이다.

목 차

1. 서 론	1
2. 후쿠시마 제1원전과 설계 특성	6
2.1 일반 사항	6
2.2 비등경수로 개관	8
2.3 후쿠시마 제1원전의 주요 설계 특성	13
3. 후쿠시마 사고 발생과 진행	21
3.1 동일본 대지진 및 쓰나미	21
3.2 후쿠시마 사고 발생과 진행	28
3.3 사고 확대 억제 및 안정화	53
3.4 향후 조치 계획	58
4. 환경 영향 및 비상 대응	60
4.1 방사성물질 방출 및 확산	60
4.2 사고 비상 대응	70
4.3 작업종사자 및 주민의 방사선 피폭	77
4.4 방사성 제염 활동	80
4.5 한국 내 영향	82
5. 사고의 원인과 교훈	84
5.1 사고 발생 및 악화의 주요 원인	84
5.2 후쿠시마 사고의 교훈	91
6. 결론 및 제안	109
6.1 결론	109
6.2 국내 원전의 안전성 향상을 위한 제안	110
7. 참고 문헌	113
(부록 A) 사용된 약어	116
(부록 B) 후쿠시마 사고 및 대응 조치 진행의 상세 시각표(Time-line)	119
(부록 C) 후쿠시마위원회 구성	137

1. 서 론

2011년 3월 11일(금) 14시 46분¹⁾ 일본 동북(東北, 도호쿠)지방의 미야기현(宮城縣) 동쪽 해저(진원 위치: 북위 38.1도, 동경 142.5도, 해저 깊이 24 km)에서 발생한 규모 9.0의 동일본 대지진²⁾은 그 자체로 상당한 피해를 유발했을 뿐만 아니라, 태평양 연안의 넓은 지역에 초대형 쓰나미(지진해일)³⁾를 유발함으로써 2만 명 가까운 사망·실종자와 수십만 명의 이재민을 발생시켰다. 인근 해안 지역에 있는 원자력발전소(원전)들도 그 영향을 받았으며, 특히 후쿠시마 제1원전⁴⁾에서는 원자로의 냉각 기능이 장기간 상실되어 대량의 방사성물질이 외부로 방출되는 대형 사고가 전개되었다.



<그림 1.1> 일본 원전 위치와 동일본 대지진/쓰나미의 영향[JAIF(2011)]

- 1) 이 보고서에서 사용하는 시간은 일본표준시간(JST)으로 한국표준시간(KST)과 같다.
- 2) 이 지진에 대한 일본어 공식 명칭은 '東北地方太平洋沖地震'이며, 영어로는 'The Tohoku District - off the Coast of Pacific Ocean Earthquake'로 표현되고 있다. 본 보고서에서는 의미 전달이 쉬운 '동일본 대지진'으로 표현한다.
- 3) '쓰나미(Tsunami)'는 '지진해일(地震海溢)'을 나타내는 일본어인 震波의 발음을 영어식으로 표현한 것이다. 영어권에서도 Tsunami라는 단어가 일반적으로 사용되는 것을 고려하여 본 보고서에서도 이 용어로 통일하였다.
- 4) 福島第一原子力発電所(Fukushima Daiichi Nuclear Power Station)

동일본 대지진 발생 당시, 일본에는 총 54기⁵⁾의 운전 가능한 상업용 원전이 있었다. 이 중에서 대지진의 영향을 직접 받은 원전은 진앙(震央)에서 가까운 순서로 미야기현의 오나가와(女川) 원전(3기), 후쿠시마현(福島縣)의 후쿠시마 제1원전(6기) 및 후쿠시마 제2원전(4기), 이바라키현(茨城縣)의 도카이(東海) 제2원전(1기) 등 총 14기이다(그림 <1.1> 참조). 이 중에서 후쿠시마 제1원전 4,5,6호기는 핵연료 교환 및 정기 점검 등을 위해 가동이 정지된 상태였고, 정상 운전 중이던 나머지 11기는 지진 발생 직후 원자로 운전이 자동으로 정지되었다. 일본의 다른 지역에서 운전 중이던 원전들은 지진 후에도 운전을 계속한 것으로 알려졌다.

원자로(Nuclear Reactor)는 정지된 후에도 상당한 수준의 붕괴열(Decay Heat)⁶⁾이 계속 발생하므로 지속적인 냉각이 필요하다. 여기에 필요한 교류(Alternating Current; AC) 전기는 일차적으로 외부 전력망으로부터 공급되고, 이것이 원활하지 않을 때에는 원전마다 설치된 비상 디젤발전기(Emergency Diesel Generator; EDG)들이 작동하게 되어 있다. 후쿠시마 제1원전의 경우, 지진 직후 외부 전력망은 완전히 붕괴하였지만, 비상 디젤발전기들이 성공적으로 작동하고 다른 안전설비들도 필요한 기능들을 수행함으로써 원자로들이 안전하게 냉각되고 있었다.

그러나 지진 후 40~50분이 지난 15시 27분과 15시 35분에 두 차례의 대형 쓰나미가 들이닥쳐서(최대 파고 14~15 m 추정) 전기 공급 시설과 냉각 관련 설비들을 크게 훼손했다. 후쿠시마 제1원전에는 총 13대의 비상 디젤발전기가 설치되어 있었는데, 15시 42분경에 이르자 6호기의 1대(공랭식)를 제외하고 모두 기능을 상실하여, 1~4호기는 교류전원 완전상실(Station Blackout; SBO) 상태가 되었다. 살아남은 공랭식 비상디젤발전기 1대는 전력시스템이 서로 연결된 5호기와 6호기에 교대로 전기를 공급하였다. 그리고 호기에 따라 시간적인 차이는 있으나, 축전지(Battery)에 의한 직류(Direct Current; DC) 전기 공급조차도 축전지 또는 배전반 침수 등으로 거의 모두 상실하여, 발전소 상태의 파악이 어려워지고 밸브 개방 등의 안전 조치를 신속하게 취할 수도 없었다. 결과적으로 3기의 원자로에서 핵연료가 대량 용융되고 원자로건물에서 대형 수소가스 폭발⁷⁾이 3차례나 일어나는 중대사고⁸⁾가 발생하였

5) 노형 구성은 비등경수로(Boiling Water Reactor; BWR)형 30기와 가압경수로(Pressurized Water Reactor; PWR)형 24기이다. 노형별 특징에 대해서는 제2장에서 설명한다.

6) 원자로 정지(Reactor Trip 또는 Reactor Shutdown)는 원자로 내에서 핵분열 반응이 멈추는 것을 의미한다. 그런데 원자로에서는 핵분열 반응이 멈추더라도, 운전 과정에서 (핵)연료봉 안에 축적된 많은 양의 방사성물질이 방사선을 내면서 발생하는 ‘붕괴열’(또는 ‘잔열’이라고도 함)의 양이 상당하기 때문에 지속적인 냉각이 필요하다. 붕괴열은 원자로 정지 직후에 정상출력의 약 7% 수준이고, 3시간 후 약 1%, 1일 후 약 0.5%, 6개월 후 약 0.1% 수준으로 감소한다.

7) 수소가스 폭발(Hydrogen Explosion)은 수소가스의 농도가 4% 이상 도달하고 주변에 산소가 5%이상 존재할 때 발생할 수 있는 폭발 현상이다. 원전 사고 시 연료봉의 온도가 매우 높아지면 핵연료를 둘러싼 피복재와 고온의 수증기가 반응하여 상당한 양의 수소가스가 생성될 수 있다. 원전에서의 수소가스 폭발은 산업 현장에서 간혹 발생하는 수소가스 폭발과 같은 현상으로, 수소폭탄의 폭발과는 전혀 다르다.

8) 일반적으로 원전에서의 중대사고(Severe Accident)는 원자로 출력 제어 또는 냉각에 실패하여 핵연료가 대량으로 손상되거나 녹아내리는(용융) 사고를 가리킨다.

으며, 사용후연료저장조(Spent Fuel Pool; SFP)⁹⁾ 내에 보관 중이던 사용후연료의 안전성도 상당 기간 위협받았다. 이에 따라 체르노빌 사고 시의 20% 수준¹⁰⁾으로 추정되는 대량의 방사성물질이 방출되어 대기, 토양 및 해양을 광범위하게 오염시켰으며, 방사선 피폭에 의한 피해를 예방하기 위해 10만여 명의 지역 주민이 대피하였다.

후쿠시마 제1원전은 사고 발생 약 1주 후부터 최악의 상황을 벗어나기 시작하여, 약 2주 후부터는 진정 국면에 진입하였다. 사고 직후의 긴박한 상황에는 바닷물(해수) 주입을 통한 냉각을 피하다가 점차 담수(보통의 물; Fresh Water) 주입으로 전환하였고, 2011년 중반에 냉각수 순환 기능이 차례로 작동하면서 원자로와 사용후연료저장조를 냉각할 수 있었다. 방사성물질의 추가 방출을 최소화하고 오염을 제거하기 위한 노력도 계속되었으며, 일본 정부는 2011년 말까지 사고 원전들의 안전 유지에 필요한 최소한의 조치가 취해진 것으로 판단하고, 장기적인 수습계획을 마련하여 추진 중이다.

후쿠시마 사고 초기에는 신뢰할만한 정보의 부족 문제가 심각하였다. 대부분의 국가는 후쿠시마 원전에 대한 기초 정보가 매우 부족한 상황이었으나, 사고에 대해 긴박하게 대응하던 동경전력(TEPCO)이나 원자력안전·보안원(NISA) 등 정부기관이 제공하는 정보는 매우 제한적이었다. 국제원자력기구(IAEA) 등을 통해 입수되는 자료들도 피상적인 경우가 많았으며, 평소 가동 원전에 대한 관심이 낮았던 일본 학계 및 연구계의 전문가들로부터도 언론 보도 이상의 정보를 얻기 어려웠다.

그러나 2011년 4월 초부터는 사고를 비교적 체계적으로 정리한 자료들이 발표되었다. 특히, 일본정부가 2011년 6월 각료급 IAEA 회의를 앞두고 제출한 약 380쪽의 보고서[NERHQ(2011a)]는 그때까지 확인된 사항을 중심으로 사고에 대해 상세하게 기술하였으며, 2011년 9월에는 약 900쪽에 달하는 2차 보고서[NERHQ(2011b)]가 제출되었다. 또한, 일본정부가 구성한 ‘동경전력 후쿠시마원전사고 조사·검증위원회’의 중간보고서[ICANPS(2011)]가 2011년 12월 발표되었고, 동경전력(주)과 원자력안전·보안원에서도 각각 사고에 대한 분석 자료들을 웹사이트를 통해 공개하였다. 이 밖에도 사고 원인 및 진행과 교훈에 대한 다양한 보고서들이 세계 각국으로부터 발표되고 있다. 많은 참고 문헌은 다양한 정보와 견해를 담는다는 측면에서는 바람직하지만, 사실관계가 잘못된 예도 있으므로 인용할 때 주의가 필요하다.

후쿠시마 사고는 원자력 개발·이용에서 확고한 안전성의 확보가 필수적인 전제조건이라는 평범한 진리를 다시금 일깨워주었다. 국내외적으로 원전 안전 관리 능력에 대한 의구심과

9) 사용후연료저장조는 사용후연료(Spent Fuel), 즉 원자로에서 사용되고 난 핵연료를 수년 동안 저장하기 위한 수조를 말한다. 수조의 물은 사용후연료의 붕괴열을 제거하고 방사능을 차폐하는 역할을 한다. 사용후연료저장조에는 사용후연료뿐만 아니라, 원자로에 장전되기 전의 새 핵연료와 원자로에서 사용 중인 연료(핵연료 교환 시)도 저장된다.

10) 방사성물질 누출량 평가에는 아직 불확실성이 크며, 국제적인 공감대를 이루기까지는 시간이 걸릴 것으로 예상된다.

원자력 이용에 반대하는 목소리가 커지고, 원자력 시설들에 대해서는 더욱 엄격한 안전성의 입증과 실질적이고 가시적인 안전성 향상 조치가 요구되고 있다. 앞으로 유사한 사고가 재발하지 않으려면, 사고의 원인과 진행 과정 및 결과를 철저하게 분석하고, 이로부터 얻어진 교훈을 원자로 개발·운영과 안전 규제, 안전 연구 등에 충실하게 반영하는 것이 필수적이다.

후쿠시마 사고 이후 한국의 대응은 크게 세 방향으로 진행되었다. 첫째는 정부의 공식 활동으로서, 사고가 한국에 직접 미치는 영향을 파악하여 피해를 예방하고, 국내 원자력 시설의 안전성을 확인하고 강화하기 위한 활동이었다. 대기 중 방사능의 측정 강화 및 공개, 원자력시설 안전점검 및 개선사항 도출, 공항 및 항만 입국자 방사능 검사, 식품 방사능 검사 등이 대표적이다. 두 번째는 사고를 정확하게 이해하기 위한 전문가 활동으로서, 국내의 여러 전문가들은 사고 원전 정보, 사고 전개 과정, 예상되는 사고 영향 및 국내 파급효과 등을 분석하면서 정보를 공유하였다. 특히 한국원자력연구원과 KAIST는 3월 말과 4월 중순에 각각 사고 분석 보고서를 발행한 바 있다[KAERI(2011), KAIST(2011)]. 세 번째는 사고 관련 정보를 국민과 언론에 정확하게 알리기 위한 노력이었는데, 정부 차원의 공식적인 발표와 함께 다양한 전문가들이 언론, 타 분야 전문가, 대중들과 접촉하면서 적극적인 활동을 전개하였다. 그러나 수소가스 폭발 장면과 폭발 후 손상된 원자로건물의 모습을 TV로 지켜보면서 심각한 공포감을 갖게 된 국민들에게는 정부와 전문가의 설명이 잘 받아들여지지 않았다. 부정확하거나 확인되지 않은 정보들이 다양한 매체를 통해 광범위하게 유포되었고, 대중과 전문가 모두에게 고통스럽고 혼란스런 시간이 상당 기간 지속되었다.

한국원자력학회는 후쿠시마 사고의 원인, 진행, 결과 및 교훈에 대한 객관적이고 과학적인 조사·분석을 수행하여, 사고에 대한 정확한 이해를 돕고 국내외 정책 수립·추진과 과학기술 및 인문사회 분야의 후속 연구에 기여하고자 ‘후쿠시마 위원회’를 구성하여 2011년 11월부터 운영하였다. 위원회는 사고 분석, 환경 영향, 비상 대응, 정책·제도 등 4개 분과에 50여 명의 연·산·학 전문가로 구성되었다. 위원회는 사고의 원인, 진행, 결과 및 교훈을 상세하게 기술하는 ‘상세보고서’와 핵심적인 내용을 정리하는 ‘축약보고서’ 등 두 종류의 보고서를 작성하기로 결정하였다. 상세보고서는 2012년 4월까지 분과별 작업을 통해 총 500여 쪽에 달하는 초안을 마련한 후 최근 입수되고 있는 사고 정보를 반영하면서 계속 보완 중인데, 최종 완성까지는 상당한 시간이 필요할 것으로 판단된다. 본 보고서는 축약 보고서로서 상세보고서 초안을 바탕으로 핵심적인 내용을 간추리고, 위원들 간의 논의를 통해 사고의 교훈과 안전성 향상 방안을 도출하였다.

위원회는 일본 정부의 공식적인 자료, 즉 ‘원자로재해대책본부(Nuclear Emergency Response Headquarters; NERHQ)’와 ‘후쿠시마원전사고 조사·검증위원회(Investigation Committee)’의 자료를 일차적으로 활용하고, 원자력안전·보안원, 동경전력 및 일본원자력산

업협회(JAIF)의 홈페이지에 공지된 자료들을 보완적으로 이용하였다. 한편, 사고의 원인 및 교훈 등에 대해서는 다양한 자료들을 참고하고 내부 토의를 거쳐 기술 내용을 결정하였다.

본 보고서의 제2장에서는 후쿠시마 제1원전에 대한 일반적인 사항과 기술적인 특성을 소개한다. 제3장에서는 사고의 발생과 진행 및 복구 과정을 최대한 사실적으로 재구성하고, 중요한 기술적 배경을 논의한다. 제4장에서는 방사성물질 방출·확산 및 영향과 비상 대응 조치를 소개하고, 당시의 한국 상황에 대해서도 간단하게 다룬다. 제5장에서는 사고 발생 및 악화의 핵심 원인을 논의하고, 사고로부터 도출될 수 있는 일반적인 교훈들을 제시한다. 마지막으로 제6장에서는 후쿠시마 사고의 핵심 특성을 정리하고, 국내 원전의 안전성 향상을 위해 필요한 사항들을 제시한다. 부록에서는 주요 약어, 시간별 사고 진행 및 복구 조치, 후쿠시마 위원회 구성 등을 소개하고 있다. 이 보고서는 축약보고서이긴 하지만, 후쿠시마 사고와 관련하여 중요한 기술적 내용과 교훈을 충실하게 담으려고 노력하였다. 용어의 선택에도 주의를 기울였으며, 필요할 경우 각주를 사용하여 본문에서 직접 설명하기 어려운 내용을 보완하였다.

2. 후쿠시마 제1원전과 설계 특성

2.1 일반 사항

후쿠시마 제1원전은 총 6기의 비등경수로(BWR)¹¹⁾로 구성된 동경전력(TEPCO) 소유의 원전으로서, 일본 동북(토호쿠)지방 후쿠시마현의 태평양 쪽 해변에 위치하고 있다. 일본 수도인 도쿄로부터 북동쪽으로 약 250 km 거리이며, 동일본 대지진의 진앙으로부터는 남서쪽으로 약 180 km 거리이다. 한편, 후쿠시마 제2원전은 제1원전으로부터 남쪽으로 약 12 km 떨어져 있다. 후쿠시마 원전과 동일본 대지진의 진앙 및 도쿄와의 상대적인 위치는 <그림 1.1>에서 알 수 있다.

<표 2.1>은 후쿠시마 제1원전 각 호기의 전반적인 정보를 요약하고 있다. 원자로형은 미국의 General Electric(GE)사가 1960년대부터 개발한 BWR-3, BWR-4 및 BWR-5이며, 건설 당시의 주 계약업체는 GE, 도시바 또는 히타치였다. 한편, 평균 해수면과 비교한 원전 부지의 높이는 1~4호기가 약 10 m, 5~6호기가 약 13 m인데, 5~6호기가 심각한 위기 상황으로 진입하지 않고 안정된 것은 부지의 높이와도 깊은 관계가 있다. <그림 2.1>은 사고 전 후쿠시마 제1원전의 전경 사진이며, <그림 2.2>는 발전소 내 주요 시설들의 배치를 보여준다.

<표 2.1> 후쿠시마 제1원전 개요[TEPCO(2012)]

호기	노형	전기 출력 (MWe)	열출력 (MWt)	격납 용기	건설 착수	상업 운전	주계약자	지진 발생 시 상태	
								원자로 운전	핵연료집합체 수 원자로 저장조*
1호기	BWR-3	460	1380	Mark-I	'67.04	'71.03	GE	전 출력 운전	400 292+100
2호기	BWR-4	784	2381	Mark-I	'69.01	'74.07	GE/ 도시바	전 출력 운전	548 587+28
3호기	BWR-4	784	2381	Mark-I	'70.08	'76.03	도시바	전 출력 운전	548 514+52
4호기	BWR-4	784	2381	Mark-I	'72.09	'78.10	히타치	정지	0 1331+204
5호기	BWR-4	784	2381	Mark-I	'71.12	'78.04	도시바	정지	548 946+48
6호기	BWR-5	1100	3,293	Mark-II	'73.05	'79.10	GE/도시바	정지	764 876+64
사용후연료 공용 저장조**								-	- 6,375+0

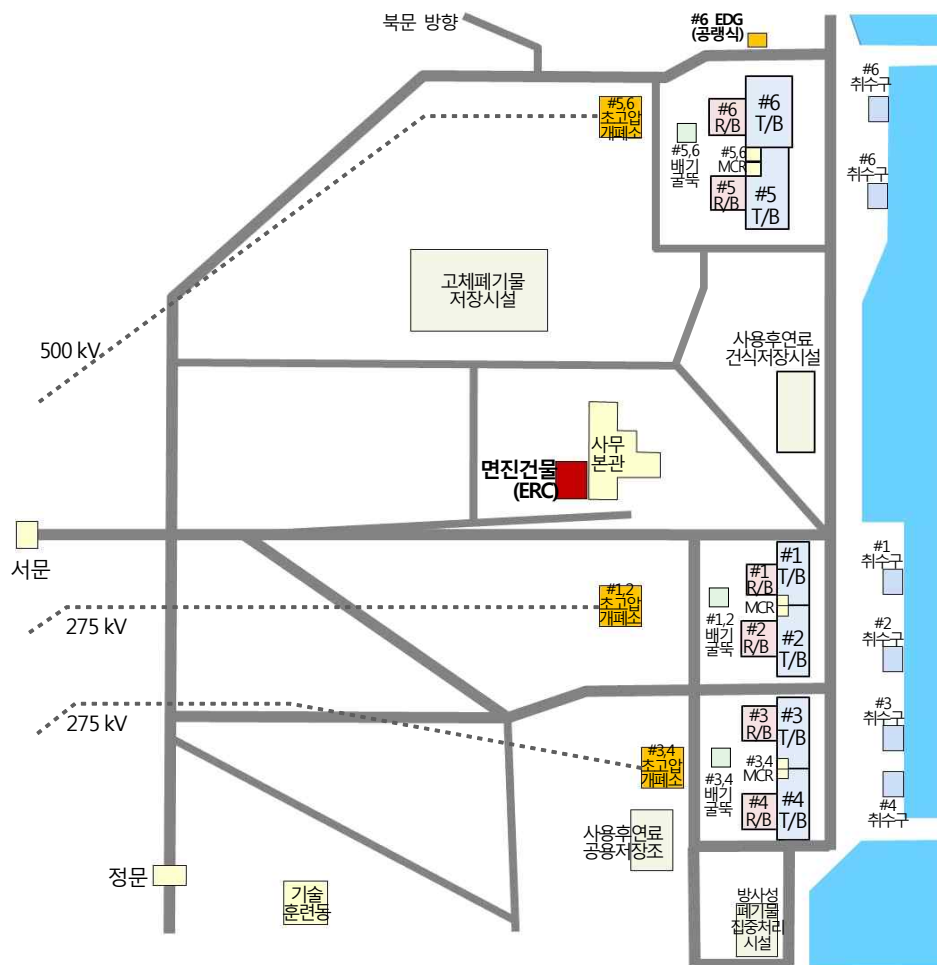
* 원자로건물의 격납용기보다 높은 곳에 있는 사용후연료저장조에는 사용후연료와 새로운 연료가 함께 보관됨. 앞 숫자는 사용후연료 집합체의 수, 뒤 숫자는 사용되지 않은 새로운 연료 집합체의 수임

** 사용후연료는 일단 각 원자로건물 내의 저장조에서 19개월 이상 냉각한 후 공용 저장조로 이동하여 저장함. 여기서 충분히 냉각된 사용후연료는 건식 저장시설에 보관하거나 로카슈무라 재처리시설로 이송함.

11) 비등경수로에 대해서는 다음 절에서 자세히 설명한다.



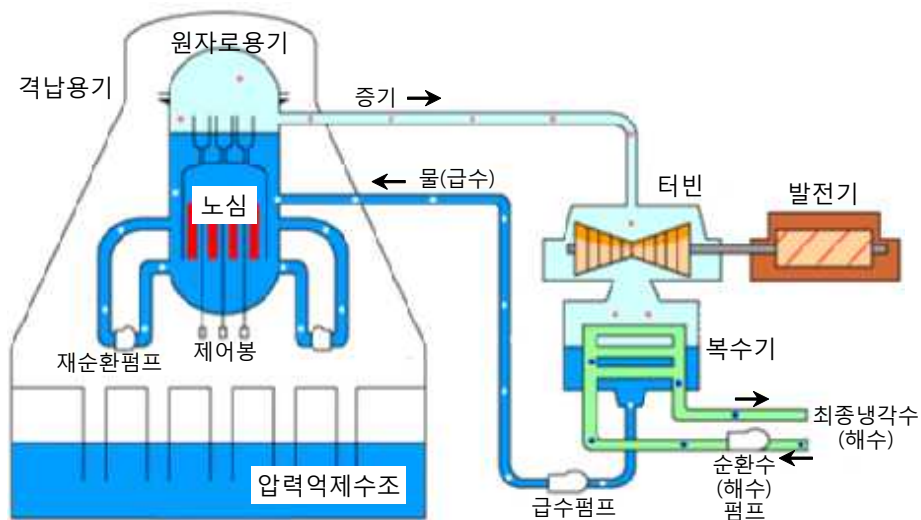
<그림 2.1> 사고 이전의 후쿠시마 제1원전 전경[NISA/JNES(2011)]



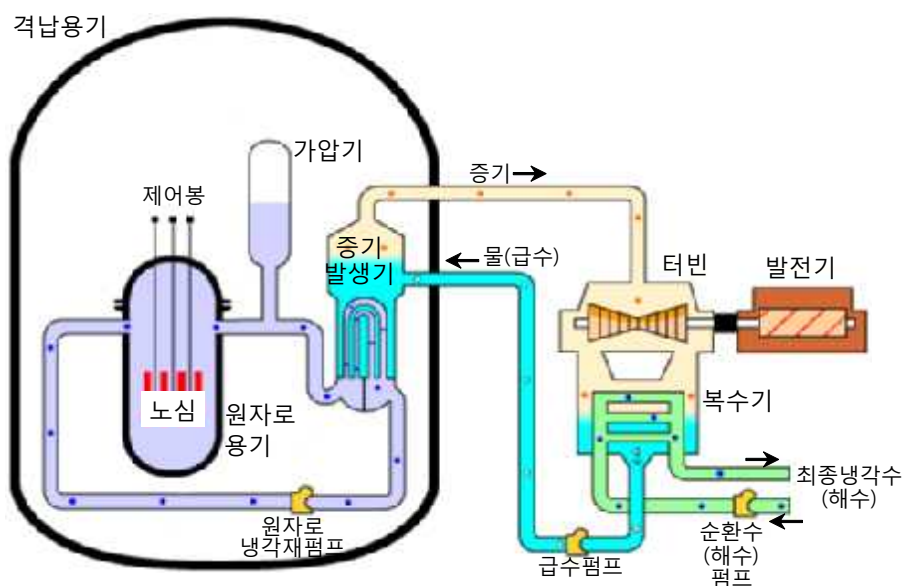
<그림 2.2> 후쿠시마 제1원전의 주요 시설 배치[TEPCO 웹사이트, ICANPS(2011)]

2.2 비등경수로 개관

비등경수로(BWR)는 1950년대에 미국 GE사가 처음 개발한 발전용 원자로이다. 원자로 내부에서 물이 끓어서(비등) 증기가 만들어지고, 이 증기가 직접 터빈 발전기를 돌려 전기를 생산한다. <그림 2.3>은 BWR의 기본 개념을 국내의 주요 원자로형인 가압경수로(Pressurized Water Reactor; PWR)와 비교하고 있다.



<비등경수로(BWR)의 기본 구성>



<가압경수로(PWR)의 기본 구성>

<그림 2.3> 비등경수로(BWR)의 기본 개념 및 가압경수로와의 비교

PWR은 원자로 압력을 150기압 이상으로 크게 높여서 원자로용기 안에서는 물이 끓지 않도록 하고 증기발생기에서 터빈 구동에 필요한 증기를 간접적으로 생산하는 반면, BWR은 원자로 압력을 70기압 수준으로 낮추고 증기를 직접 생산한다. <표 2.2>는 비등경수로의 기본적인 설계 특성을 요약하고 있다. 보통의 물(경수)이 냉각재¹²⁾와 감속재¹³⁾의 기능을 동시에 하며, 1~2년 동안 핵연료를 교체하지 않고도 원자로를 연속 운전할 수 있도록 저농축 우라늄¹⁴⁾을 연료로 사용한다. 중성자를 흡수하여 핵분열을 조절하는 화학물질을 포함하는 제어봉들은 일반적으로 십자형 단면의 모양을 갖고 있으며, 원자로용기 하부에 설치된 구동장치가 제어봉들의 원자로 내 위치를 변화시켜서 원자로 출력을 제어한다.

<표 2.2> 비등경수로(BWR)의 기본 설계 특성

주요 변수		설계 특성
중성자 에너지		열(저속)
냉각재	종류	H ₂ O(포화비등)
	최고온도(°C)	~ 285
	압력(MPa)	~ 7.0
감속재		H ₂ O(냉각재와 동일)
발전 사이클		직접 사이클
연료 증식 특성		전환로
핵연료	화학 조성	UO ₂
	농축도	2~3% U ²³⁵ in U ²³⁸
연료봉 피복재		지르코늄합금(Zircaloy)
핵연료 평균 연소도(MWD/MTU)		25,000~40,000
출력 밀도(kW/l)		~ 50
비출력(kW/kg-U)		~ 20
열효율(%)		30~35

12) 냉각재(Coolant): 원자로에서 핵분열이 일어나는 노심(즉, 핵연료)에서 열을 제거하여 냉각시키는 물질

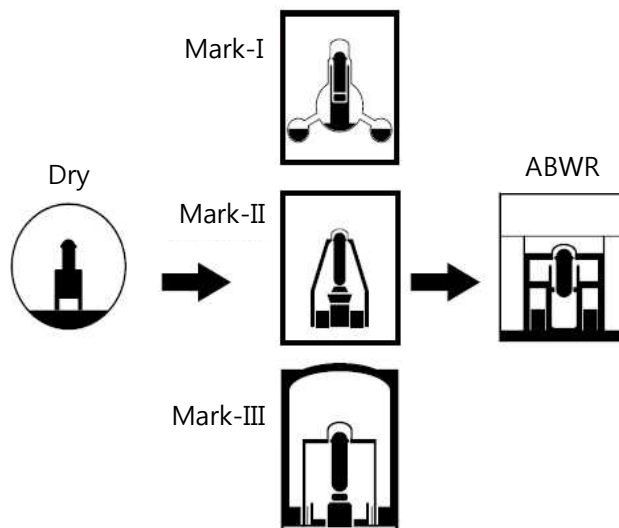
13) 감속재(Moderator): 핵분열에서 나오는 중성자들의 속도를 낮추어 다음 핵분열 반응을 더 효율적으로 일으키도록 하는 물질

14) 우라늄은 자연 상태로 존재하는 원소들 중에서 가장 무거운 원소이다. 우라늄 원자핵에는 양성자 수가 92개 들어있으므로 원자번호가 92이다. 중성자 수는 달라질 수 있는데, 143개인 우라늄-235(U-235)와 146개인 우라늄-238(U-238) 등이 존재한다. 여기서 235, 238 등은 양성자 수와 중성자 수를 합한 값이다. 천연 우라늄에는 U-238이 99.3%, U-235가 0.7% 존재하는데, 핵분열을 잘 일으키는 U-235의 비중을 높이는 것을 농축이라 한다. PWR과 BWR은 농축도(U-235의 비율)가 2~5% 수준인 저농축 우라늄을 연료로 사용한다.

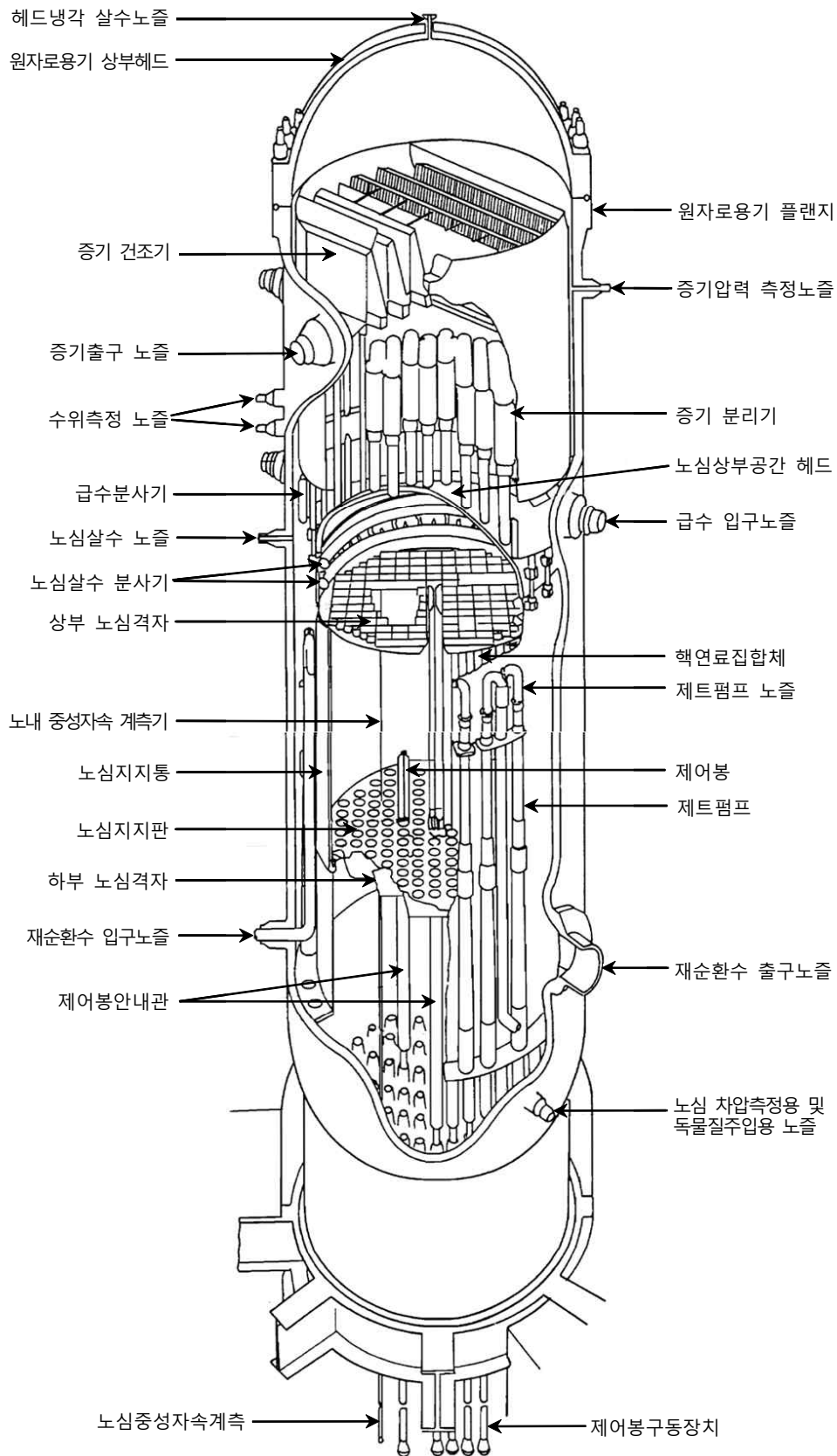
1960년대 이후 기본적인 설계 특성에 큰 변화가 없었던 PWR과는 달리, BWR 원자로와 격납용기(Primary Containment Vessel; PCV) 설계에는 중요한 변화가 수차례 있었다. BWR 설계가 변화되어온 과정과 격납용기 설계의 변화 과정을 <표 2.3>과 <그림 2.4>에 요약하였다. <그림 2.5>와 <그림 2.6>은 각각 BWR-3 또는 BWR-4 원자로와 Mark-I 격납용기의 전형적인 구조를 보여준다.

<표 2.3> GE 비등경수로 설계의 변화 과정[GE(2006), USNRC(xxxx)]

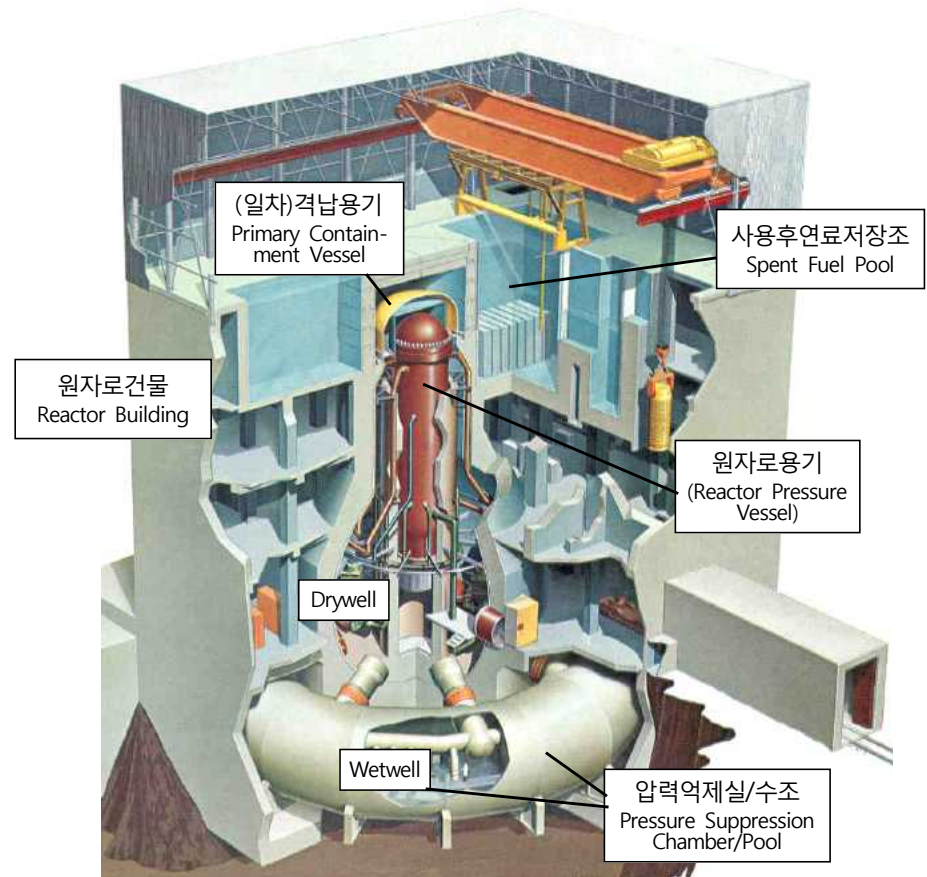
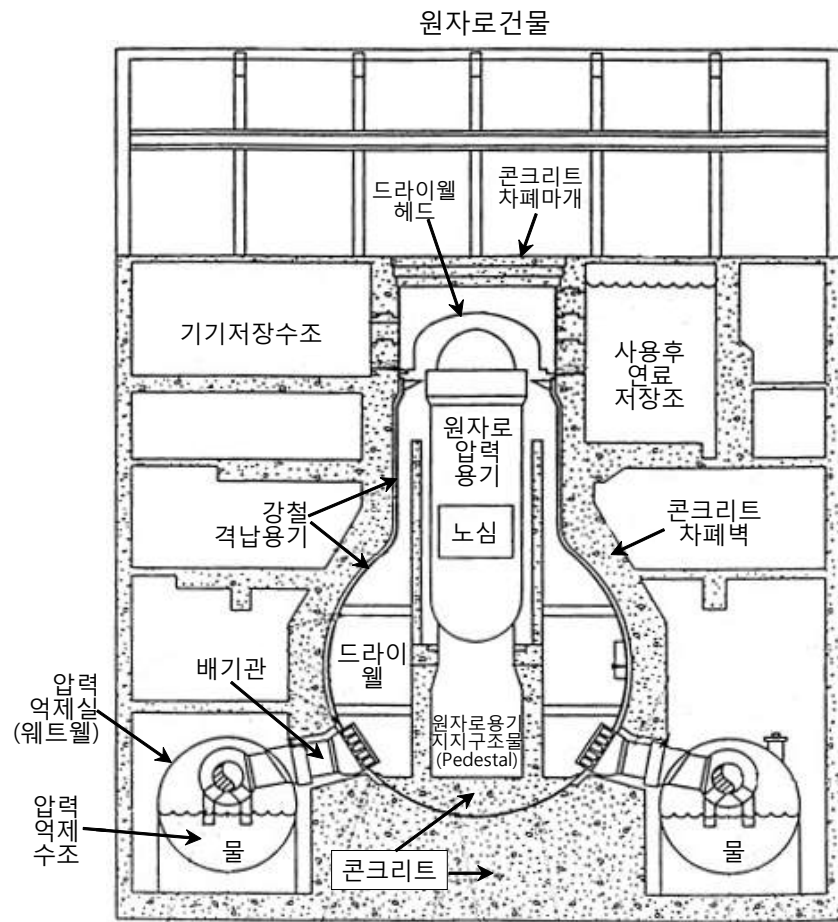
타입	첫 상업운전	대표적 원전	핵심 특징
BWR-1	1960	Dresden 1	• 최초의 상용 규모 BWR
BWR-2	1969	Oyster Creek	• 경제적 관점에서 원전 구매 이루어짐 • 대형 직접 사이클 원전
BWR-3	1971	Dresden 2	• 제트 펌프 최초 사용 • ECCS 설계 개선: 살수 및 충수 능력
BWR-4	1972	Vermont Yankee	• 출력밀도 증대(20%)
BWR-5	1977	Tokai 2	• ECCS 설계 개선 • 밸브 유량 제어
BWR-6	1978	Cofrentes	• 콤팩트 제어실 • 반도체 이용 원자로 제어 계통
ABWR	1996	Kashiwazaki-Kariwa 6	• 원자로용기 내부 재순환 펌프 • 정밀구동 제어봉구동장치 • 개량 제어실, 디지털 반도체 마이크로프로세서 • 광섬유 데이터 통신 / 멀티플렉싱 • 핵연료집합체 수 증대 • 티타늄 사용 복수기 • ECCS 개선: 고압/저압 Flooder



<그림 2.4> BWR 격납용기 설계 개념의 변화[GE(2006)]



<그림 2.5> 비등경수로(BWR-3/4) 원자로용기 내부의 구조[ICANPS(2011)]



<그림 2.6> Mark-I 격납용기 및 원자로건물(RB) 구조[USNRC 자료 등]

2.3 후쿠시마 제1원전의 주요 설계 특성

가. 공통 사항

후쿠시마 제1원전 각 호기의 일반적인 설계 변수들을 <표 2.4>에 요약하였다. 심각한 사고가 진행된 1~4호기 중에서 1호기는 BWR-3, 2~4호기는 BWR-4 설계이다. 이들은 모두 <그림 2.6>에서 보는 바와 같은 Mark-I 격납용기를 채택하고 있다. 다른 안전계통은 BWR-3와 BWR-4 간에 약간의 차이가 있다. 여기서는 사고가 가장 빠르게 진행된 1호기(BWR-3)의 안전계통에 대해 우선 설명한 후, BWR-4인 2~4호기에 대해 설명하고자 한다.

<표 2.4> 후쿠시마 제1원전 각 호기 개관[TEPCO(2012a)]

구 분		1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기	
주요 데이터	전기출력(MWe)	460	784				1,100	
	건설 착수	1967/9	1969/5	1970/10	1972/9	1971/12	1973/5	
	상업운전 개시	1971/3	1974/7	1976/3	1978/10	1978/4	1979/10	
	원자로형	BWR-3	BWR-4				BWR-5	
	격납용기 형태	Mark-I					Mark-II	
	주계약자	GE	GE/도시바	도시바	히타치	도시바	GE/도시바	
	일본 국내 공급률(%)	56	53	91	91	93	63	
원자로	열출력(MWt)		1,380	2,381			3,293	
	핵연료집합체 수		400	548			764	
	핵연료집합체 길이(m)		약 4.35	약 4.47				
	제어봉 수		97	137			185	
	원자로 용기 (RPV)	내경(m)	약 4.8	약 5.6			약 6.4	
		높이(m)	약 20	약 22			23	
		무게(톤)	440	500			750	
	격납 용기 (PCV)	높이(m)	약 32	약 33		약 34		약 48
		원통부 직경(m)	약 10	약 11			약 10(상부)	
		구형부 직경(m)	약 18	약 20			약 25(바닥)	
		수조 냉각수량(톤)	1,750	2,980			3,200	
증기 터빈	회전 수(rpm)		1,500					
	증기 온도(°C)		282					
	증기 압력(MPa)		6.65					
핵연료	형태		UO ₂ (3호기는 MOX 연료 일부 사용)					
	우라늄 양(톤)		69	94			132	

<표 2.5> 후쿠시마 제1원전의 안전계통

구 분	1호기(BWR-3)	2~5호기(BWR-4)
격납용기	MARK-I 형	MARK-I 형
원자로 정지	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉 • 대기 액체제어계통(SLC) 	<ul style="list-style-type: none"> • 제어봉 • 대기 액체제어계통(SLC)
고압 냉각 또는 안전주입	<ul style="list-style-type: none"> • 고압냉각수주입계통(HPCI) • 격리응축계통(IC) 	<ul style="list-style-type: none"> • 고압냉각수주입계통(HPCI) • 노심격리냉각계통(RCIC)
저압 안전주입	<ul style="list-style-type: none"> • 노심살수계통(CS) 	<ul style="list-style-type: none"> • 저압냉각수주입계통(LPCI) • 노심살수계통(CS)
원자로 감압	<ul style="list-style-type: none"> • 안전감압계통(ADS) 	<ul style="list-style-type: none"> • 안전감압계통(ADS)

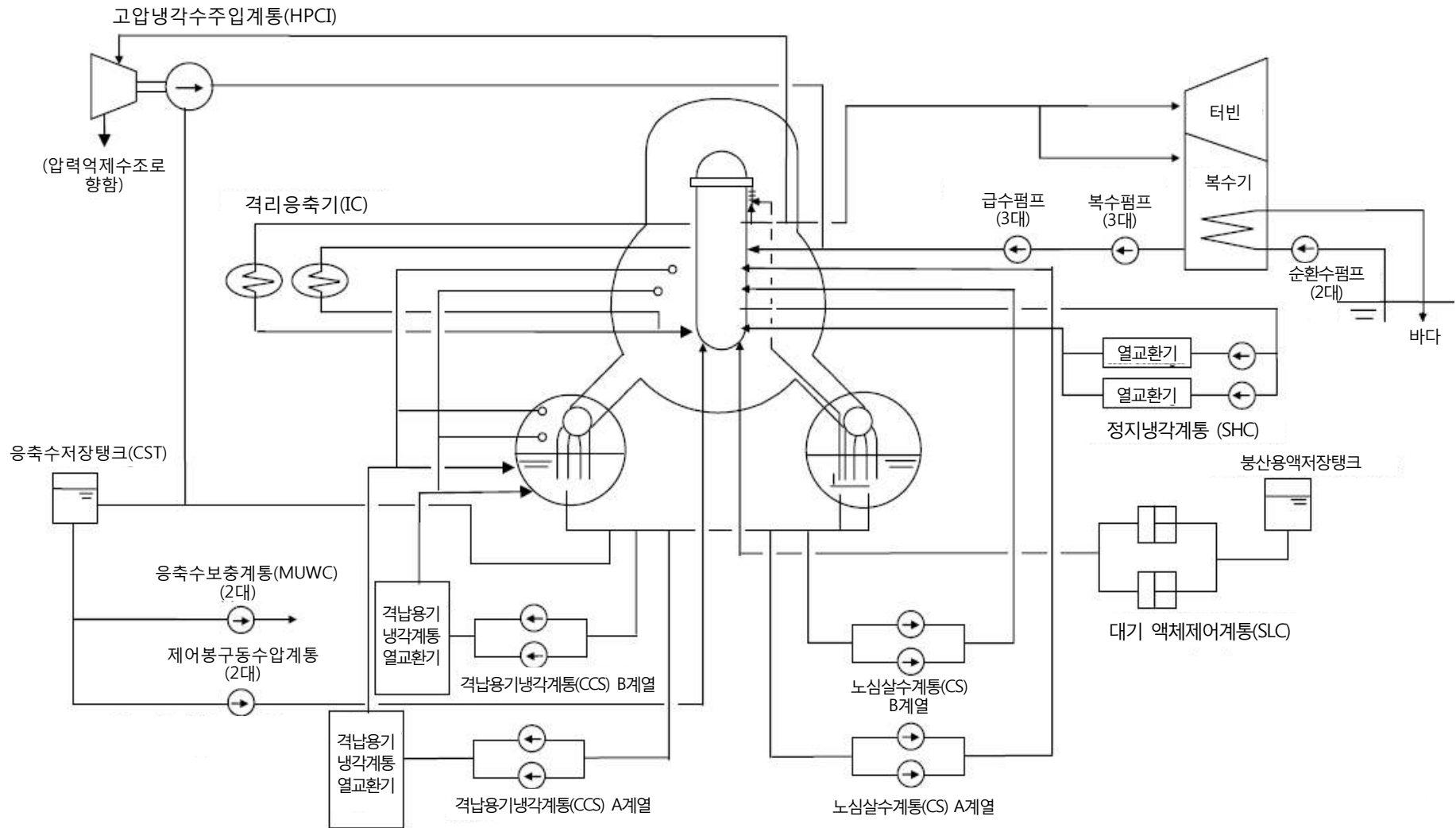
나. 1호기(BWR-3)의 안전 계통

BWR-3의 원자로계통과 핵심 안전계통의 구성은 <그림 2-7>에 나타나 있으며, 안전계통을 좀 더 살펴보면 다음과 같다.

1) 격납용기(PCV)

격납용기는 사고 시 원자로에서 방출되는 방사성물질을 억류시키고, 원자로를 비롯한 핵심 설비들을 외부 영향으로부터 보호하는 역할을 하는 중요한 안전 설비이다. 후쿠시마 제1원전 1~5호기의 격납건물은 <그림 2.6>의 Mark-I 설계로서, 강철로 된 일차 격납용기(Primary Containment Vessel; PCV)와 이를 둘러싸는 원자로건물(Reactor Building; RB)¹⁵⁾로 구성되어 있다. 일차 격납용기의 설계압력은 약 4기압으로 상당히 높은 압력까지 견디지만, 원자로건물은 내부 압력을 견디는 기능은 없이 기밀 상태만 유지할 수 있다. 일차 격납용기는 드라이웰(Drywell)과 웨트웰(Wetwell)이 커다란 배기관(Vent)들에 의해 연결된 형태이다. 드라이웰은 표주박 또는 백열전구 모양의 강철 용기로서 평상시 건조한 상태로 유지되며, 그 안에 원자로용기, 냉각재 재순환펌프와 밸브 등 다양한 기기, 배관 등이 위치하고 있다. 웨트웰은 커다란 원환체(Torus) 모양의 압력억제실(Pressure Suppression Chamber; SC)로서, 평상시 약 절반 정도 물이 채워져 있는 습한 부분이다. 이 물은 격납용기로 유입되는 증기를 응축시켜 압력 상승을 억제할 뿐만 아니라, 원자로용기 감압 시 방출되는 증기를 응축시키는 역할을 하기도 하고, 비상 노심 냉각수로도 사용된다. 압력억제수조(Pressure Suppression Pool; SP)는 압력억제실 또는 그 내부의 물이 있는 부분을 지칭한다.

15) '원자로건물(Reactor Building)'을 일부 자료에서는 '2차 격납용기(Secondary Containment)'라고도 한다. 그러나 내부 압력을 견디는 기능이 없기 때문에 일반적인 명칭인 '원자로건물'로 부르기로 한다.



<그림 2.7> 후쿠시마 제1원전 1호기(BWR-3)의 원자로계통과 안전계통[ICANPS(2011)]

원자로건물은 격납용기가 제외된 부분으로, 대부분의 비상노심냉각계통 설비가 설치되며, 상부에는 사용후연료저장조(Spent Fuel Pool; SFP)가 설치되어 원자로에서 사용된 사용후연료를 공용 저장조로 옮기기 전까지 저장한다. 또한, 자연적 또는 인공적인 외부 영향으로부터 격납용기와 원자로를 보호하는 역할도 중요하다.

2) 대기 액체제어계통(SLC)

대기 액체제어계통(Standby Liquid Control System; SLC)은 원자로 정지가 필요한 시점에서 제어봉 삽입이 제대로 이루어지지 않는 경우 원자로 노심에 중성자 흡수물질인 붕산수를 공급하여 핵분열 반응을 신속하게 정지시키기 위한 계통이다. 붕산수 저장탱크, 2대의 용적식 펌프, 2개의 제어밸브 및 관련 배관으로 구성되는데, 필요할 때 운전원이 수동으로 조작한다.

3) 격리응축계통(IC)

BWR-3에는 2대의 격리응축기(Isolation Condenser; IC)¹⁶⁾가 설치되어 사고 시 노심 냉각 기능을 일차적으로 담당한다. 격리응축계통은 터빈 및 응축기에 의한 냉각이 불가능한 경우 자연대류에 의해 노심 냉각을 담당하는 피동계통¹⁷⁾이다. 노심에서 붕괴열에 의해 생성되는 수증기가 높은 곳에 위치한 대형 수조 내의 열교환기(격리응축기)를 통과하면서 수조의 냉각수로 열을 전달한다. 격리응축기에서 응축된 냉각수는 다시 노심으로 되돌아가고, 수조의 냉각수는 비등하면서 증기를 대기로 방출한다. 격리응축기 계통은 교류 전원의 도움 없이도 자연 순환(Natural Circulation)에 의해 노심을 냉각시킨다.

4) 고압냉각수주입계통(HPCI)

고압냉각수주입계통(High Pressure Coolant Injection; HPCI)은 냉각재 상실사고(LOCA) 시 고압 조건에서 비상냉각수를 주입하여 원자로 노심을 냉각시킨다. HPCI는 증기 터빈에 의해 구동되는 다단 고압주입펌프와 기어에 의해 구동되는 1단 부스트 펌프를 사용하며, 주냉각수원으로 응축수저장탱크(Condensate Storage Tank; CST)를, 보조 냉각수원으로 격납용기 압력억제수조를 사용한다. 원자로 수위가 낮아지거나 격납용기 압력이 높을 때 자동으로 작동되며, 운전원에 의한 수동 작동도 가능하다.

16) 일본에서는 ‘비상용복수기’로 부르지만, 본 보고서에서는 의미 전달이 쉬운 ‘격리응축기’로 칭한다.

17) 피동(Passive) 계통/설비는 외부로부터의 전원 공급이 없더라도 중력, 자연 순환, 압력 차이 등 자연적인 구동력에 의해 기능을 수행하는 계통/설비를 말한다. 직류 전원에 의한 제한적인 밸브 개폐만이 필요한 경우에도 피동으로 분류하는 것이 일반적이다. 반면에 기능을 수행하는 데 있어서 교류 전원을 필요로 하는 펌프나 밸브가 작동되어야 하는 경우에는 능동(Active) 계통/설비라 한다.

5) 자동감압계통(ADS)

자동감압계통(Automatic Depressurization System; ADS)은 원자로 압력을 낮추어야 하거나 소형 냉각재상실사고 시 HPCI가 정상적으로 기능하지 않을 때에 작동한다. 감압밸브(Relief Valve)를 통해 원자로 증기를 격납용기 압력억제수조로 방출하여 원자로용기의 압력을 낮추면서, 동시에 원자로 내부의 에너지를 격납용기로 전달한다. 자동감압계통은 주증기 배관에 설치된 감압밸브, 배관, 압력 제어기로 구성되며, 원자로 수위와 격납용기 압력 조건에 의해 자동으로 작동되며, 운전원에 의한 수동 작동도 가능하다.

6) 노심살수계통(CS)

노심살수계통(Core Spray System; CS)은 중·대형 냉각재상실사고 발생 시 원자로용기 내에 설치된 분사기(Sparger)를 통해 노심 상부로 냉각수를 뿌림으로써 효과적인 노심 냉각을 꾀한다. 2개의 독립된 부계통(Subsystem)이 설치되며, 각 부계통은 모터에 의해 구동되는 펌프, 배관 및 계측기로 구성되어 있다. 주 냉각수원으로 격납용기 압력억제수조의 냉각수를, 보조 냉각수원으로 응축수저장탱크의 냉각수를 사용한다. 노심살수계통은 원자로 수위가 낮아지거나 드라이웰 압력이 높아졌을 때 자동 기동된다.

다. 2~4호기(BWR-4)의 안전 계통

BWR-4 원전에는 격리응축기 대신 노심격리냉각계통(Reactor Core Isolation Cooling; RCIC)이 설치되며, 정상적인 잔열제거 기능을 함께 수행하는 저압냉각수주입계통(Low Pressure Coolant Injection; LPCI)을 갖추고 있다. BWR-4 원자로계통과 핵심 안전계통의 구성은 <그림 2-8>에서 볼 수 있으며, BWR-3와 다른 계통은 다음과 같다.

1) 노심격리냉각계통(RCIC)

원자로 운전 중 주증기관이 격리되고 원자로 내에 정상적인 급수 공급이 이루어지지 않을 때에 원자로 내부로 냉각수를 공급하는 계통으로서, BWR-3의 격리응축기(IC)를 대신하여 노심격리냉각계통(RCIC)이 BWR-4 이후의 비등경수로에 채택되었다. RCIC는 터빈구동 펌프, 배관 및 밸브로 구성되며, 주요 냉각수원으로 응축수저장수(CST)를, 보조 냉각수원으로 압력억제수조 냉각수를 사용한다. RCIC는 노심 저수위 조건에서 자동 작동되며, 운전자에 의한 수동 작동도 가능하다. 원자로에서 생산되는 수증기를 이용하여 구동하므로, 교류전원이 없더라도 냉각수 주입이 가능하다.

2) 저압 냉각수주입계통(LPCI)

저압 냉각수주입계통(Low Pressure Cooling Injection; LPCI)은 냉각재상실사고 발생 시 잔열제거계통(RHR)을 이용하여 저압 조건에서 노심으로 비상냉각수를 주입하는 계통으로, 설계기준사고에서 고압 냉각수주입계통(HPCI) 작동 이후의 냉각기능을 담당한다. 2개의 독립된 부계통으로 구성되는데, 각 부계통마다 2대의 모터구동 펌프와 1대의 열교환기가 설치되어 있다. 주요 수원으로 격납용기 압력억제 구조의 냉각수를, 보조 수원으로 CST의 냉각수를 사용한다. 원자로 저수위와 격납용기 고압신호에 의해 자동으로 작동되며, 운전원의 수동 조작도 가능하다.

라. 격리응축기와 노심격리냉각계통

후쿠시마 제1원전 1호기에는 고압 조건에서의 잔열 제거를 위해 2계열의 격리응축기(IC)가 갖춰졌으며, 응축수 회수관에는 Fail-Close(전력 공급이 끊어지면 밸브가 닫히는 특성)되는 모터구동 밸브가 설치되어 직류전원 공급 불능 시 계통작동이 멈추게 된다. 후쿠시마 2~5호기에 설치된 노심격리냉각계통(RCIC)의 경우에도 1호기의 격리응축기(IC)와 마찬가지로 Fail-Close되는 모터구동 밸브가 설치되어 직류전원 공급 불능 시에는 계통작동이 멈추게 된다. <표 2.6>은 1호기의 격리응축기와 2~5호기 노심격리냉각계통의 설계 특성을 요약하고 있다.

<표 2.6> 비등경수로에 사용되는 IC와 RCIC의 설계 특성 [Moriya & Sato (2011)]

(가) 격리응축기(IC)

구 분	설 명
목 적	<ul style="list-style-type: none"> 원자로가 격리되는 사건(주증기 격리밸브가 닫히는 사건) 동안 원자로용기 내부의 냉각재 재고량 손실 없이 원자로를 냉각
기 능	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 격리 후, 원자로에서 생성된 증기를 응축기로 보냄 응축기에서의 열 교환 후, 응축된 물은 원자로로 되돌아 감
계통 구성	<ul style="list-style-type: none"> 격리응축기, 격리 밸브 및 배관으로 구성되는 부계통 2계열로 구성됨 증기라인의 모터구동 격리 밸브들은 NOFO* 구동 형태임 응축수 회수 라인의 모터구동 격리 밸브들은 NCFC** 구동 형태임 모든 밸브들은 직류전원만으로 구동 가능함
용 량	<ul style="list-style-type: none"> 2대의 격리응축기는 정상출력 열부하의 6%를 제거할 수 있음 격리응축기 수조는 냉각수의 추가 공급 없이도 10시간 동안 붕괴열을 제거하기에 충분한 냉각수 용량을 가짐

* NOFO(Normal Open, Fail Open): 해당 밸브(Valve)가 발전소 정상 운전 중에 열려 있고, 전기 공급이 상실 되는 경우에도 열림 상태가 되는 경우(전기가 공급될 때는 폐쇄 여부를 운전원이 제어)

** NCFC(Normal Close, Fail Close): 해당 밸브(Valve)가 발전소 정상 운전 중에 닫혀 있고, 전기 공급이 상실 되는 경우에도 닫힘 상태가 되는 경우(전기가 공급될 때는 폐쇄 여부를 운전원이 제어)

(나) 노심격리응축계통(RCIC)

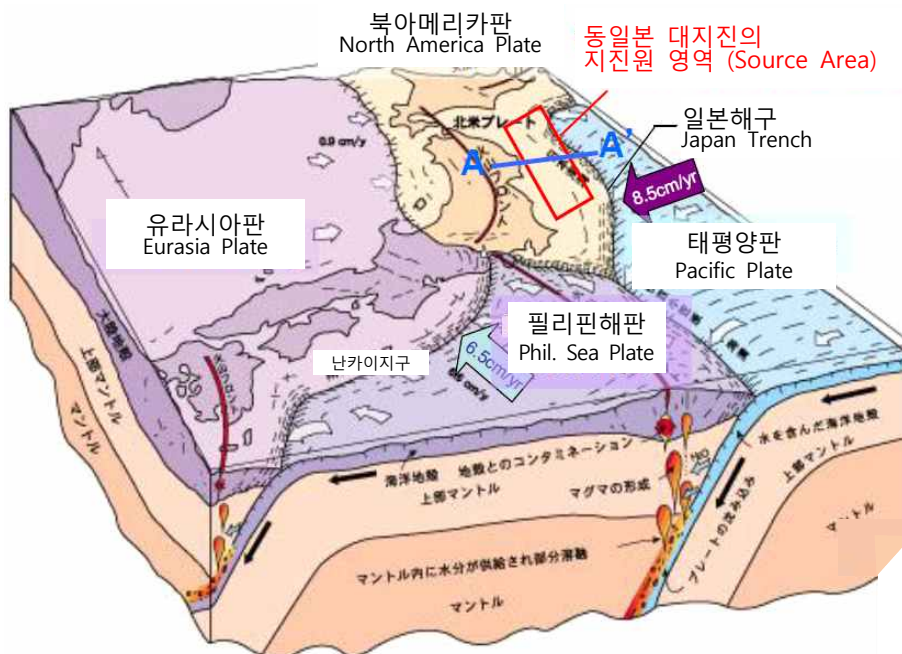
구 분	설 명
목 적	<ul style="list-style-type: none"> 원자로가 격리되는 사건(주증기 격리밸브가 닫히는 사건) 동안 원자로용기 로 냉각수를 주입
기 능	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 격리 후, 응축수저장탱크 또는 압력억제수조의 냉각수를 원자로에 주입하는데 사용되는 RCIC 터빈구동펌프로 원자로에서 생성된 증기를 공급 원자로 증기가 RCIC 터빈구동펌프를 돌린 후 응축된 물은 압력억제수조로 방출
계통 구성	<ul style="list-style-type: none"> 터빈구동펌프, 펌프, 배관, 밸브, 냉각수원(응축수 저장탱크 및 압력억제수조)으로 구성 원자로용기 저수위(L2)에 의해 자동으로 기동되고, 원자로용기 고수위(L8)에 의해 정지 주 냉각수원은 응축수저장탱크이며, 압력억제수조의 수위가 정상운전 수위보다 5cm 이상 상승하면 압력억제수조의 냉각수를 주입 모든 밸브들과 터빈 조속기(Governor)는 직류전원만으로 구동 가능함
용 량	<ul style="list-style-type: none"> 모든 교류전원이 상실되는 SBO 시, 부하 감소 조건에 따라 직류전원만으로는 8시간만 운전될 수 있음

3. 후쿠시마 사고 발생과 진행

3.1 동일본 대지진 및 쓰나미

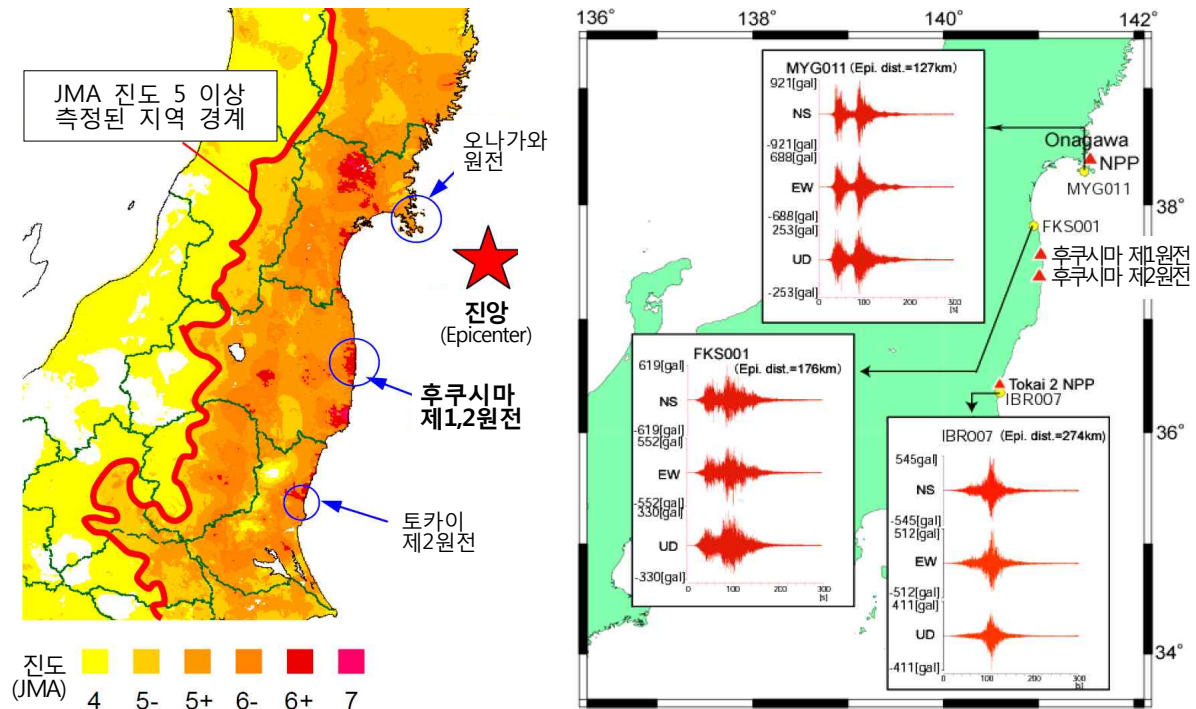
가. 동일본 대지진

2011년 3월 11일 14시46분 일본열도의 북동부 지역에서 규모¹⁸⁾ 9.0의 일본 지진 관측 역사상 가장 강력한 지진이 발생하였다. 진앙은 후쿠시마 제1원전으로부터 북동쪽으로 약 180 km 떨어진 태평양 지역이고, 진원의 깊이는 약 24 km였다. 진동은 약 3분간 지속하였는데, 길이 400 km, 폭 200 km 이르는 매우 넓은 영역에서 여러 개의 지진원(Earthquake Source)들이 거의 동시에 활동을 일으켰고, 일본의 해안선 지역이 약 0.8m 가라앉는 결과가 초래되었다. <그림 3.1>은 일본 주변의 대륙판(북아메리카판, 태평양판, 유라시아판, 필리핀해판)들의 위치와 동일본 대지진의 지진원 영역을 보여준다. 북아메리카판과 태평양판의 경계에 일본해구(Japan Trench)가 형성되어 있는데, 태평양판이 북아메리카판 아래로 매년 8.5 cm씩 파고들면서 축적된 거대한 에너지가 넓은 영역에 걸쳐 분출된 것이다.



<그림 3.1> 일본 주변의 대륙판 분포 및 동일본 대지진의 지진원 영역[NERHQ(2011a)]

18) 지진의 크기를 나타내는 수치로 '규모'(Magnitude)와 '진도'(Seismic Intensity)가 있다. 규모는 임의의 지진이 발생할 때 나타나는 진동 에너지의 총량을 기준으로 하며, 대표적으로 사용되는 것이 리히터 규모이다. 반면에 진도는 지진에 의해 특정 위치에서 나타난 진동의 세기를 나타내며, 일본기상청(JMA)에서는 0 등급부터 7등급까지로 구분하고, 강진으로 구분되는 5등급부터는 각 등급마다 강, 약으로 구분한다. 따라서 임의의 지진에 대해 규모는 하나로 나타나지만, 진도는 위치에 따라 다르다.



<그림 3.2> 동일본 대지진에 의한 JMA 진도 분포 및 원전부지 근처에서의 지진파[NERHQ(2011a)]

한편, <그림 3.2>는 일본 동북부 지역에서의 JMA 진도 분포와 원전 부지 주변에서 관측된 지진가속도¹⁹⁾의 시간 이력을 보여준다. 진앙에서 수백 킬로미터 떨어진 곳에서도 진동이 크게 나타났고, 이는 지진원 영역이 매우 넓었던 데 기인한다. 후쿠시마 원전 근처에서는 약 30초와 80초 경 큰 지진가속도가 관측되었다.

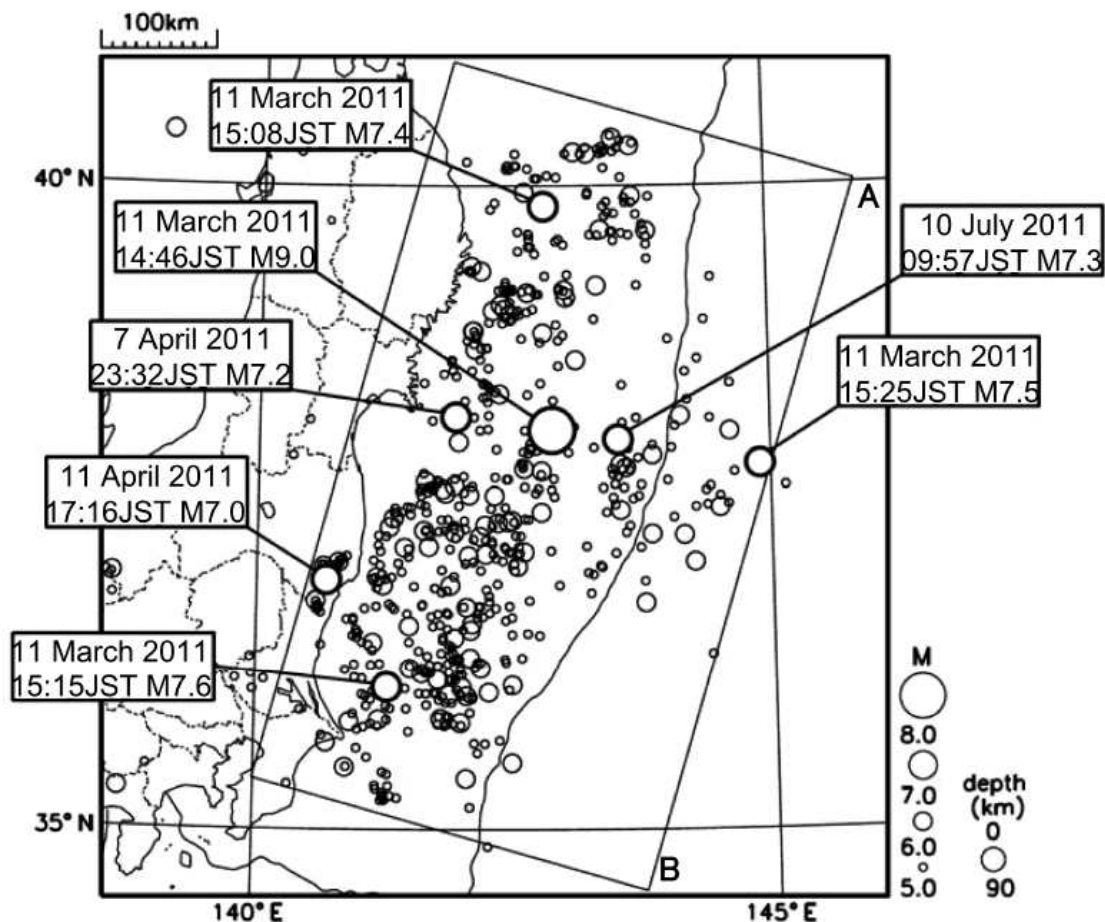
<표 3.1> 후쿠시마 제1원전에서 관측된 지진가속도와 설계기준과의 비교[NERHQ(2011a)]

관측 위치		관측값 (gal)			설계기준지진, Ss (gal)		
		남-북(NS)	동-서(EW)	상향(UP)	남-북(NS)	동-서(EW)	상향(UP)
후쿠시마 제1원전	#1	460	447	258	487	489	412
	#2	348	550	302	441	438	420
	#3	322	507	231	449	441	429
	#4	281	319	200	447	445	422
	#5	311	548	256	452	452	427
	#6	290	431	244	445	448	415

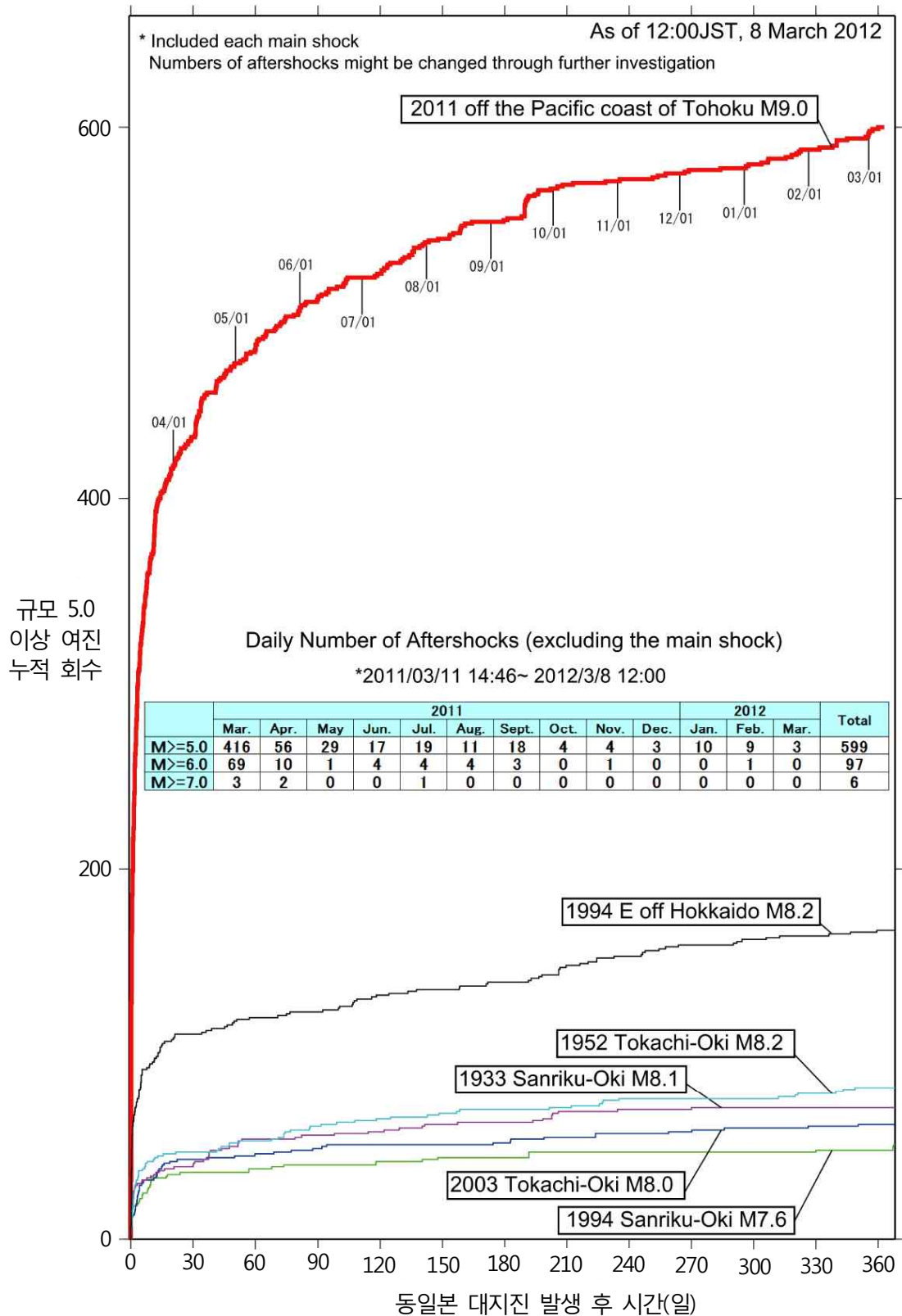
19) 지진가속도는 중력가속도(g)의 몇 배 형식으로 나타내는 경우가 많으나(예: 0.2 g, 0.3 g), 일본에서는 gal(= cm/s²)을 주로 사용한다. 1 g는 980 gal과 같다.

<표 3.1>은 후쿠시마 제1원전에서 측정된 각 방향의 최대 지진가속도를 설계기준 지진가속도와 비교하고 있다. 수직 방향의 지반가속도는 설계기준보다 상당히 낮지만, 수평 방향으로 2,3,5호기에서 설계기준을 상당히 초과하였다. 후쿠시마 원전의 설계기준 지진은 지질학적 조사 자료와 역사 지진, 주변 단층의 지진 발생 가능성 등을 고려하여, 부지 근처에서 발생한 지진으로서 원전에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 평가된 시오야자키 지진(1938년)에 근거하여 결정되었다. 일본에서는 설계기준 지진을 결정할 때 이를 초과하는 지진이 발생할 확률이 연간 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 이 되도록 하고 있다.

동일본 대지진의 특징 중의 하나는 다른 지진들에 비해 매우 많은 여진(Aftershock)이 발생한 점이다. 그림 <3.3>은 여진 발생 위치와 규모 및 대형 여진 발생 시점을, <그림 3.4>는 과거의 지진들과 비교한 규모 5.0 이상 여진의 누적 발생 회수를 각각 보여주고 있다. 일본 기상청(JMA)의 2012년 4월말 기준 통계에 따르면 규모 7, 6, 5 이상의 여진이 각각 6회, 102회, 671회 발생한 것으로 나와 있다.



<그림 3.3> 동일본 대지진에 여진 발생 위치 및 크기[JMA 웹사이트]



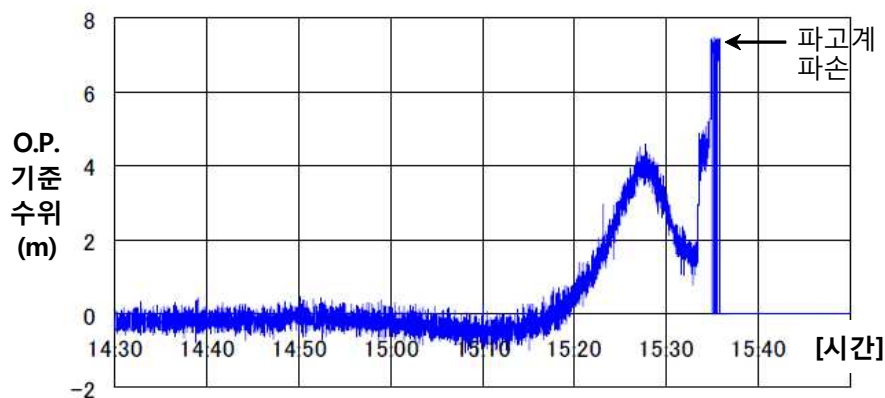
<그림 3.4> 시간에 따른 규모 5.0 이상 여진 누적 발생 회수 및 타 지진과의 비교[JMA 웹사이트]

나. 쓰나미(지진해일)

쓰나미(Tsunami; 지진해일)는 해저에서의 지진이나 화산 폭발, 단층운동 등으로 용기 또는 하강할 때 발생하는 파장이 긴 파도이다. 심해에서의 지각활동 때문에 발생한 쓰나미는 먼 바다에서는 매우 긴 파장, 낮은 파고 및 매우 빠른 이동속도의 특징을 갖는다.²⁰⁾ 그러나 수심이 얕은 해안선 부근에 도달하면 천수효과(淺水效果)에 의해 파장과 이동속도는 크게 감소하는 반면 파고가 급격히 증가하여 인명 및 재산 피해를 야기하는 특성을 가지고 있다.

일반적으로 쓰나미는 처오름(Run-up)과 처내림(Run-down 또는 Draw-down)에 의해 원전 시설에 영향을 줄 수 있다. 처오름에 의해서는 부지의 범람, 인접시설의 침수, 파력에 의한 설비(변전설비 등) 손상 등이 발생할 수 있고, 처내림에 의해서는 취수설비의 고장이나 취수능력 저하 등으로 안전성에 영향을 미칠 수 있다. 이 밖에 처오름 발생 시 동반되는 모래나 부유물 등에 의해 취수시설이 막히거나 설비가 손상될 수도 있다.

이번 동일본 대지진에서도 해저 지진원의 활동과 해수의 진동으로 인해 7회에 달하는 일련의 쓰나미가 발생하였다. <그림 3.5>는 후쿠시마 제1원전의 파고계에 의해 측정된 해수위(O.P. 기준)²¹⁾ 값이다. 15시27분(지진 발생 41분 후) 후쿠시마 원전 부지에 도달한 첫 번째 쓰나미의 파고는 약 4 m로서, 원전의 설계기준수위(5.7m)나 부지 높이(10 m)에 이르지 못하였다. 그러나 15시35분(지진 발생 48분 후) 도달한 두 번째 쓰나미의 경우 파고계의 손상으로 파고가 직접 측정되지 않았으나, 약 15 m 높이까지 도달 것으로 추정된다. <표 3.2>는 후쿠시마 제1원전 각 호기의 부지 높이와 쓰나미에 의한 침수 상황을 요약하고 있다.



<그림 3.5> 후쿠시마 제1원전 파고계가 측정한 쓰나미 높이[TEPCO(2012a)]

20) 심해에서 발생하는 쓰나미의 경우 대양에의 파장은 200 km, 이동속도는 시속 800 km 이상이 되지만, 파고는 1m 이하인 경우가 많아서 육안 관찰이 쉽지 않다.

21) 여기서 O.P.는 오나하마 항 평균 해수위(동경만 평균 해수위보다 0.727 m 낮음)를 가리킨다. 본 보고서에의 부지 높이나 파도 높이 등은 특별한 언급이 없는 한 O.P. 기준이다.

<표 3.1> 후쿠시마 제1원전의 침수 상황 요약[TEPCO(2012a)]

구 분	1~4호기 주변	5~6호기 주변
부지 높이	O.P. + 10 m	O.P. + 13 m
홍수위 높이	O.P. + 11.5~15.5 m	O.P. + 13~14.5 m
침수 깊이	약 1.5 ~ 5.5 m	약 1.5 m 이하
침수 범위	해변 쪽은 물론 터빈건물, 원자로건물 등 주요 건물 주위가 대부분 침수	

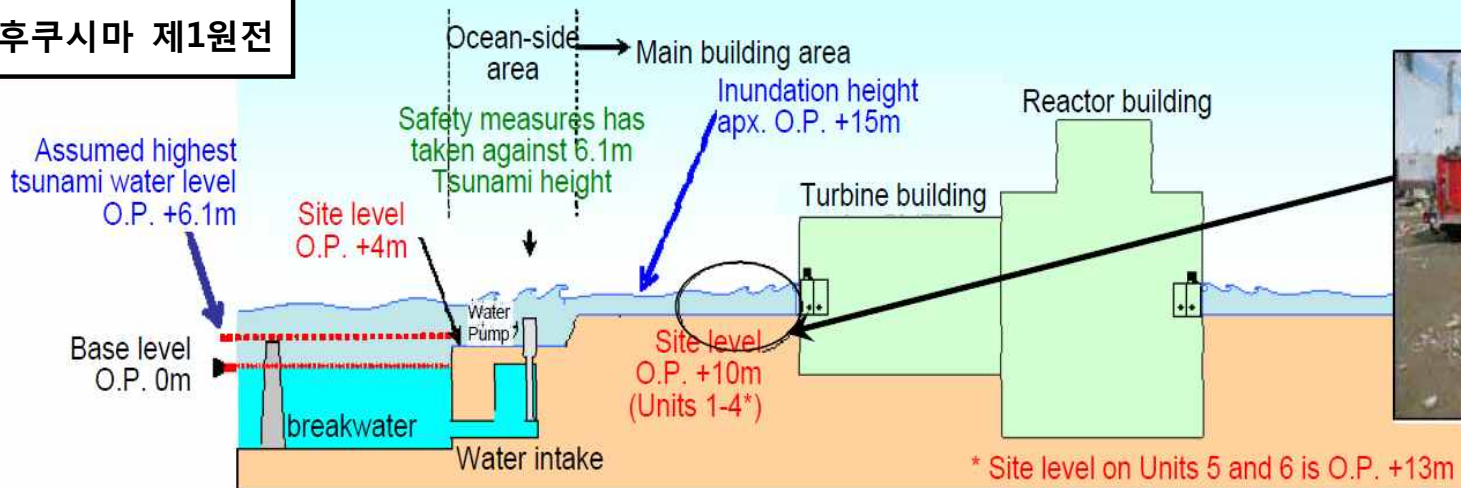
- 주) - 동경전력은 해변의 파고계 위치에서는 13 m 수준이었을 것으로 분석함
 - 한편, 남서쪽 일부 구역에서는 홍수위 높이가 16~17 m에 이른 흔적이 나타남

<그림 3.6>은 후쿠시마 제1원전에 쓰나미가 접근하여 침수시키는 과정에서 촬영된 사진들이다. 방파제가 파손되는 모습, 높은 파고의 쓰나미가 접근하는 모습, 높이 5.5 m의 탱크가 바닷물에 완전히 잠겼다가 다시 드러나는 모습 등을 확인할 수 있다. 그리고 <그림 3.7>은 후쿠시마 제1원전과 제2원전에서의 쓰나미 파고와 부지 높이 등을 비교하여 보여준다.

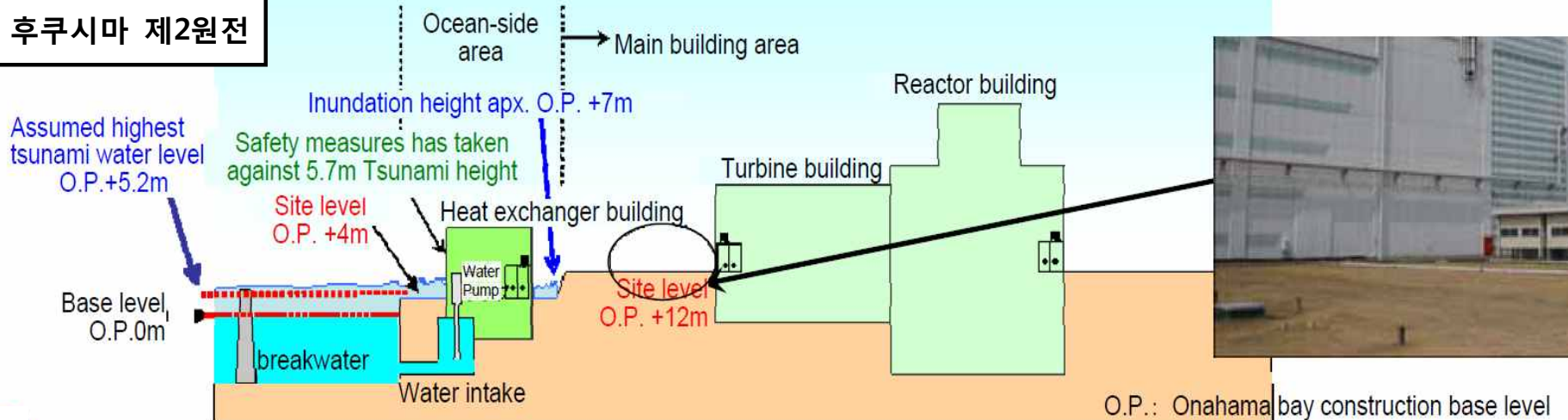


<그림 3.6> 쓰나미에 의한 침수 시 후쿠시마 제1원전에서 촬영된 사진들 [TEPCO(2012a)]

후쿠시마 제1원전



후쿠시마 제2원전



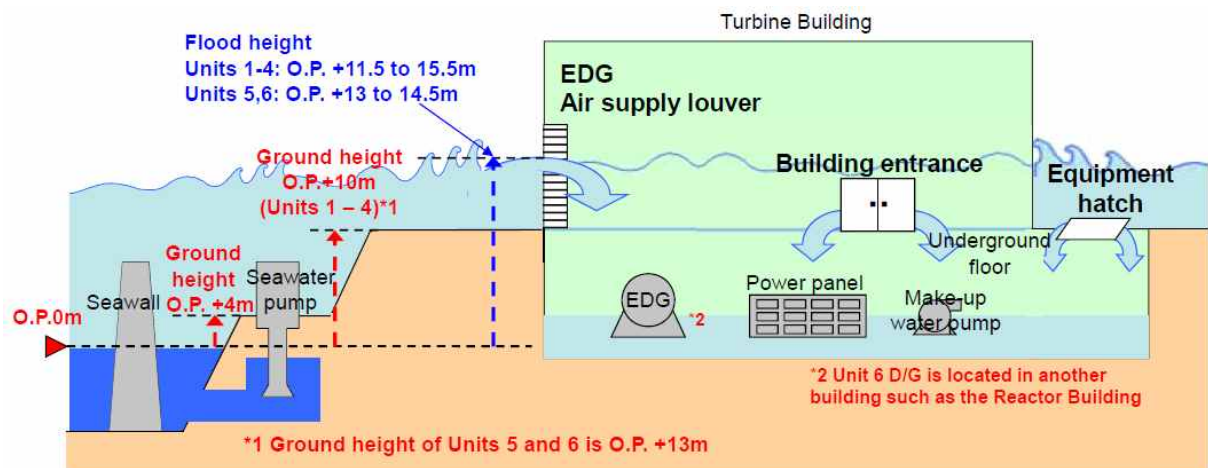
<그림 3.7> 후쿠시마 제1원전과 제2원전 간의 쓰나미에 의한 침수 비교[TEPCO(2012b)]

3.2 후쿠시마 사고 발생과 진행

가. 개요

동일본 대지진으로 인한 격렬한 지각 진동은 약 3분간 지속하였다. 지진 발생 직후 후쿠시마 제1원전에서 출력 운전 중이던 1,2,3호기는 원자로건물 기초부에 위치한 지진감시계가 원자로정지 설정치를 초과하는 진동 가속도를 감지함에 따라 원자로보호계통(Reactor Protection System)이 작동하여 원자로가 자동으로 정지(Trip 또는 Automatic Shutdown) 되었다. 또한, 차단기 및 송전선로 손상 등으로 발전소 외부로부터 공급되는 모든 전력망이 차단됨에 따라 소외전원 상실이 발생하였다. 그러나 자동으로 작동된 비상 디젤발전기²²⁾들이 전력을 공급하여 원전의 안전 기능을 유지하였다.

지진 후 후쿠시마 제1원전에는 총 7차례의 쓰나미가 도달했는데, 특히 파고 15 m 수준의 두 번째 쓰나미(15시35분)가 가장 큰 피해를 줬다. 쓰나미와 부유물들이 모든 취수구를 파손하여 해수를 이용하는 정상적인 최종 열 제거 기능이 상실되었다. 또한, 해수가 건물로 유입되면서 비상디젤발전기도 사용할 수 없게 되면서 1~4호기까지 교류전력 완전 상실(Station Black-out; SBO)이 발생하였다. 해수는 축전지(Battery)가 공급하는 직류 전원에도 손상을 입혀서, 1호기와 2호기에서는 모든 직류전원이 상실되었고, 3호기에서는 부분적인 직류전원만 사용 가능하였다. <그림 3.8>은 주요 기기들이 침수되어 기능을 상실하는 과정을 예시하고 있다. 한편, 5,6호기에서는 공기냉각 비상디젤발전기 1대만이 가용한 상태로 원자로와 사용후연료저장조의 냉각에 사용되었다.



<그림 3.8> 후쿠시마 제1원전에서 쓰나미에 의한 터빈 건물 및 주요 기기의 침수[TEPCO(2012a)]

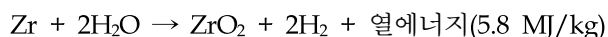
22) 후쿠시마 제1원전에는 총 13대의 비상 디젤발전기가 설치되어 있었는데, 지진 발생 당시 수리 중이던 1대를 제외한 12대가 모두 자동으로 작동된 것으로 알려져 있다.

후쿠시마 제1원전의 1호기는 원자로의 붕괴열(잔열) 제거 기능을 사고 초기에 상실하여 지진 발생 당일에 이미 많은 양의 핵연료가 녹아내린 것으로(이를 '노심 용융'이라 함) 추정된다. 2호기와 3호기의 경우, 사고 초기에는 전기 공급 없이도 원자로에서 나오는 수증기에 의해 구동되는 펌프가 가동되어 노심 냉각이 이루어졌으나, 밸브 제어 등에 필요한 직류전원이 사고 직후 또는 1~2일 안에 상실됨에 따라 지속적인 냉각기능 유지에는 실패하여 결국 노심 용융으로 이어졌다. 이 과정에서 고온의 핵연료 피복재와 수증기가 반응²³⁾하여 생성된 많은 양의 수소가스가 다양한 경로를 통해 원자로건물 내부로 누출된 후 상부 공간에 축적되어, 1호기에서는 3월 12일, 3호기에서는 3월 14일 각각 원자로건물에서 수소가스 폭발이 발생하고 원자로건물 상부가 파손되었다. 3월 15일에는 많은 양의 핵연료를 사용후연료저장조에 보관하고 있던 4호기의 원자로건물에서도 수소가스 폭발이 발생했는데, 3호기에서 발생한 수소가스가 배기 과정에서 4호기 원자로건물로 유입된 것으로 추정되고 있다. 2호기의 경우 수소가스의 폭발은 발생하지 않았으나, 격납용기의 고온·고압 조건이 지속되면서 드라이웰에서 취약한 부분이 부분적으로 손상되어 다량의 방사성물질이 대기 중으로 직접 방출된 것으로 보인다. 세 차례 발생한 대형 수소가스 폭발은 후쿠시마 사고를 상징하면서 원전 안전에 대한 불신을 크게 높였다.



<그림 3.9> 수소가스 폭발 후의 후쿠시마 제1원전 1~4호기 외부 모습[TEPCO 웹사이트]

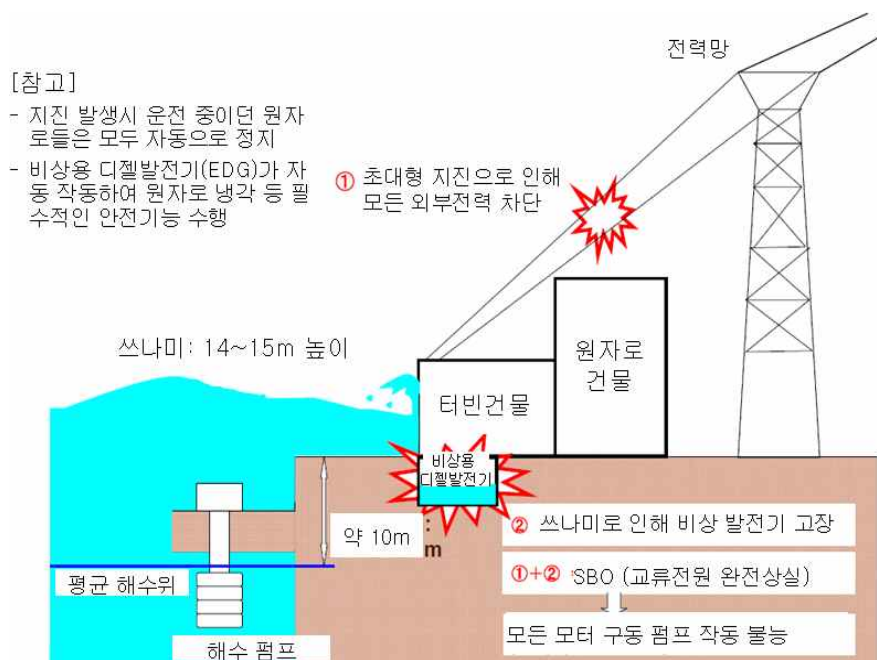
- 23) 핵연료 피복재인 지르코늄(Zr) 합금의 온도가 올라가면 냉각재의 수증기와의 다음 반응을 통해 수소가스를 발생한다.



피복재 온도가 1,200°C(2,200°F) 이상이 되면 반응 속도가 현저하게 커지고, 발열반응으로 인해 피복재 온도가 급격하게 상승할 수 있다. 따라서 비상노심냉각계통은 냉각재상실사고 시 피복재 온도를 1,200°C 이하로 유지할 수 있도록 설계한다.

후쿠시마 사고로 인한 방사성물질 외부 누출에 대해서는 추가 분석이 필요하지만, 대체로 체르노빌 사고 시의 20% 수준으로 평가되고 있다. 편서풍의 영향으로 누출된 방사성물질의 상당량이 태평양 쪽으로 확산하여 육지 생태계에 미친 영향이 줄었으나, 방사성물질이 많이 방출된 3월 15일의 풍향에 따라 원전 북서쪽 지역의 오염이 상대적으로 심한 것으로 나타나고 있다. 주민의 비상 대피는 비교적 신속하게 이루어져서 방사선 피폭을 줄일 수 있었던 것으로 평가되지만, 상세한 대피 지침의 미비, 방사성물질 확산 평가 시스템인 SPEEDI²⁴⁾의 미활용 등에 대해서는 논란이 있다.

긴급 상황에서 원자로의 안전성을 확보하기 위해서는 ① 원자로를 정지시켜서 핵분열 반응을 신속하게 중단시키고, ② 원자로 정지로 핵분열 반응이 중단된 이후에도 핵연료로부터 계속 발생하는 붕괴열을 지속적으로 제거(냉각)하여 연료봉의 과열을 방지해야 하며, ③ 최종적으로는 방사성물질과 외부 환경 간의 격리 상태를 유지하여야 한다. 이번 사고는 원자로의 정지는 안전하게 이루어졌으나 연료봉으로부터의 붕괴열 냉각에 실패하였고, 이에 따라 방사성물질을 외부와 격리하는 방벽인 핵연료 피복관, 원자로 및 격납 용기 등이 파손됨으로써 야기된 사고라 할 수 있다. 후쿠시마 제1원전에서 교류전원 완전상실(SBO)이 발생하기까지의 사고 발단 과정을 <그림 3.10>에 예시하였으며, 지진 발생 직후부터 3월 말까지 후쿠시마 제1원전에서 긴박하게 전개된 주요 사고 경과를 <표 3.2>와 <그림 3.11>에, 사고의 전체적인 흐름을 <그림 3.12>에 각각 제시하였다.



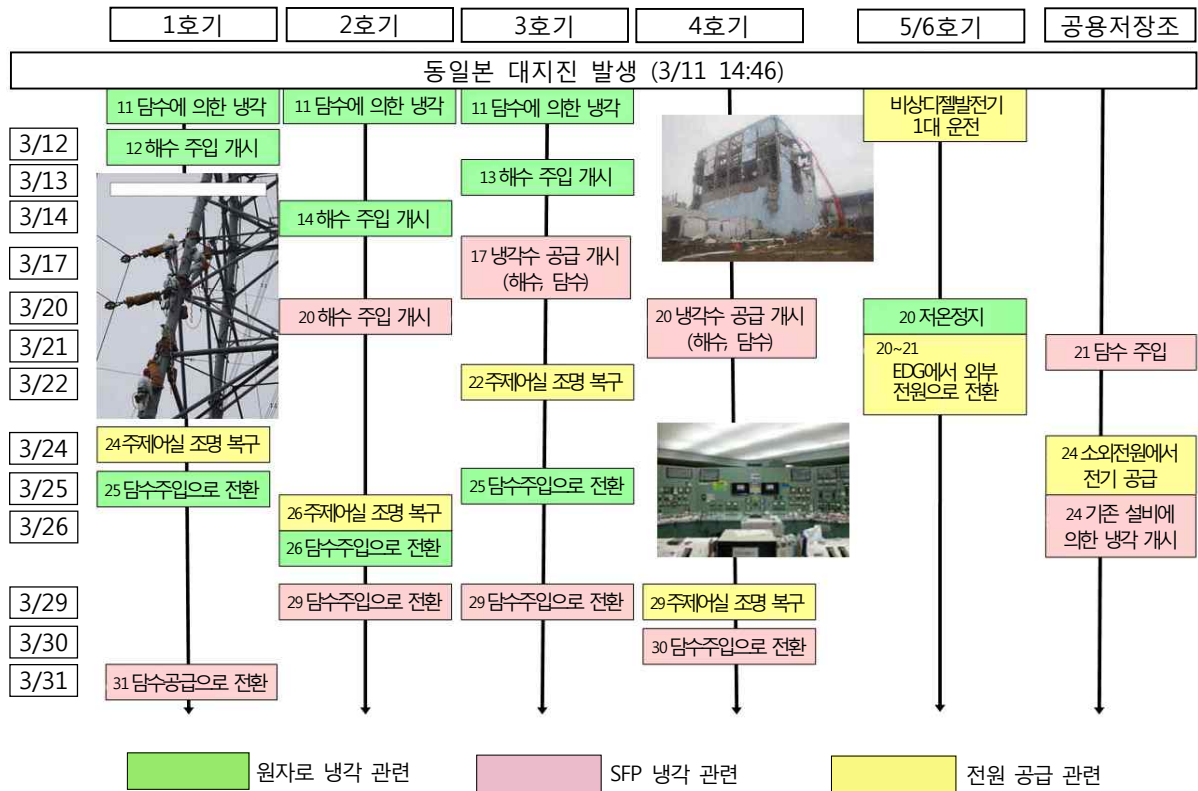
<그림 3.10> 후쿠시마 제1원전에서의 사고 발단 과정 [NISA/JNES(2011)]

24) System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information(긴급시 신속 방사능영향예측 네트워크 시스템)

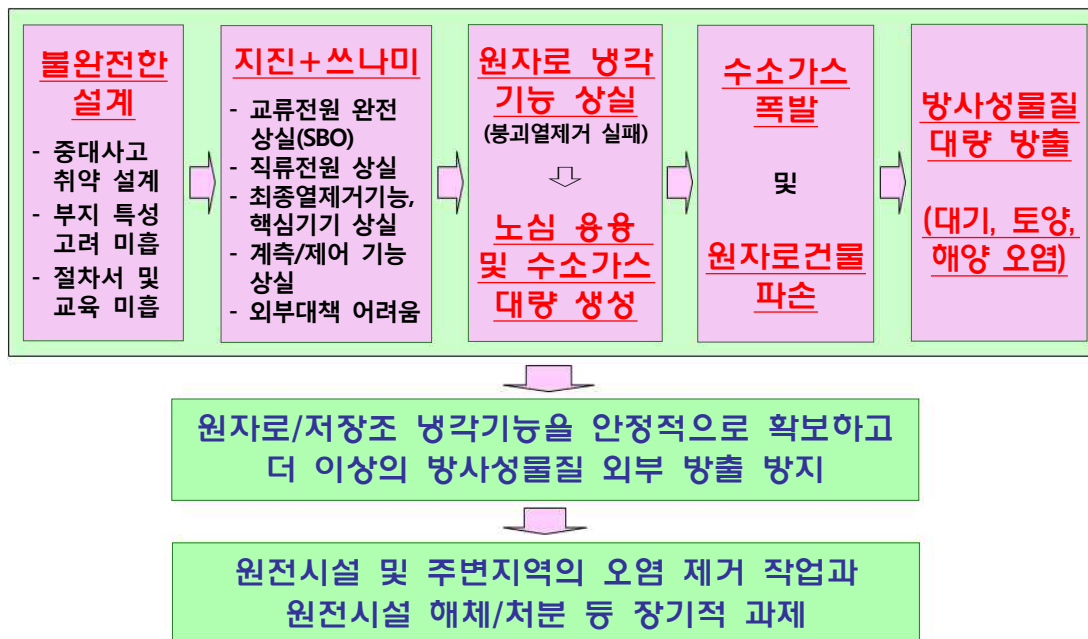
<표 3.2> 후쿠시마 사고의 초기 전개

일	주요 사고 경과	비 고
3.11(금)	<ul style="list-style-type: none"> 지진 발생(14:46)으로 가동 중이던 1,2,3호기 자동 운전 정지 쓰나미로 인해 1~3호기의 모든 교류전원 상실(15:40 전후) 비상사태 선언(19:03), 반경 3 km 소개 및 10 km 옥내 대피(21:00) 	
3.12(토)	<ul style="list-style-type: none"> 1호기 격납용기 배기 결정(06:50); 격납용기 압력 하강(14:30) 1호기 원자로건물에서 수소가스 폭발(15:36); 요오드(I)/세슘(Cs) 검출 주민 소개 범위를 20 km 반경으로 확대(21:40) 1호기 원자로에 해수주입 시작(19:04) 	최초 수소가스 폭발
3.13(일)	<ul style="list-style-type: none"> 3호기 격납용기 배기(09:08) 및 해수 주입 시작(13:12) 	
3.14(월)	<ul style="list-style-type: none"> 3호기 건물 상부에서 대형 수소가스 폭발 발생(11:01) 2호기 원자로 냉각수 수위 저하 및 해수 주입 시작(19:20) 	2번째 수소가스 폭발
3.15(화)	<ul style="list-style-type: none"> 2호기 격납용기 일부 손상 및 방사성물질 대량 방출(추정) 4호기 원자로건물 수소가스 폭발 및 화재(06:10) 부지 내 방사능 준위가 400 mSv/h까지 상승 	3번째 수소가스 폭발; 사용후연료저장조 안전문제 등장
3.16(수)	<ul style="list-style-type: none"> 3호기 근처의 방사능 준위가 상승하고 연기도 관찰 부지에서의 방사능 준위가 일시적으로 1,000 mSv/h 도달 	
3.17(목) ~ 3.19(토)	<ul style="list-style-type: none"> 자위대 헬리콥터 및 소방대의 고압 소방차 등을 이용한 냉각수 살포 (별도로 원자로에의 해수 주입은 계속됨) 1~4호기는 상태는 악화하지 않고 소강상태 유지 5,6호기의 잔열제거계통 회복(3.19) 	극한 상황에서의 현상 유지
3.20~31	<ul style="list-style-type: none"> 20일 1,2호기부터 시작하여 22일까지 전 호기의 외부전력망이 연결되었으며, 24일까지 전 호기의 주제어실 내 조명 복구됨 연결된 외부 전원을 이용한 핵심 기기 가동을 위한 절차를 진행하고, 23일부터 원자로용기 온도 등 일부 추가 계측정보 확보 27일부터 1,2,3호기 원자로용기로 담수(Fresh Water) 주입 사고 상태가 전체적으로 회복 단계라 할 수 있으나, 방사성물질의 누출이 지속되고 대기, 해양, 토양 오염이 확산 	

후쿠시마 제1원전은 2011년 말에 이르러 전체적으로 안정된 상태를 확보하고, 중장기적인 로드맵에 따른 사고 후속조치에 들어갔다. 그러나 격납용기 내부로의 접근이 어렵고 원자로에 설치된 계측 기기들의 신뢰성에도 의문이 있기 때문에, 원자로 또는 격납용기 내부의 상태를 정확히 파악하는 것은 현재까지도 불가능하다. 여기서는 2012년 말까지 입수된 정보를 바탕으로 각 호기의 상황을 간단하게 살펴보고자 한다.



<그림 3.11> 후쿠시마 사고의 핵연료 냉각 및 전기계통 회복 과정[TEPCO(2012b)]

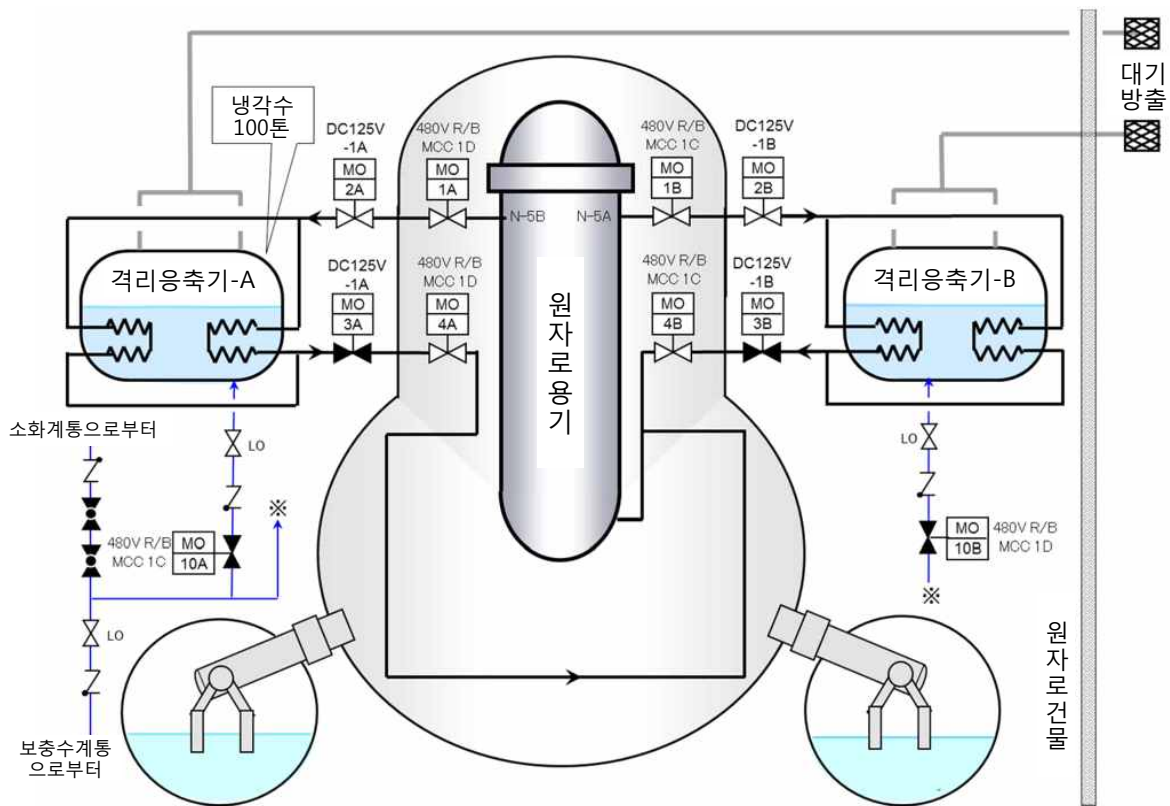


<그림 3.12> 후쿠시마 제1원전 사고의 전체적인 흐름

나. 1호기 노심 손상 및 중대사고 진행

1) 지진 발생 후 쓰나미 도달까지의 상황

동일본 대지진 당시 후쿠시마 제1원전에서는 JMA 진도 6 이상이 측정되었다(<그림 3.2> 참조). 주제어실에 적색의 경보등이 들어왔으며, 운전원은 모든 제어봉이 완전히 삽입되어 원자로가 자동 정지된 것을 확인하였다. 지진 경보와 화재 경보가 동시에 울렸으나, 운전원이 화재가 실제로 발생하지는 않았음을 확인하였다. 필요한 전기의 공급을 위해 전원을 발전소 외부(소외) 전원으로 전환하려 했지만²⁵⁾, 이미 지진으로 외부 전력망이 붕괴되었기 때문에 실패하였다. 결국, 원자로보호계통(Reactor Protection System; RPS)에 전원 공급이 되지 않아 격납용기 격리신호가 발생하였고, 이 때문에 급수 및 복수기 기능 상실이 일어나고 주증기격리밸브(Main Steam Isolation Valve; MSIV)가 닫혔다. 그러나 비상디젤발전기가 정상적으로 가동하여 안전계통에 전원을 공급하였고, 원자로 정지 후 출력 감소에 따라 증기 기포가 응축되어 원자로 수위는 감소했으나 정상 범위 내에서 유지되었다.



<그림 3.12> 후쿠시마 제1원전 1호기의 격리응축계통[ICANPS(2011)]

25) 정상 운전 중인 원전은 스스로 생산한 전기를 사용하지만, 원자로 정지 후에는 외부 전원에 의존해야 한다.

14시52분(T+0h06m)²⁶⁾, MSIV 격리에 의한 원자로압력용기 압력 상승으로 원자로 고압 신호가 발생하고, A, B 두 계열의 격리응축계통(<그림 3.12>)이 자동으로 기동되었다. 교대운전책임자는 운전원으로부터 1호기의 격리응축계통이 모두 정상 작동되고 있다고 보고받았다. 격리응축계통에 의한 노심 냉각으로 원자로 압력이 감소하기 시작했는데, 원자로 압력이 너무 빨리 감소하는 것을 인지한 운전원은 두 계열이 모두 운전될 경우 원자로 냉각속도가 냉각 관련 제한치인 시간당 55°C를 초과할 것으로 판단하였다. 이에 따라 표준운전절차서에 있는 대로 모터구동밸브(MO-3A와 3B)를 닫아 격리응축기를 일단 정지시킨 후, B-계열의 MO-3B 밸브는 닫힌 상태로 두고 MO-3A만을 개폐하여 A-계열만을 간헐적으로 운전함으로써 원자로 압력을 유지하였다.

2) 쓰나미 도달 이후의 원자로 냉각

15시27분(T+0h46m) 첫 번째 쓰나미가 후쿠시마 1호기에 도달하였다. 이후 계속된 쓰나미의 영향으로 취수구가 침수되고 손상되었다. 15시37분(T+00h51m) 터빈건물 지하가 침수되기 시작하여 비상디젤발전기(EDG) 및 교류(AC)/직류(DC) 분전반이 침수되거나 젖게 되었다. 결과적으로 교류 및 직류 전원이 모두 상실되고, 15시37분~50분 사이에 주제어실의 조명, 계측 및 제어 기능이 상실되었다. 기능을 잃은 계측기에는 노심 수위지시기와 고압안전주입계통 및 격리응축계통 관련 계기도 포함된다.

운전원은 휴대용 배터리와 손전등을 사용하여 비상운전절차서를 찾아보았으나 그 상황에서 직접 적용할 수 있는 부분은 없었다. 사고관리절차서도 검토하였으나, 지진이나 쓰나미와 같은 외부사건으로 비롯된 사고는 고려되어 있지 않았다. 또한, 절차서들은 모두 주제어실 제어관의 계기와 지시계가 작동한다고 가정하고 있었다. 결국, 운전원들은 발전소 상태에 대한 매우 제한적인 정보와 불충분한 지식에 의존하여 자신들의 판단으로 사고에 대처할 수밖에 없었다.

격리응축계통의 경우, 밸브의 개폐 상태를 지시계로부터 확인할 수 없었을 뿐만 아니라, 지진 발생 후 격리응축기계통을 운전하면서 반복적으로 개폐하였던 MO-3A 밸브의 최종 상태를 기억하지도 못하였다. 더욱이 운전원은 완전 전원 상실의 경우에는 IC 격리밸브가 Fail-Safe 개념²⁷⁾에 따라 닫히도록 설계된 것조차 인지하지 못하였다.

사고 후 수행된 동경전력의 IC 모터구동밸브 조사에서는 다음 사항이 확인되었다.

- A-계열 증기 차단밸브 MO-2A와 응축수 차단밸브 MO-3A는 완전히 개방되어 있었음.
- B-계열 증기 차단밸브 MO-2B와 응축수 차단밸브 MO-3B는 완전히 닫혀 있었음.

26) T+0h06m은 지진 발생 후 0시 6분이 지난 시간을 의미한다.

27) Fail-Safe: 전원 상실 등으로 기기가 정상적으로 작동할 수 없을 때는 안전한 상태로 가게 하는 설계 개념 (<표 2.6>의 설명 참조)

- 격납용기 내부에 위치한 격리밸브 MO-1A/4A, MO-1B/4B는 완전히 닫히지 않고 부분적으로 열려 있었음.(정확한 개방 정도는 확인되지 않음)

그러나 이러한 조사 결과로부터 사고 후 상황을 바로 알 수 있는 것은 아니다. 그 이유는 AC/DC 전원이 상실한 이후에도 간헐적으로는 DC 전원이 작동했고, 그 과정에서 운전원에 의해 관련 밸브의 개폐와 관련된 다양한 시도가 이루어졌기 때문이다.

어쨌든 운전원이 18시25분(T+03h39m)에 격리응축계통 수조로부터 방출되는 수증기를 관찰하지 못하자 수조 내의 냉각수가 고갈된 것으로 판단하고 밸브 MO-3A를 닫음으로써 격리응축기를 통한 붕괴열 제거 기능은 완전히 멈추었다. 이 조치는 응축기에서 냉각되지 않은 증기가 격리응축계통의 배관을 손상시켜 방사성물질로 오염된 증기가 대기로 직접 방출되는 것을 방지하기 위한 것이었다. 그런데 수증기가 관찰되지 않은 것은 수조 냉각수의 고갈 때문이 아니라, 격리밸브 등이 닫혀서 격리응축계통이 제대로 작동하지 않았기 때문이었을 것이다. 운전원은 복잡하고 다급한 상황에서 격리응축계통의 상태를 상부에 제대로 보고하지 못하였다. 이에 따라 1호기 총괄지휘관은 원자로가 격리응축계통에 의해 냉각되고 있는 것으로 생각하여 적절한 대응이 지연되었으며, 외부에서도 원전 내부 상태를 정확하게 파악하지 못하게 만든 중요한 원인이 되었다.

2011년 10월 18일 동경전력이 조사한 바에 따르면, 격리응축기 A와 B의 수조에 남아있는 냉각수의 양이 각각 65%, 85% 수준이었다. 통상적으로 80%의 냉각수가 있을 경우 냉각수가 추가 공급되지 않더라도 6시간 동안 계통을 운전할 수 있으므로, 많은 양의 냉각수가 남아있다는 것은 격리응축계통이 노심 냉각에 크게 기여하지 못하고 기능을 상실했다는 것을 뜻한다.

동경전력은 16시36분(T+1.8h) 전원 완전 상실에 따른 비상사태를 선언하고 정부 및 관련기관에 통보하였다. 16시42분경 원자로 광역 수위지시계가 작동하는 것을 인지했는데, 광역 수위 지시계의 수치가 유효핵연료상단(Top of Active Fuel; TAF) 기준 -90 cm였다가 -150 cm까지 계속 낮아진 후, 16시56분경 측정범위를 벗어났다. 운전원은 격리냉각계통이 제대로 작동하지 않는다고 판단하고 화재방호계통을 통해 냉각수를 주입하는 방법을 조사하기 시작하였다. 17시30분경에 디젤구동 소방펌프를 기동하고, 완전한 암흑 속에서도 소방방호계통부터 노심살수계통까지 연결하기 위해 원자로건물 내부의 밸브들을 정렬하였다. 그러나 원자로 압력용기의 압력이 0.69 MPa(100 psig)로 낮아질 때까지 원자로 냉각수 주입은 이루어지지 못하였다.

18시30분경 급수펌프로부터 보충응축수계통 라인을 통해 냉각수를 원자로에 주입할 수 있도록 수동으로 밸브들을 정렬하였다. 20시07분(T+5h21m) 주제어실 계기의 사용이 불가능하여 원자로건물의 현장계기로 원자로 압력이 6.9 MPa(1,000 psia)임을 확인하였다. 20시49분

(T+6.1h)에는 소형 휴대용 발전기를 설치하여 주제어실의 전등이 점등되었다. 같은 날 20시50분 후쿠시마현은 발전소에서 2 km 이내 지역의 주민들에게 대피 명령을 내렸다. 21시19분(T+6.5h) 주제어실에 원자로 수위가 표시되었는데, 유효핵연료상단에서 200 mm였다. 이 값은 나중에 신뢰성이 없는 것으로 확인되었지만, 원자로의 상태를 상당 기간 잘못 이해하게 만들었다. 3월11일(금) 21시23분(T+6.6h)에 일본 총리는 대피지역을 반경 3 km로 확장하고, 반경 10 km 이내의 주민은 대피소로 대피할 것을 명령하였다.

21시30분(T+6.7h)경에 전원이 일시 복구되었다. IC 계통의 상태와 운전 방식을 이해하게 된 운전원이 격리응축계통 A-계열을 재기동했지만, 그 후에도 의도한 대로는 작동되지 않은 것으로 판단된다. 설령 격리응축계통이 다시 작동했다고 하더라도 그 이전의 약 6시간 동안에는 노심 냉각이 이루어지지 않았고, 이미 대량의 노심 용융이 진행되었을 것이다.

21시51분(T+7.1h)에 원자로건물의 방사선량률²⁸⁾이 급격히 증가하여 접근이 금지되었다. 이는 원자로용기가 파손되고 및 격납용기도 과압에 의해 일부 손상되었기 때문으로 추정된다. 23시00분(T+8.2h)에 원자로건물 북쪽 통로의 기밀식(Air-lock) 출입문 외부에서 측정한 방사선량률이 1.20 mSv/hr로 상승하였고, 주제어실의 방사선량률도 상승하였다.

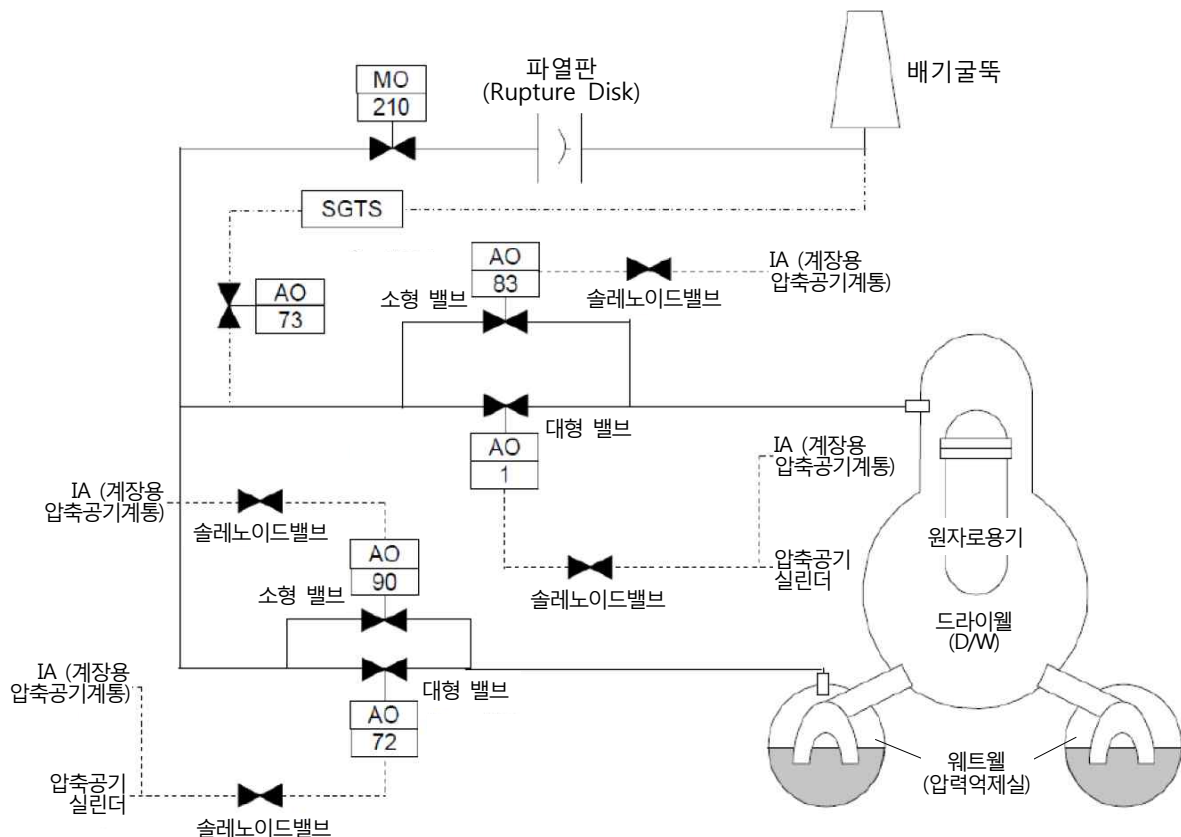
1호기의 경우 쓰나미로 인해 모든 교류전원과 직류전원을 함께 상실하였고, 이로 인해 핵심 안전계통인 고압냉각수주입계통(HPCI)과 격리응축계통이 제대로 작동하지 못하였다. 더욱이 격리응축기의 작동과 관련해서는 운전원의 판단 실수가 있었을 뿐만 아니라, 발전소 책임자를 비롯한 거의 모든 의사결정자들이 운전 상태를 오해하는 커다란 오류가 있었다. 또한 원자로 수위계의 오작동도 원자로 내부 상태의 이해를 어렵게 했는데, 그 당시 동경전력, NISA, JNES 및 일본 내부의 핵심 전문가들이 원전 상태를 어떻게 이해하고 있었는지는 분명하지 않다.

사고 후 이루어진 다양한 해석이나 분석에 따르면 1호기는 쓰나미가 들이닥친 이후 약 14시간 동안 냉각수 주입이 이루어지지 않았으며, 지진 발생 후 수 시간이 지나면서부터 용융이 시작된 것으로 보인다. 그리고 대부분의 노심이 용융되었고, 많은 양이 원자로용기 하부헤드를 뚫고 격납용기의 콘크리트 바닥으로 빠져나온 것으로 추정되며, 이는 사고 원자로에 대한 사후 조사 과정에서도 확인되었다. 이후 3월 12일 8시30분경부터 해수가 주입되었는데, 수일 후부터 소방차를 이용한 담수 공급이 이루어지고 외부 전력망이 복구됨에 따라 점차 안정을 찾게 되었다.

28) 생명체가 노출(피폭)되는 방사선량의 대표적인 단위는 시버트(Sv)이며, 이는 상당히 큰 값이어서 일상생활에서는 1/1000 Sv인 밀리시버트(mSv)가 주로 사용된다. 방사선량률은 단위시간당 피폭선량을 나타내며, mSv/hr, μ Sv/hr가 흔히 사용되는 단위이다. 미국에서는 아직도 재래식 단위인 렘(rem)을 사용하는데, 1 시버트는 100렘에 해당한다.

3) 격납용기 배기 및 수소가스 폭발

중대사고 시 격납용기는 방사성물질의 외부 대량 누출을 막는 최후의 보루이기 때문에, 이를 보호하기 위해서는 내부 압력을 적절하게 제어해야 한다. 전원 상실 등으로 원자로 냉각시스템이 제대로 작동하지 않거나 격납용기냉각계통이 작동하지 않으면 원자로의 열이 격납용기로 방출되면서 내부 압력이 증가하게 된다. 동경전력의 중대사고 관리전략에 따르면, 노심 손상이 일어나지 않은 상황에서는 격납용기 압력이 최대 운전압력에 도달하게 되면 배기(Vent)를 하도록 되어 있다. 그러나 노심이 손상이 진행되어 배기 시 방사성 물질의 외부 유출이 예상되는 경우에는 최대 운전압력의 2배가 될 때까지 배기하지 않는다. 격납용기의 배기 여부는 발전소 비상대응센터(Emergency Response Center; ERC)²⁹⁾의 책임자가 결정하는데, 정부의 사전 허가가 꼭 필요하지는 않더라도 정부의 동의를 얻도록 권고하고 있다. 1호기의 경우 배기의 필요성을 정부에 보고하여 동의를 얻었고, 3월 12일 오전 3시 기자회견을 통하여 국민에게 알리고, 오전 9시3분까지 주민 대피를 완료한 후, 9시4분 격납용기 배기를 시작하였다.



<그림 3.13> 1호기 격납용기 배기계통[NERHQ(2011a)]

29) 비상대응센터를 일본에서는 '긴급시대책본부(緊急時對策本部)'라 부르고 있다.

격납용기 압력이 상승하고 있다는 것은 임시 발전기에 의해 제어실의 일부 조명이 켜지고 격납용기 압력 계기가 작동하게 된 3월 11일 23시50분에야 처음 파악되었다. 당시 계기는 0.6 MPa(87 psi)를 가리키고 있었는데, 이 시점에서 이미 높은 방사선 선량으로 인해 원자로건물의 출입이 통제되고 있었다. 사고 초기에 격납용기 압력 상승을 조기에 파악할 수 없었던 것은 초기 대응을 제대로 취하지 못하는 하나의 원인이 되었다. 격납용기 배기는 3월 12일 14시30분 경까지도 여러 문제가 복합적으로 발생하면서 성공적으로 이루어지지 않았다. 배기 작업이 지연된 원인으로는 원자로건물의 높은 방사선량, 전력 공급이 없는 상황에서의 배기시스템 작동에 관한 비상절차서의 미비, 엔진구동용 공기압축기와 같은 장비의 준비 부족 등을 꼽을 수 있다.

3월 12일 2시30분경 원자로용기를 감압함으로써 원자로용기와 격납용기의 압력이 약 0.84 MPa(122 psia)로 같아졌는데, 여전히 소방차 펌프의 압력을 초과하는 값이었다. 이후 격납용기를 배기시키지 않는 한 원자로용기의 압력도 낮출 수 없는 상황이 진행되었고, 결과적으로 14시30분경까지는 원자로 내부로의 냉각수 주입이 불가능하였다.

격납용기 내부의 고온, 고압 상태가 오랫동안 지속하면서 격납용기 드라이웰 헤드 밀봉부(Seal)가 손상되거나 다른 관통부위, 배관 연결부 등에서 부분적인 손상이 발생했을 가능성이 높다. 이 때문에 격납용기의 수소가스가 원자로건물 내부로 누출된 후 원자로건물 상부에 모여 폭발을 일으켰을 가능성이 높다. 수소가스 폭발과 관련된 기술적인 내용은 뒤에서 다룬다.

다. 2호기 노심손상 및 중대사고 진행

1) 지진 발생 후 쓰나미 도달까지의 상황

지진 발생 직후의 진행은 1호기에서와 유사하다. 원자로는 자동으로 정지되었으며, 외부 전원의 상실로 원자로보호계통에 전원 공급이 되지 않자 격납용기 격리신호가 발생하고 주증기 격리밸브(MSIV)가 닫혔다. 이어서 비상디젤발전기가 정상적으로 기동되어 안전계통에 전기를 공급하였다. 14시50분에 급수펌프가 중단되었고, 운전원들은 정해진 운전절차에 따라 노심격리냉각계통(RCIC)을 수동으로 기동하였다. 원자로 수위가 증가하자 14시51분에 수동으로 RCIC를 중단했다가 15시02분에 수위를 감시하면서 재기동하였다.

MSIV가 닫히고 증기가 원자로에 축적됨에 따라 14시52분 경에 원자로 압력이 상승하여 “원자로 고압력” 신호가 발생했는데, 이때는 RCIC 이외에도 고압 냉각수주입계통(HPCI)이 존재하여 노심 냉각에 사용할 수 있는 상태였다. 15시01분경에는 원자로가 미임계³⁰⁾ 상태임

30) 축력 변화와 관련된 원자로 상태는 ‘미임계(Subcritical)’, ‘임계(Critical)’, ‘초임계(Supercritical)’ 상태로 구분할 수 있다. 핵분열 반응이 진행되고 있다면, 미임계 상태에서는 시간에 따라 줄어들고, 임계 상태에서는 일정하게 유지되며, 초임계 상태에서는 증가한다. 원자로가 일단 정지된 후 미임계 상태가 유지된다면, 핵분열 반응이 더 이상 일어나지 않는다.

을 확인하였다. 이즈음, 원자로 압력이 상승하여 안전방출밸브(SRV)의 개방과 폐쇄가 반복되었다. 그 결과 압력억제수조의 온도가 상승하여, 운전원들은 15시부터 15시07분 사이에 잔열 제거계통을 이용하여 압력억제수조를 냉각하고, 15시25분부터는 압력억제수조에 살수를 시작했다. 15시28분에 원자로 고수위가 다시 발생하여 RCIC가 자동정지 되었으나 약 11분 후 운전원들이 수동으로 재기동하였다.

2) 쓰나미 도달 이후의 진행

쓰나미에 의해 전원 상실을 일으키기까지는 1호기의 상황과 흡사하다. 15시41분경 모든 AC/DC 전원 상실로 주제어실의 조명, 계측 및 제어 기능이 상실되었으며, 15시50분경부터 원자로 수위를 포함한 모든 운전 변수들을 운전원들이 알 수 없게 되었다.

15시39분에 운전원들은 RCIC를 수동으로 기동했는데, 실제 작동 여부를 확인할 수는 없었다. HPCI도 지하 1층에 있던 HPCI용 DC 전원이 침수되어 작동할 수 없었다. 해수펌프, 격납 용기냉각계통 및 잔열제거계통도 쓰나미에 의해 파손되었고, 이후 원자로계통도 조금씩 침수되기 시작했다. RCIC의 작동 여부를 확인할 수 없었기 때문에 발전소장은 16시45분에 최악의 경우 비상노심냉각 기능의 완전 상실에 의한 노심 손상 가능성이 있음(즉, 비상사태)을 정부에 보고하였다. 운전원들은 원자로 수위지시계 작동에 필요한 전원 확보에 최우선 순위를 두고 노력을 경주하고, 격납용기 배기 및 화재방호계통, 또는 소방펌프(Fire Engine)를 이용한 노심 냉각수 주입 수단을 강구하기 시작했다.

21시40분경에는 2호기의 노심 수위가 유효 핵연료 상단(TAF) 아래로 낮아질 가능성이 있다고 정부에 보고했다. 22시00분에 작동된 2호기 노심수위지시계는 TAF 보다 3,400 mm 높은 값을 표시했는데, 1호기에서와 마찬가지로 신뢰하기 어렵다. 한편 3월 11일 자정 무렵에는 소방펌프를 이용한 냉각수 주입 경로가 마련되어, 원자로 압력이 0.69 MPa 이하로 떨어진다면 냉각수를 주입할 수 있는 상태가 되었다.

한편 격납용기 감압의 필요성이 제기되어 3월 12일 1시30분에 동경전력 사장이 격납용기 개방작업을 승인하였으나, 밸브 위치와 개방 방법을 파악하는데 수 시간이 소요되었다. 주제어실의 스위치만 누르면 밸브가 개방되는 일반적인 경우와는 달리, 이번에는 수동으로 밸브를 개방해야 하는데 사전에 이와 관련된 훈련이 이루어지지 않았기 때문이다.

3월 11일 밤부터 12일 새벽까지 RCIC의 작동 여부를 파악하기 위한 다양한 노력이 기울여졌고, 2시50분경에는 드디어 작동을 확인할 수 있었다. 또한, 소형 발전기를 연결하여 계측기 일부를 복구시키는 성과도 얻었다. 다수의 자동차 배터리를 연결한 전원을 이용하여 주제어실 계기판 복구를 시도했는데, 3월 11일 21시19분에 1호기 노심 수위지시계를 복구하고, 22시에는 2호기의 노심 수위지시계를 복구할 수 있었다.(자위대의 발전 차량이 3월 11일 21시28분 현장에 도착했지만 케이블의 규격이 맞지 않아 사용할 수 없었다.) 3월 12일 오전에는 현장

복구작업의 우선순위가 1호기 격납용기의 배기에 맞추어져서 2호기에 대한 복구작업은 적극적으로 이루어지지 못하였다.

3월 11일 밤부터 원전 1호기에서 방사성물질 누출의 징후가 나타나면서 작업 환경이 더욱 악화되었고, 특히 3월 12일 5시(T+14.2h)에는 운전원들에게 제어실 및 현장에서 모두 탄소필터가 부착된 마스크를 착용하라는 지시가 내려졌다. 그렇지만 긴급 복구 작업은 비교적 순조롭게 진행되어, 3월 12일 15시30분(T+24.7h) 임시 케이블을 사용하여 이동식 전원을 2호기에 연결하는 데 성공했다. 15시36분 1호기에서 수소가스 폭발이 발생할 때 운전원들은 2호기 대기액체제어계통의 전원을 복구하기 위해 현장에서 작업 중이었다. 그러나 폭발 파편으로 인해 케이블과 전원공급 차량이 손상되었으며, 현장작업이 연기되고, 작업자들은 비상대응센터(ERC)로 대피했다. 나중에 인공위성 사진을 분석한 결과에 따르면, 폭발로 인해 2호기의 배출패널(Blowout Panel)이 개방되면서 원자로건물 일부가 손상되었다. 다음 날 이동식 전원 차량을 재기동하는 과정에서 발전기가 손상되었는데, 저전압 전원은 손상되지 않았다.

3월 12일 오후에도 원자로 수위가 RCIC에 의해 계속 유지되었으나, 점차 상황이 악화하고 있었고 격납용기 배기가 필요한 상황이 예상되었기 때문에, 소방펌프에 의한 냉각수 주입, 화재방호계통을 이용한 해수 주입 등을 준비하였다. 3월 13일 오전에는 격납용기 압력이 설계 압력 근처로 유지되는 상태에서 배기를 시도했으나, 격납용기 압력이 파단판(Rupture Disk) 파열압력보다 낮아서 실제로 배기가 이루어지지지는 않았다.

3월 14일 11시1분(T+68.3h), 원전 3호기 원자로 건물에서 수소가스 폭발이 일어났다. 이 때문에 2호기 압력억제수조 배기밸브의 임시 전원공급장치가 훼손되고 밸브는 고장으로 닫혔다. 해수 주입을 위해 준비된 소방펌프와 호스도 폭발 파편에 훼손되었고, 모든 작업자가 ERC로 피신하여 현장작업이 중단되었다.

3월 14일 정오경에는 원자로 수위가 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 RCIC의 기능이 상실되어 감을 의미하였다. 소방펌프로 냉각수를 주입하기 위해서는 원자로를 감압시켜야 하지만, 압력억제수조가 이미 포화상태에 도달하여 격납용기 압력을 먼저 낮추지 않고서는 원자로용기 감압이나 화재방호계통을 통한 냉각수 주입이 불가능한 상태였다.

3월 14일 13시15분(T+70.3h)에 소방펌프와 호스를 이용하기 위한 준비를 시작하여, 곧 이를 이용한 냉각수 주입경로를 확보했다. 13시18분(T+70.5h)에 원자로 수위가 감소하기 시작했으며, 13시25분에 운전원들은 RCIC 기능 상실로 냉각수 주입이 중단되었다고 판단했다. RCIC를 재기동하기 위해 노력했으나 실패하였고, 격납용기 감압에도 온 힘을 기울였으나 계속되는 여진과 대피로 인해 작업이 지체되었다. 3월 14일 오후부터 해수 주입을 시도하고 격납용기 배기를 위한 다양한 수단을 강구하였으나, 3월 15일까지도 큰 성과를 거두지 못한 것으로 판단된다.

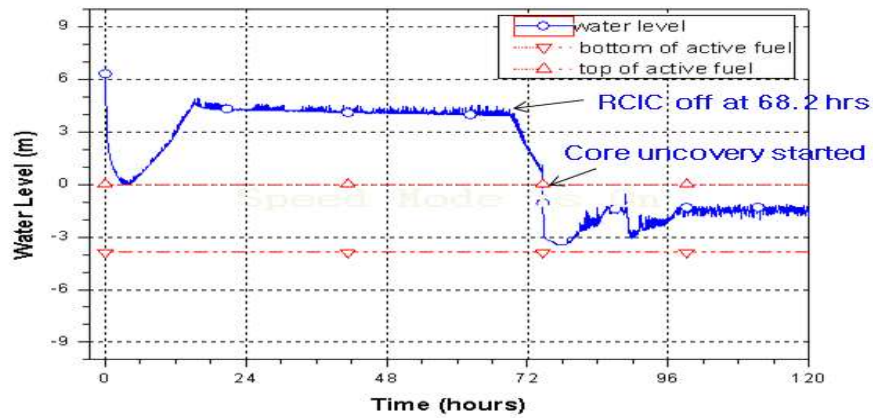
3월 15일 오전에는 4호기 원자로건물에서 수소가스 폭발이 있었지만, 2호기의 격납용기에서도 큰 소음이 들렸다. 후쿠시마 제1원전의 방사능 준위가 급격하게 높아져서 필수인원 70명을 제외한 모든 인원(약 650명)이 제2원전으로 대피하였다. 11시25분에 측정된 격납용기 압력은 0.155 MPa였는데, 이러한 격납용기 압력의 하강, 오전 6시경 들려 온 큰 소음, 배기배관의 징후 없음 등을 고려할 때 격납용기의 건조한 부분, 즉 드라이웰에서 부분적인 파손이 발생한 것으로 추정된다. 2호기 격납용기가 높은 압력 및 온도 조건에서 장기간 유지되었기 때문에 관통부나 플랜지 등 취약한 부분에서 손상이 발생했을 개연성이 높다. 특히 3월 15일 급격하게 높아진 방사능 준위는 2호기에서 격납용기로 방출된 방사성물질들이 압력억제수조의 물을 거치지 않고 격납용기 손상 부위를 통해 바로 대기로 배출되었기 때문으로 추정된다.³¹⁾

외부전원은 3월 20일 복구되었고, 3월 29일에는 원자로 해수 주입을 중단하고 담수(Fresh Water) 주입으로 전환하였다. 동경전력은 2호기에서는 RCIC가 약 70시간 작동하고, 그 이후 해수 주입이 이루어질 때까지 약 6시간 반 동안 냉각수 주입이 중단된 것으로 추정하고 있다. 이 경우에도 상당한 양의 노심이 용융되고, 일부는 격납용기 바닥으로 재배치되었을 것으로 판단된다. 2호기에서는 수소가스 폭발이 발생하지 않았고 원자로건물도 비교적 양호하게 유지되었음에도, 격납용기 배기에 실패하여 다량의 방사성물질을 방출한 것으로 추정되기 때문에, 그 원인과 경과 등에 대해 앞으로 분석이 필요한 것으로 판단된다.

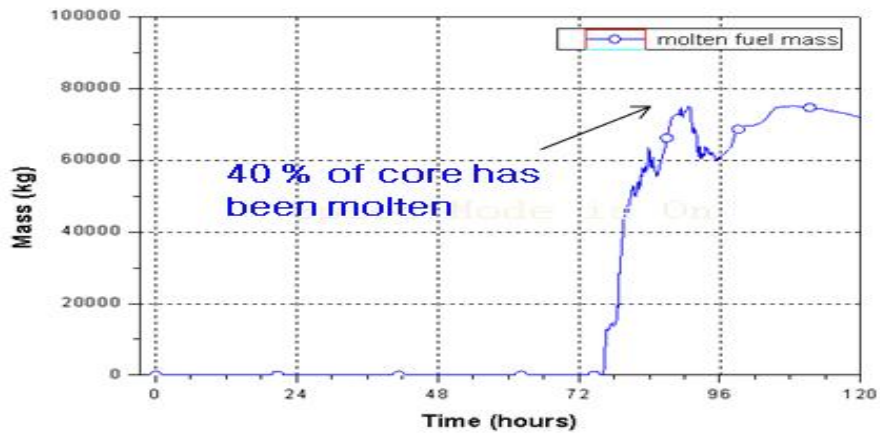
이에 따라 위원회에서는 중대사고 해석 코드(컴퓨터 소프트웨어)인 MAAP4를 이용하여 2호기의 중대사고 경위를 분석하여 보았다. 상세 분석을 위한 정보가 충분하지 않은 상황에서 많은 가정을 도입하여 수행하였으므로 분석 결과를 전적으로 신뢰하기는 어려우나, 전반적인 사고 진행을 이해하는 것에는 도움이 될 것으로 생각한다. 분석 결과(<그림 3.14>)에 따르면 RCIC가 정지되고 약 7시간 후에 노심 용융이 시작되고, 최종적으로 약 40%의 노심이 용융되었을 것으로 나타나고 있다. 본 분석에서는 RCIC가 정지되고 3시간 후부터 소방차에 의해 냉각수가 최대 4kg/sec 정도의 유량으로 주입되는 것으로 가정하였다. 또한, 만약 현재 의심되고 있는 바와 같이 2호기 격납건물의 드라이웰이 파손되었다면 환경으로 방출되는 CsI 분율은 노심 초기 재고량의 13% 정도인 것으로 나타나고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 분석에는 많은 가정이 사용되었으므로, 향후 관련 정보를 더 확보하여 추가 분석을 수행할 계획이다.³²⁾

31) 1호기와 3호기에서는 격납용기 배기가 압력억제수조로부터 이루어졌기 때문에, 많은 양의 방사성물질(특히 방사성 세슘)들이 물에 녹고 일부만 배출되었으나, 2호기에서는 격납용기 대기로부터 방사성물질이 외부로 직접 배출된 것으로 추정하고 있다.

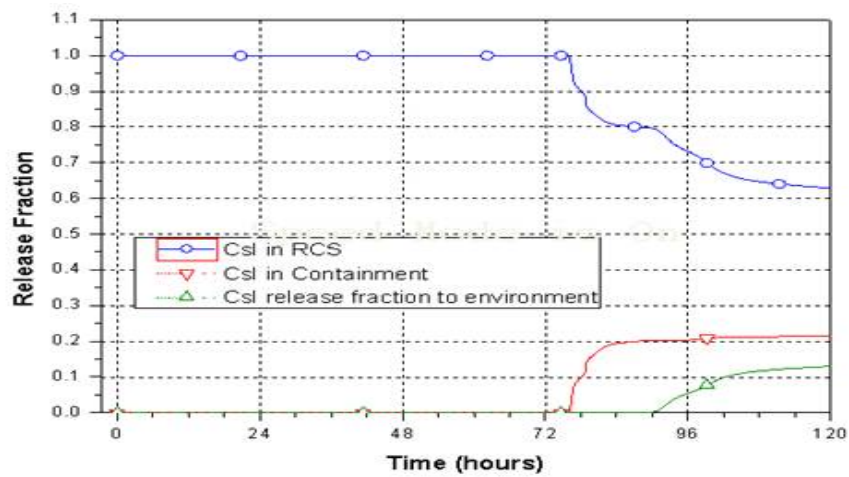
32) OECD 원자력기구(NEA)에서는 최근 후쿠시마 사고 분석을 위한 국제협력 프로그램인 BSAF(Benchmark Study for Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station)을 착수하였으며, 일본이 주관하고 한국, 미국, 프랑스, 독일, 러시아, 스위스, 스페인이 참여하고 있다.



(a) 원자로 냉각재 수위거동



(b) 용융 노심물질 질량



(c) 일차계통, 격납용기, 환경에서의 CsI 분포

<그림 3.14> MAAP4 코드에 의한 2호기 노심용융 해석 결과

라. 3호기 노심손상 및 중대사고 진행

1) 지진 발생 후 쓰나미 도달까지의 상황

동일본 대지진 직후의 상황은 1,2호기와 유사하다. 모든 제어봉이 삽입되면서 원자로가 자동으로 정지되었으며, 소외 교류전원 상실에 대응하여 2대의 비상디젤발전기가 기동하여 안전계통에 전력을 공급하였다. 운전원들은 지진에 의한 진동이 멈추기를 기다린 후 14시47분경 원자로의 자동 정지를 확인하였고, 주발전기의 높은 진동 때문에 주발전기용 터빈을 수동으로 정지시키고, 터빈 정지 절차를 원활히 하기 위해 복수기의 진공을 해제하였다. 14시54분에는 원자로가 미임계 상태임을 확인하였다.

15시05분, 운전원은 원자로 압력과 수위를 유지하기 위하여 노심격리냉각계통(RCIC)을 수동으로 기동하였다. 20분 뒤(15:25) 원자로 수위가 높아져서 RCIC가 자동으로 정지되었는데, 이에 따라 원자로 압력이 증가하여 안전방출밸브(SRV)가 자동 개방되었고, 배출된 증기는 압력억제수조로 방출되어 수온이 상승하였다. 운전원들은 격납건물열제거계통을 기동할 필요성을 느꼈지만, 당시 이미 경보가 발령된 쓰나미가 밀려왔다가 후퇴할 때 펌프가 손상될 가능성을 고려하여 당분간 펌프를 기동하지 않고, 쓰나미 도착한 후에 상황이 어떻게 변하는지를 지켜보기로 하였다.

2) 쓰나미 도달 이후의 진행

쓰나미로 인해 해수펌프, 분전반 및 비상전력 모선이 침수되었으며, 3호기 비상디젤발전기 두 대도 침수되었다. 15시38분(T+52m) 3호기의 모든 교류전원이 상실되고, 직류전원도 상당 부분 훼손되었다. 정상적인 주제어실 조명은 완전히 상실되었으나, 직류분전반이 침수되지 않았으므로 원자로 압력, 수위측정 지시 등을 위한 전원은 사용 가능한 상태였다. 3호기 운전원은 손전등을 사용하여 원자로 수위를 포함한 변수들을 감시하였다.

직류분전반이 침수되지 않았으므로 직류전원으로 운전되는 고압냉각수주입계통(HPCI)과 노심격리냉각계통의 운전이 가능하였다. 16시03분(T+1.3h), 원자로 수위가 낮아진 것을 확인하고 이를 회복하기 위해 RCIC를 수동으로 재기동하였다. 이를 통해 원자로의 수위를 유지할 수는 있었지만 저온정지 상태에 이르게 할 수는 없었다. 살아남은 직류 축전지(배터리)의 수명을 연장하여 냉각계통을 가능한 한 오래 운전하기 위해 불필요한 부하를 차단하였으며, 냉각수 주입을 위한 다른 대안도 모색하였다. RCIC의 운전이 중단된 후 재기동하려면 축전지가 많이 소모되므로 원자로 수위를 감시하면서 유량을 조절하여 운전이 중단되지 않도록 했고, 응축수저장탱크로 우회하는 시험 배관도 같이 사용하였다. 이에 따라, 원자로 수위는 유효핵연료 상단으로부터 약 4m 높이에서 유지되는 것으로 표시되었다. 21시58분 3,4호기 제어실의 조명을 회복하기 위하여 소형 이동발전기가 연결되었으며, 이 상태

는 저녁 내내 유지되었다.

3월 12일 11시36분 RCIC가 갑자기 정지한 후 재기동이 불가능하였다. 운전원은 3호기에 냉각수 주입을 준비하기 위해 소방차를 요청했으나, 모든 소방차들이 심각하게 진행 중인 1호기의 사고를 완화하기 위해 사용되고 있었다. 발전소 외부 소방차의 사용은 심각하게 파괴된 도로 사정으로 인해 불가능하였다.

RCIC가 정지된 1시간 후인 12시35분(T+21.8h), 낮은 원자로 수위에 따라 고압냉각수주입계통(HPCI)이 자동 기동하여 냉각수를 주입함에 따라 노심 수위가 회복되기 시작했다. 운전원은 원자로 고수위에 의한 정지를 방지하기 위하여 원자로 수위계측기, 고압냉각수주입계통 유량제어기를 감시하며, 유량 일부를 RCIC 운전 시의 방법과 동일하게 응축수저장탱크로 우회시켰다. 16시35분까지, 원자로 수위는 유효핵연료 상단으로부터 약 4.57m까지 회복되었다. HPCI가 원자로로부터 많은 양의 증기를 배출시켰기 때문에 원자로 압력이 상당히 감소하기 시작했다. 17시00분(T+26.2h)에 원자로 압력은 2.9 MPa(g)(421 psig)를 지시하며 계속 낮아지고 있었다. 19시경 원자로 압력은 0.8~1 MPa 범위에 있었다.

3월 12일 20시36분 축전지가 모두 소모됨에 따라 직류전원을 공급받는 계기는 성능이 떨어지거나 계측 불능 상태가 되었다. 20시27분부터 36분까지 사고 관리를 위해 필요한 드라이웰 압력, 압력제어실 압력, 압력제어실 수위 지시계, 원자로수위 지시계 등이 차례로 사용 불가능하게 되었다. 지시계 상실에 따라 운전원들이 원자로 수위를 실시간으로 계측하는 것이 불가능하였으므로, 충분한 냉각수가 주입되도록 HPCI 주입 유량 설정치를 증가시키고, HPCI의 운전 상태를 유지하기 위하여 펌프 출구압력과 원자로 압력을 집중적으로 감시하였다. HPCI는 원래 원자로가 1.03 MPa에서 7.75 MPa 범위의 고압에 있을 때 짧은 시간 동안 다량의 냉각수를 주입할 목적으로 설계되었지만, 3호기에서는 원자로 압력은 0.8~0.9 MPa 범위에 머무르는 상태에서 낮은 회전수로 장기간 운전되고 있었다.

HPCI의 출구 압력이 점점 감소하면서 원자로 압력에 가까워졌다. 운전원들은 원자로 수위를 모르므로 충분한 냉각수가 원자로에 주입되고 있는지 판단할 수 없었고, 정상에서 벗어난 조건에서 장기간 운전 중인 HPCI 기기의 고장 가능성도 걱정하게 되었다. 또한, 이들은 제어반에서 안전방출밸브의 운전이 가능한 것으로 판단하였으므로, 0.8~0.9 MPa 수준인 원자로 압력을 더 낮춘다면 디젤구동 소화수펌프를 이용하여 냉각수를 안정적으로 주입할 수 있을 것으로 생각하였다. 따라서 운전조는 원자로를 감압한 후 디젤구동 소화수펌프를 이용하여 냉각수를 주입하기 위해 HPCI를 수동 정지하기로 결정하였다. 이러한 내용은 발전소 비상대응센터의 일부 구성원에게만 통보되었는데, 비상대응조직의 책임자는 해당 내용을 파악하지 못하였고, 결과적으로 본부장과 다른 발전소 구성원, 동경 본사에서는 이 사실을 알지 못했다.

3월 13일 2시42분(T+35.9h) 원자로 압력이 0.58 MPa(g)(84 psig)일 때, 운전조는 HPCI를 정지시켰고, 2시45~55분 사이에 안전방출밸브를 원격 수동으로 개방하려고 시도했으나 실패하여 원자로 감압이 이루어지지 않았다. 나중에 전원이 복구된 후에는 밸브가 작동된 것으로 볼 때, 밸브 개방에 실패한 것은 구동에 사용되는 축전지 전원이 부족했기 때문으로 추정되고 있다. 축전지 상태를 파악하지 않고 HPCI를 미리 정지시킨 것은 3호기 사고 관리에서 중요한 실수로 간주되고 있다.

HPCI가 중단되고 안전방출밸브가 개방되지 않음에 따라, 원자로 압력이 소화펌프 배출압력(3시5분 0.61 MPa 도달) 이상으로 빠르게 상승하여 냉각수 주입이 불가능해졌다. 원자로 압력은 3시경에 0.77 MPa였고, 3시44분에는 4.1 MPa에 도달하였다. 또한, 냉각수 주입이 이루어지지 않음에 따라 노심 노출이 곧 시작된 것으로 추정된다. 이 때 고온의 증기와 핵연료피복재(지르코늄) 간의 반응이 시작되어 원자로용기 내부에서 다량의 수소가스가 생성되었다. 5시경 원자로 압력은 7.380 MPa(g)이었으며 감압이 시작될 때까지 7~8 MPa 범위로 유지되었다. 5시8분경 잔열제거계통으로부터 노심으로의 방출밸브를 닫고, 수동으로 압력억제수조의 살수를 기동하였다.

SRV의 개방을 위해서는 120 V 전원이 필요했지만, 당시 후쿠시마 제1원전에는 충분한 축전지가 없었다. 차량에서 사용되는 12 V 축전지 10개를 직렬로 연결하는 등 다양한 노력 끝에 3월13일 오후부터 냉각수를 주입할 수 있었다. 이와 함께 계속 상승하는 격납용기 배기를 위한 노력을 경주했는데, 전원 및 공기 공급 등의 문제로 크게 지연되었다. 격납용기의 압력은 3월14일 2시경 0.265 MPa(38.4 psia), 11시경 0.53 MPa(75.4 psia)로 계속 상승하였다.

3월 14일 11시1분에는 3호기 원자로건물에서 대형 수소가스 폭발이 일어났다. 이 폭발로 원자로건물 상부가 크게 파괴되었고 11명의 작업자가 부상을 당했다. 폭발로 인한 다량의 비산 파편물이 다수의 휴대용 발전기들과 임시 전원공급 케이블들을 손상시켰고, 소방차와 호스들의 손상으로 인해 해수 주입이 중단되었다. 주제어실 운전원의 작업을 제외하고 모든 작업이 중단되었으며, 작업자들은 인원 확인을 위하여 비상대응센터로 대피하였다. 사태가 안정된 후 16시30분에 새로운 주입을 위한 라인을 구성하고, 소방차들이 해수를 2,3호기 원자로에 직접 주입할 수 있도록 배치되었다. 소외전원은 사고 후 11일이 지난 3월22일 복구되었다.

3호기의 중대사고 진행 과정은 원자로 정지 후 약 36시간이 지난 시점인 3월 13일 2시42분 HPCI 기능이 상실되면서 본격화된 것으로 추정된다. 약 6시간 43분 동안 원자로에 냉각수 주입이 이루어지지 않았으며, 이에 따라 상당한 양의 핵연료가 용융되어 원자로 하부로 재배치되었고, 일부는 격납용기 바닥으로 방출된 것으로 추정되고 있다.

마. 4호기에서의 사고 진행

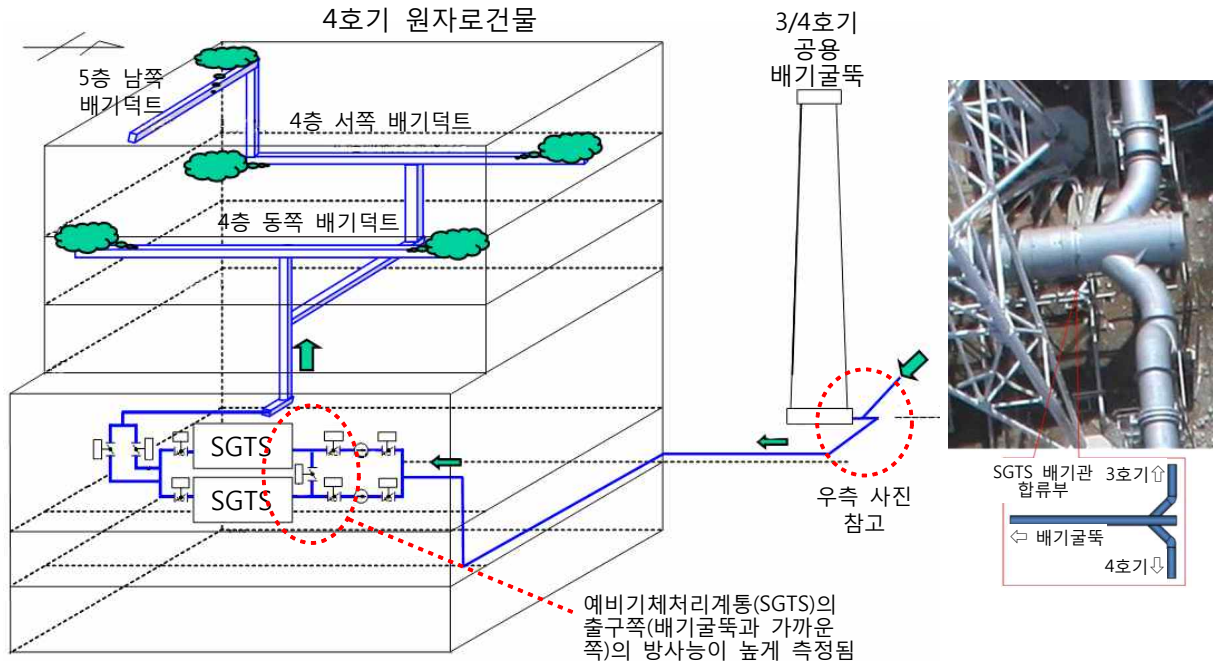
4호기는 2010년 11월 30일부터 정지된 상태였고, 내부구조물 교체작업을 위해 모든 핵연료가 원자로에서 제거되어 사용후연료저장조(SFP)에 보관되고 있었다. 원자로는 지진 당시 헤드가 제거되어 분리된 상태였고, SFP 냉각수 온도는 약 27°C였다.

지진과 쓰나미 이후 3,4호기 제어실 운전원 대부분은 3호기를 안정시키는데 초점을 맞추어 노력하고 있었다. 4호기 SFP의 붕괴열이 높았지만, 운전원들은 SFP에 냉각수를 추가로 공급하는 등의 즉각적인 관심을 기울이지 않았다. 그런데 3월 15일 6시경 4호기 원자로건물에서 수소가스 폭발이 발생하였다. 이것은 SFP에서의 수소가스 발생 가능성을 우려하지 않았던 대부분의 사람에게 예상 밖의 일이었다.

4호기 원자로건물에서 수소가스 폭발이 일어나자 처음에는 사용후연료저장조 내의 사용후연료들이 노출되어 공기와 반응하면서 수소가스를 발생시킨 것으로 의심하였다. 자연스럽게 다른 사용후연료저장조에서도 냉각수 고갈로 인해 사용후연료의 안전성이 위협받을 가능성이 제기되었다. 따라서 1~4호기의 SFP에도 물대포나 헬리콥터를 이용한 냉각수 공급이 추진되었다.

특히 4호기 사용후연료저장조는 수소 폭발로 인해 구조적인 건전성이 훼손된 상태여서, 냉각수 공급뿐만 아니라 구조물 보강 필요성도 제기되었다. 나중의 분석과 검사를 통해 4호기 SFP에서는 냉각수 수위가 핵연료 높이 이하로 떨어지지 않았고, 심각한 핵연료손상도 발생하지 않았다는 것이 밝혀졌다. 그렇지만 지진 등으로 저장수조 구조물에 틈이 생겼거나 수소가스 폭발이 유사한 영향을 가져왔다면 대량 방사성 물질의 유출이 충분히 가능한 상황이었다.

4호기 수소가스 폭발의 원인과 관련하여 여러 가설이 있으나, 가장 넓게 받아들여지는 것은 3호기 배기관으로부터의 배기가스 역류와 관련이 있다. 3호기와 4호기의 격납용기의 배기관은 같은 배기 굴뚝을 공부하며 서로 연결되어 있다(<그림 3.15>). 4호기 예비기체처리계통(Standby Gas Treatment System; SGTS)의 댐퍼(Damper)들은 전력이나 공기 상실 시 개방되는(Fail-Open) 밸브였다(SGTS 필터 트레인 상호연결배관은 제외). 또한, 이 계통은 4호기 연결 배관에 역류 방지 댐퍼를 가지고 있지 않았다. 이로 인해 3호기 격납용기를 배기시키는 과정에서 역방향 유로를 타고 4호기 예비기체처리계통을 통하여 4호기 원자로건물로 이동한 것으로 추정된다. 2011년 8월 동경전력에서 4호기 예비기체처리계통 필터들의 방사능을 측정했는데, 배기굴뚝에 가까운 쪽에서 높은 방사능이 측정됨으로써 가설을 뒷받침하였다.



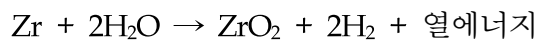
<그림 3.15> 4호기 예비기체처리계통을 통한 수소가스 이동 경로[NERHQ(2011a)]

바. Mark-I 격납용기와 수소가스 생성 및 폭발

1) 중대사고시 노심에서의 현상과 수소가스 생성

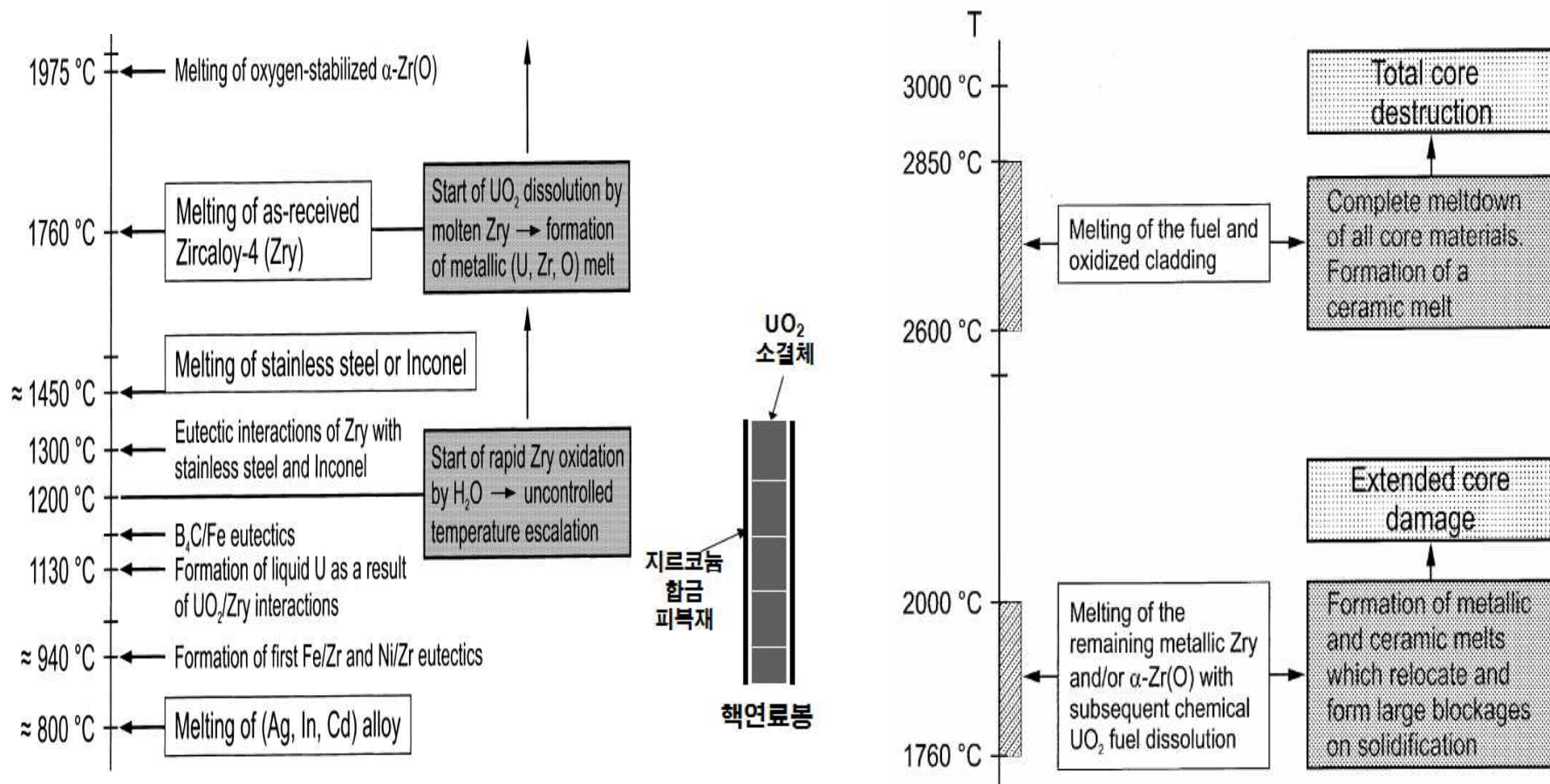
원자로 냉각수 공급이 부족하여 노심(핵연료)이 노출되면, 노출 부위에서는 붕괴열이 충분히 제거되지 못하므로 핵연료봉의 온도가 급상승한다. <그림 3.16>은 온도 상승에 따라 경수로(가압경수로, 비등경수로)에서 나타날 수 있는 노심 재료의 용융 및 화학 반응과 노심 손상 거동을 종합적으로 예시하고 있다.

고온의 지르코늄(Zr) 합금 피복재와 수증기가 반응하면 다음과 같이 수소가스를 발생한다.

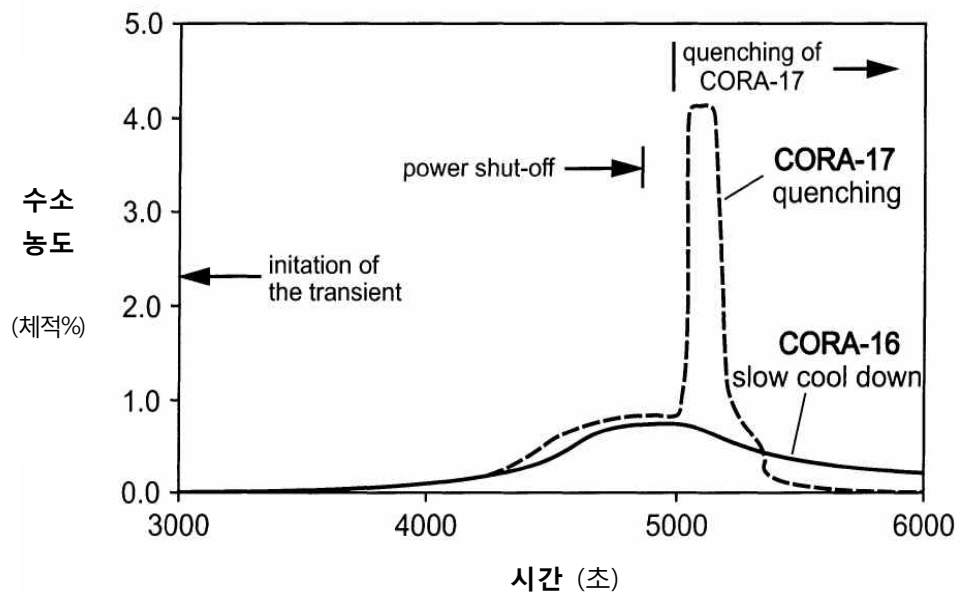


지르코늄 1 kg당 약 0.043 kg의 수소와 약 5.8 MJ의 산화열(상온 기준)이 발생한다. 발열 반응이기 때문에 피복재 온도가 일정 수준 이상에 도달한 다음부터는 산화현상이 가속화되면서 수소가스의 생성량이 증가할 뿐만 아니라, 연료봉 온도도 계속 상승하게 된다.

연료봉 온도가 상승하면 이산화우라늄(UO₂) 소결체(Pellet) 안에 있던 기체 상태의 핵분열생성물이 핵연료와 피복재 사이의 간극(Gap)으로 이동한다. 이로 인한 연료봉 내부 압력 증가로 핵연료 피복재가 부풀어(Ballooning) 어느 임계점에 도달하면 피복재가 파손되며, 이때 간극 내에 있던 핵분열생성물(주로 기체 상태)이 원자로 냉각재로 소량 방출된다.



<그림 3.16> 원자로 노심에서 온도에 따른 노심 손상 거동[Hofmann(1999)]



<그림 3.17> 과열 노심에의 냉각수 주입 속도에 따른 수소가스 발생량 비교[Hofmann(1999)]

파손된 피복재 부위를 통해 수증기가 연료봉 안으로 들어가면 피복재의 외부뿐만 아니라 내부에서도 수증기와 산화반응이 일어난다. 이 때 산화열은 피복재 온도를 더욱 높여 산화반응을 가속시키는데, 피복재 온도가 1,400~1,500°C 수준이 되면 상승작용이 가속화되어 결국 용융으로 이어진다. 피복재로 사용되는 지르코늄 합금이 녹는 온도는 약 1,760°C, 핵연료인 UO_2 소결체가 녹는 온도는 2,600~2,850°C 수준이다. 그런데 일단 피복재가 녹고 난 후에는 UO_2 가 용융상태의 지르코늄 합금으로 녹아들어가는 현상(Dissolution)이 나타나므로, 원자로에서 UO_2 는 소결체 자체의 용융점보다 훨씬 낮은 온도에서부터 녹기 시작한다고 할 수 있다.

한편, 손상된 노심을 냉각하기 위해서는 원자로 내부에 냉각수를 주입해야 하는데, 과열된 노심에 냉각수를 주입하면 수소가스가 급격하게 발생하므로, 그 위험성이 지적되어 왔다. 관련 실험 자료를 보여주는 <그림 3.17>에서도 볼 수 있듯이, 노심을 천천히 냉각시킬 때보다 급격히 냉각시킬 때 수소가스가 많이 생성된다. 노심의 용융이 상당히 진행된 이후라도 원자로에는 상당한 양의 지르코늄이나 다른 금속물질들이 남아 있으므로, 이 문제는 중대사고 관리 전략 수립을 어렵게 하는 요인이 된다.

2) 수소가스 폭발

후쿠시마 제1원전 1~5호기에 사용된 Mark-I 격납용기는 Mark-III 격납용기나 가압경수로 격납용기와는 달리 원자로 출력에 비해 격납용기의 체적이 작으므로, 중대사고(노심용융사고) 시 생성되는 수소가스가 격납용기로 방출되기 시작하면 짧은 시간 안에 폭발을

일으킬 수 있는 농도에 도달한다. 따라서 수소가스가 격납용기로 배출되기 이전에 질소가스를 채워서 폭발을 방지하는 개념을 채택하고 있다. 그러나 압력억제수조(웨트웰)가 포화 상태에 도달한 이후에는 격납용기 압력이 매우 쉽게 상승하므로 신속하게 배기시켜야 격납용기 건전성을 유지할 수 있다.

매우 가벼운 수소가스의 경우 개방 공간에서는 빠르게 흩어지지만, 폐쇄 공간에서는 천장 쪽에 축적되어 농도가 높아진다. 연소 시에는 발열량이 매우 커서 화염 온도가 높고, 다양한 반응 경로에 의한 반응 속도가 매우 빠르며, 폭발 범위도 넓다. 또한, 가벼운 특성 때문에 공기 중에서 연소할 경우 열에너지의 전달보다 물질의 확산이 3배 정도 빨리 진행되므로, 일단 연소가 진행된 후에는 화염을 소멸시키기가 매우 어렵다.

공기 중에서 수소가스의 연소는 약 4%의 농도에서부터 시작되는데, 낮은 농도에서는 불완전 연소가 일어나고, 8% 이상에서는 완전 연소가 일어나며, 10% 이상의 높은 농도에서는 폭굉(Detonation)으로 이어지는 폭발적인 연소 반응이 일어난다. 따라서 후쿠시마 원전과 같이 원자로건물에 수소가스 제어 설비가 갖추어지지 않은 경우, 일단 상당한 양의 수소가스가 방출된 다음에는 구조물의 상부에 포집되어 폭발이 일어나는 것이 필연적이라 할 수 있다. 이번 사고에서는 3차례의 대형 수소가스 폭발이 발생한 원인은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- ① 노심 냉각이 장시간 이루어지지 않아 많은 양의 핵연료가 용융하는 단계에 이르면서 대부분의 지르코늄 합금 피복재와 노심 내 다른 금속물질의 산화로 인해 많은 양의 수소가스가 생성됨
- ② 질소가스 주입으로 격납용기에서의 수소가스 폭발은 억제되었으나, 배기 작업의 지연 또는 실패로 격납용기가 장시간 동안 고온·고압상태로 유지되면서 취약한 부분이 일부 손상되면서 수소가스가 원자로건물로 누출되어 건물 상부에 축적됨
- ③ 격납용기 배기 과정에서도 배관의 취약 부위를 통해 원자로건물로 수소가스가 누출되었을 것으로 추정되며, 특히 4호기 수소가스 폭발은 3호기에서 생성된 수소가스가 공통 배기관을 통해 역류하여 비롯된 것으로 판단됨
- ④ 원자로건물 상부는 수소가스 농도 제어를 위한 설비가 전혀 없는 밀폐 공간이었으므로, 수소가스 농도가 쉽게 상승하여 대형 폭발을 일으킴

수소가스 폭발에 대한 상세한 평가를 위해서는 원자로 내 수소가스의 생성량, 원자로용기 및 원자로건물 내 수소가스의 방출 경로 등에 대한 상세한 평가를 통한 수소가스 분포 해석이 이루어져야 하며, 구조물 상부에 축적된 수소가스의 폭발 가능성, 폭발에 의한 압력파의 생성 및 구조물의 건전성에 대한 평가 등이 필요하다.

사. 사용후연료저장조 냉각 문제

1) 사고 전 상황

후쿠시마 제1원전에서는 호기별 사용후연료저장조, 공용 사용후연료저장조 및 부지 내 건식저장시설에 사용후연료를 저장하였다. 원자로에서 사용된 핵연료는 최소한 19개월 이상 원자로건물 상부에 위치한 호기별 저장조에 보관하고, 붕괴열과 방사능이 어느 정도 낮아진 다음 공용 저장조로 이송하여 장기간 보관한다. 호기별 저장조와 공용 저장조는 사용후 핵연료집합체들을 대량의 물 속에 잠기게 하여 붕괴열 제거와 방사선 차폐를 달성하는 습식(Wet) 저장시설이다. 후쿠시마 제1원전은 당초 공용 저장조에서 충분히 냉각된 사용후연료는 로카쇼무라에 건설되는 재처리시설로 이관할 계획이었으나, 로카쇼무라 시설이 지연됨에 따라 사용후연료 운반용기를 이용하여 부지 내에 건식 저장시설을 운영하게 되었다.

<표 3.3>은 사고 당시 호기별 저장조에 보관되어 있던 핵연료집합체의 수와 저장조의 냉각수량을 요약하고 있다. 저장조는 평상시 지속적으로 냉각하면서 붕괴열을 제거하지만, 수조 내에 많은 양의 냉각수가 있으므로 사고나 고장으로 외부 냉각이 이루어지지 않더라도 적어도 수 일 동안은 연료봉들이 노출되지 않고 견딜 수 있다. 그러나 수조 구조물의 붕괴 또는 균열 등 다른 요인으로 냉각수가 유실되는 경우에는 연료봉이 공기에 노출되면서 급격한 산화 반응을 일으킬 수 있다. 특히, 4호기의 경우 원자로 정비를 위해 노심에 있던 모든 연료봉들도 저장조로 옮겨와서 다른 저장조에 비해 집합체의 수도 많고 열 부하도 컸기 때문에 수소가 폭발 후 한 동안 사용후연료저장조의 안전성에 대한 큰 우려를 불러일으켰다.

한편, 후쿠시마 제1원전 부지 내 사용후 핵연료집합체의 약 60%인 6,375개가 공용 사용후연료저장조에 있었다. 이 공용 저장조에는 저장 용량의 80%에 달하는 많은 핵연료집합체들이 저장되어 있었으나, 각 집합체의 붕괴열이 매우 낮은 수준이었기 때문에 안전에 대한 큰 우려는 없었다. 건식 저장시설에는 9개의 저장조에 408개의 사용후 핵연료집합체가 저장되어 있었는데, 이들은 별도의 냉각시스템을 필요로 하지 않는다.

<표 3.3> 사고 당시 호기별 사용후연료저장조의 상태

구 분			1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	6호기
핵연료 집합체 수(개)	노심 내		400	548	548	0	548	764
	사용후연료 저장조	사용후연료	292	587	514	1,331	946	876
		새 연료	100	28	52	204	48	64
냉각수의 양, m ³			1,020	1,425	1,425	1,425	1,425	1,500

2) 사고 후 상황

후쿠시마 제1원전 각 호기의 사용후연료저장조가 사고 발생 시점부터 안정화되기까지의 과정은 다음과 같다.

1호기

대지진과 쓰나미에 의해 모든 교류전원이 상실되고 해수펌프의 기능도 상실되면서, 사용후연료저장조의 냉각 기능과 냉각수 보충 기능을 상실하였다. 3월 12일 1호기의 수소가스 폭발에 의해 원자로건물이 파손되었고 건물 천정의 일부가 저장수조의 위쪽으로 떨어졌다. 이후 콘크리트 펌프 트럭에서 저장조로 물이 살수되고, 이어서 정화계통 및 담수 수원에서 배관을 통해 저장조에 냉각수를 주입하면서 수위가 유지되어 핵연료 노출은 일어나지 않았던 것으로 추정된다. 2011년 8월 10일 이후 대체 냉각시스템을 구성하여 작동함으로써 안정적인 수조 온도를 유지하게 되었다.

2호기

다른 호기들과 마찬가지로 대지진과 쓰나미에 의해 사용후연료저장조의 냉각 기능과 냉각수 보충 기능을 상실하였다. 3월 12일 1호기 원자로건물의 수소가스 폭발로 2호기 원자로건물의 배출패널이 손상되었다. 3월 20일 이후 저장조 냉각시스템 및 정화시스템 배관을 통해 해수를 주입하였으며, 3월 29일부터 해수 주입이 담수 주입으로 대체되었는데, 저장조에서의 핵연료 노출은 일어나지 않았을 것으로 추정된다. 2호기는 원자로건물에서 수소가스 폭발이 없었기 때문에 다른 호기들에 비해 빠른 3월31일 대체 냉각시스템을 구성하여 작동함으로써 안정적인 수조 온도를 유지하게 되었다.

3호기

다른 호기들과 마찬가지로 대지진과 쓰나미에 의해 사용후연료저장조의 냉각 기능과 냉각수 보충 기능을 상실하였다. 3월 14일의 3호기 수소가스 폭발로 인해 원자로건물의 외벽이 모두 파손되었으며, 다량의 잔해가 사용후연료저장조로 떨어졌다. 3월 17일 자위대의 헬리콥터를 이용하여 원자로건물의 상부에 해수를 살수하기 시작하였고, 같은 날 살수 트럭을 통한 살수도 시작되었다. 3월 27일 콘크리트 펌프로 냉각수를 주입하기 시작하였고, 4월 26일에 기존의 저장조 냉각 및 정화시스템 배관을 통한 냉각수 주입을 시작하였다. 이와 같은 노력으로 저장조의 수위가 유지되어 핵연료 노출은 일어나지 않았을 가능성이 매우 높다. 그렇지만 수소가스 폭발 시 원자로건물의 파편들이 저장조로 떨어질 때 사용후연료가 일부 손상되었을 가능성을 배제할 수는 없다. 6월 30일 이후 대체 냉각시스템을 구성하여 작동함으로써 안정적인 수조 온도를 유지하게 되었다.

4호기

다른 호기들과 마찬가지로 대지진과 쓰나미에 의해 사용후연료저장조의 냉각 기능과 냉각수 보충 기능을 상실하였다. 3월 15일의 4호기 수소가스 폭발로 원자로건물의 상부 벽과 다른 부분이 파손되었다. 3월 20일부터 자위대 살수 트럭이 정기적으로 담수를 살수하였고, 6월 16일 임시 냉각수 주입시설을 이용한 냉각수 주입을 시작하였다. 저장조의 물을 채취하여 방사능 핵종을 분석한 결과와 촬영된 영상들에 근거할 때, 수조 내의 사용후핵연료는 대부분 건전한 것으로 평가되었다. 그렇지만 수소가스 폭발 시 원자로건물의 파편들이 저장조로 떨어질 때 사용후핵연료가 일부 손상되었을 가능성을 배제할 수는 없다. 7월 30일에는 저장조의 바닥에 지지구조물을 보강하는 작업을 완료하여 지진에 대비한 안전성을 강화하였다. 7월 31일 이후 대체 냉각시스템을 구성하여 작동함으로써 안정적인 수조 온도를 유지하게 되었다.

3.3 사고 확대 억제 및 안정화

가. 초기 대응을 통한 사고 확대 억제

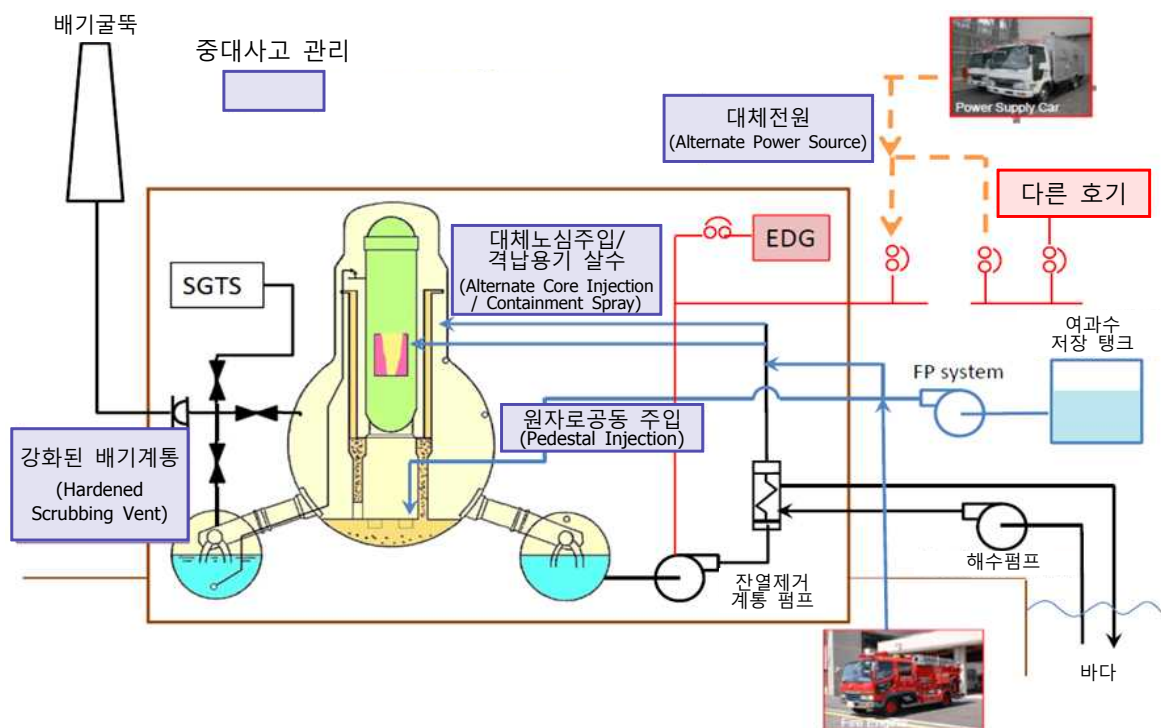
일본은 1992~2002년 사이에 원자력발전소 중대사고 관리전략을 수립하였는데, 비등경수로에서 채택한 핵심 내용을 <표 3.4>에 요약하였다. 또한, 핵심적인 중대사고 관리 전략을 <그림 3.18>에 예시하였다.

<표 3.4> 일본의 비등형경수로 중대사고 대응 전략

안전 기능	관리 목표	노심 손상 방지	노심 손상 완화
원자로/격납용기 냉각수 주입	원자로 감압	자동 감압 계통	
	냉각수 대체 주입	소방수계통, 냉각수여과계통, 냉각수보충계통	
격납용기 열 제거	격납용기 배기	강화된 배기계통(Hardened Vent System)	
	잔열제거계통 복구	잔열제거계통 복구	
수소가스 폭발 방지	격납용기 내 폭발 방지	격납용기 질소 주입	
SBO시 전기 공급	전기 공급	인접호기와의 전력망 연결 등 대체전력계통	

한편, 후쿠시마 제1원전에는 카시와자키-카리와 원전 시설에 화재를 일으킨 2007년 니가타 지진 후속조치의 하나로, 발전소 내 화재 대처 능력을 키우기 위해 3대의 소방차가 구비되어 있었다. 이 소방차들은 원자로 저압 주입을 위한 대체 냉각수원으로도 사용하게 되어 있었다. 그렇지만 지진과 쓰나미의 영향으로 단 한 대만 사용 가능하였고, 냉각수 주입을 위한 유로를 확보한 다음에도 소방차의 방출 압력이 원자로 압력을 극복하지 못하여 냉각수 주입이 쉽지 않았다. 몇 번의 시행착오를 거친 후 소방차와 화재방호계통을 활용하는 임시 시스템을 구성하여 해수를 주입하였다. 사고 초기에 운전원들이 해수 주입을 적극적으로 고려하고 최선을 다했는지에 대해서는 일부 논란이 있다.

사고관리전략에 따라 1~3호기 격납용기로의 질소 주입과 원자로 내부 및 격납용기로의 냉각수(초기에는 해수) 주입이 지속 시도되었다. 여기서 노심으로의 냉각수 주입은 주로 노심살수계통(Core Spray; CS)을 통하였으므로, 원자로용기 하부가 일부 손상되어 냉각수가 계속 유실되었더라도 부분적으로는 노심 냉각 기능을 할 수 있었을 것이다. 그리고 비등경수로 노심 손상 과정에서 제어봉도 손상될 가능성이 높으므로, 해수에 중성자 흡수물질인 붕소(^{10}B)를 섞어서 주입한 것으로 보고되고 있다. 사고 초기 원자로, 격납용기, 사용후연료 저장조로의 냉각수 주입을 위해 소방차, 임시 펌프, 콘크리트 펌프 트럭, 헬리콥터 등이 다양하게 시도되었고, 이 과정에서 일본 자위대가 위험을 무릅쓰고 큰 역할을 하였다.

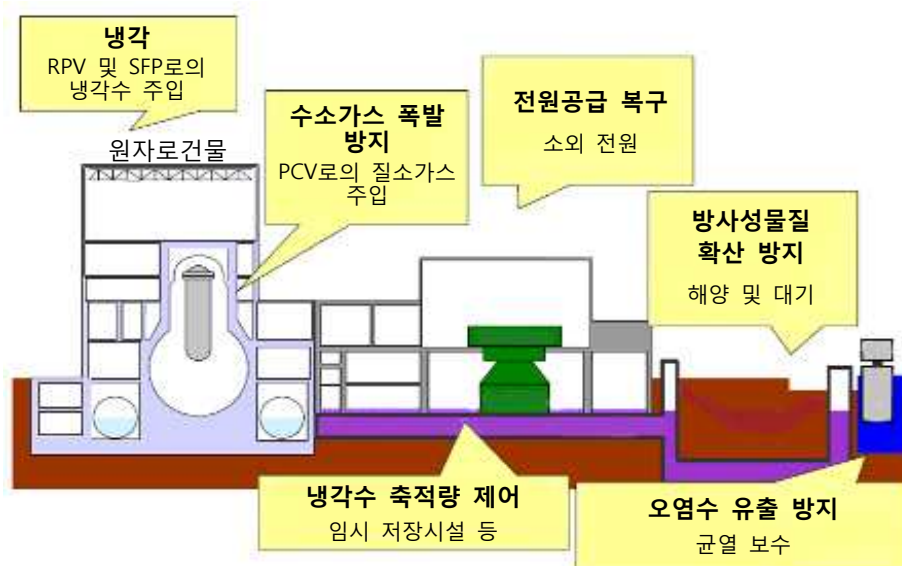


<그림 3.18> 중대사고 관리 전략의 예시[Omoto(2011)]

쓰나미 직후 냉각 기능이 상실되어 노심 용융이 진행된 것으로 평가되는 1호기의 경우는 원자로건물에서 수소가스 폭발이 발생한 3월 12일 저녁부터 해수 주입을 시작하였으므로, 그 이후에는 원자로용기 내부와 격납용기에 분산된 노심 잔해물(Core Debris)에서 방출되는 붕괴열을 계속 제거했을 것으로 보인다. 이어서 3호기 노심으로의 해수 주입이 3월 13일 낮부터 시작되었는데, 해수 주입에도 불구하고 3월 14일 11시01분 수소가스 폭발이 발생하였다. 주입된 해수가 초기에는 손상된 노심의 냉각에 기여하지 못했을 수도 있고, 냉각에는 기여했지만 수소가스 생성이 계속되었을 수도 있다. 또는 <그림 3.16>에서 보는 바와 같이 갑작스러운 냉각수 주입으로 인해 오히려 수소가스 생성이 급격하게 증가시켜서 수소가스 폭발을 촉진시켰을 수도 있다. 2호기에 대한 해수 주입은 가장 늦은 3월 14일 저녁부터 시작되었다. 2호기에서는 수소가스 폭발이 발생하지 않았으나, 격납용기의 고온·고압 상태가 오랫동안 유지되면서 배기가 이루어지지 않았기 때문에 3월 15일 아침에 부분적인 손상이 일어난 것으로 추정되고 있다.

3월 17일부터는 발전소 상황이 더 악화되지 않고 소강상태를 보였다. 3월 20일부터 22일까지 전 호기에 외부전력망이 연결되었고, 24일까지 주제어실의 조명이 복구되었다. 또한, 3월27일부터는 해수를 대신하여 담수를 주입하게 됨으로써 초기의 긴박했던 상황에서 벗어났음을 상징한다.

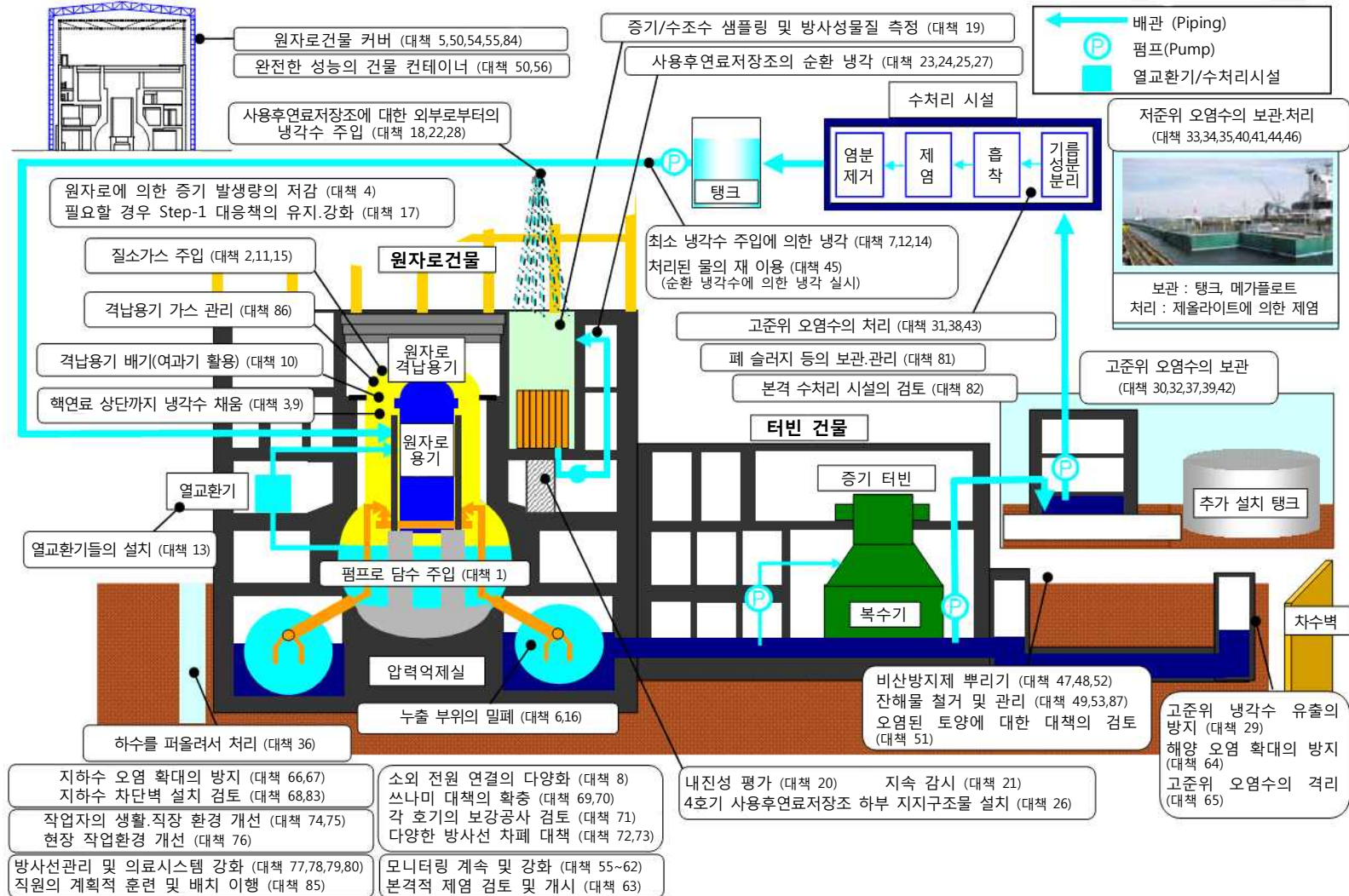
앞에서 한 설명은 주로 노심 냉각에 초점을 맞추었다. 그런데 실제 현장에서는 터빈건물로 유출된 다량의 방사능 오염수 관리 등 다른 역무들이 다수 있었다. <그림 3.19>는 사고 초기 다양하게 취해진 수습 조치들을 잘 보여주고 있다.



<그림 3.19> 후쿠시마 사고 시 초기 수습조치 요약[Masui(2011)]

과 제		초기 조치 (2011/4/17 시점)	STEP 1 (3개월 정도)	STEP 2 (2011년 내)	2011/12/16 ▼	중기적 과제 (~3년 정도)
I 냉각	(1) 원자로	담수 주입	최소한의 냉각수 주입에 의한 핵연료 냉각	냉각수 순환 냉각 (개시)	저온정지 상태	저온정지 상태의 유지 계속
			누출되어 축적된 물의 재사용 검토 및 준비			
	(2) 연료 수조	담수 주입	질소 충전	질소 충전(계속)	더욱 안정적 냉각	질소 충전(계속)
			작업 환경 개선			구조재 부식 파손 방지
II 억제	(3) 축적된 오염수	방사능이 높은 오염수의 이동	보관/처리시설 설치	시설 확충 / 본격적 수처리시설 검토	오염수 전체 축적량 감소	본격적 수처리시설 설치
				제염 / 염분처리(재이용) 등		축적 오염수 처리 계속
	(4) 지하수	방사능이 낮은 오염수의 보관	보관시설 설치 / 제염처리	폐슬러지 등의 보관 및 관리	해양 오염 확대 방지	폐슬러지 등의 보관/관리
				해양오염 확대 방지		폐슬러지 등의 처리 연구
	(5) 대기 및 토양		지하수 오염 확대 방지	(저장/처리시설 확충 및 하수펌프 복구)	비 산 억 제 (계속)	지하수 오염 확대 방지
			지하수차단벽 방식 검토	/ 지하수 차단벽 설계 및 착수		지하수 차단벽 구축
			비산방지제 뿌리기	비산방지제 뿌리기(계속)		비산방지제 뿌리기
			잔해물 철거 및 관리	잔해물 철거 및 관리(계속)		잔해물 철거 및 관리
	(6) 원자로건물 커버		원자로건물 커버 설치 (1호기)	잔해물 제거 (3,4호기 원자로건물상부)	원자로건물 컨테이너 검토	잔해물 철거/커버 설치 (3,4호기)
				원자로건물 컨테이너 검토		원자로건물 컨테이너 설치작업 개시
	(7) 격납용기		격납용기 가스관리시스템 설치	격납용기 가스관리시스템 설치	격납용기 가스관리 시스템 검토	격납용기 가스관리시스템 설치
III 감시· 제염	(8) 측정, 저 감, 공표		발전소 내외부 방사선량 모니터링 확대, 충실화 및 공표	본격적 제염의 검토 및 개시	제 염	환경 모니터링 계속
						제염작업 계속
IV 여진 대책	(9) 쓰나미, 보강 등		여진/쓰나미 대책의 확충 및 다양한 방사선 차폐대책 준비	각 호기에 대한 보강공사 검토	재 해 확 대 방 지	다양한 차폐대책 계속
			4호기 사용후연료저장조 지지구조물 설치			각 호기 보강공사
IV 환경 개선	(10) 생활/ 직장환경		작업원의 생활 및 직장 환경 개선		환경개선 충실 관리 충실 관리 충실 관리	작업원 생활/직장환경 개선
	(11) 방사선/ 의료		방사선 관리 및 의료체제 개선			방사선 관리 및 의료체제 개선
	(12) 직원 훈련/배치		요원의 계획적 육성 및 배치 시행			요원의 계획적 육성 및 배치 시행
중장기적 과제에의 대응			중기 안전성 확보 방안	중기안전확보방안 기반 시설운영계획		시설운영계획에 기반한 대응
				중장기 로드맵 작성		

<그림 3.20> 후쿠시마 사고 복구 로드맵(2011.12.16 기준)[TEPCO(2012b)]



<그림 3.21> 사고 복구를 위한 주요 대응조치 요약(2011.12.16 기준)[TEPCO(2012b)]

나. 원전 안정화 노력

즉각적인 사고 대응이 어느 정도 이루어진 2011년 4월 17일, 동경전력은 사고 발전소를 안전하게 복구하기 위한 로드맵(이후부터 ‘복구 로드맵’이라 지칭)[TEPCO(2011a)]을 발표하였다. 이 복구 로드맵은 다음 2가지 핵심 목표를 천명하고 있다.

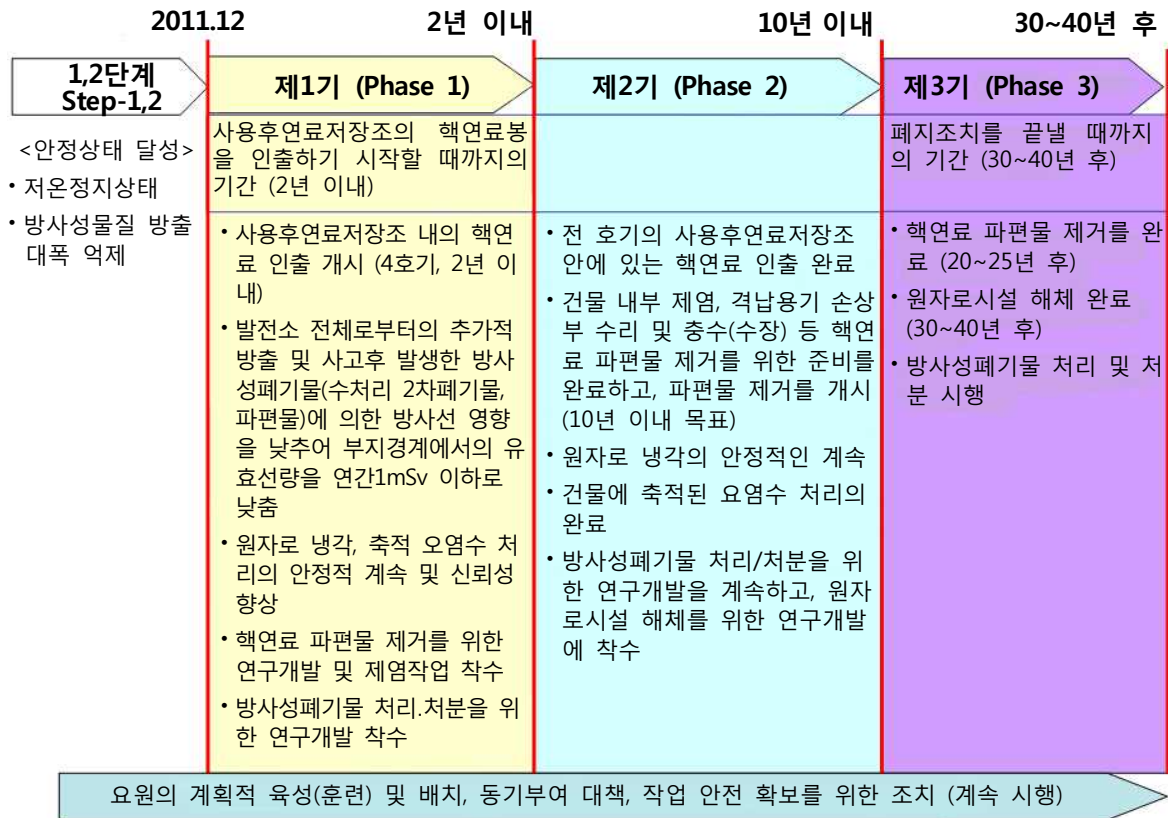
- 1단계(3개월): 방사선량을 점진적으로 감소시킴
- 2단계(6개월): 방사성물질의 방출 관리를 통하여 방사선량을 크게 낮춤

위의 목표로 냉각(Cooling), 완화(Mitigation), 방사능 감시 및 제어(Monitoring & Decontamination) 등 세 분야에서 즉각적으로 취해질 조치들을 계획하였다. 이 로드맵은 계속 수정·보완되었는데, 5월부터 여진 등에 대한 대책과 환경 개선 분야가 추가되었다. 동경전력이 1,2단계가 모두 종결되었음을 선언한 2011년 12월 16일 기준의 최종 복구 로드맵[TEPCO(2011c)]을 <그림 3.20>, 사고 복구를 위한 주요 대응조치를 <그림 3.21>에 요약 제시하였다.

3.4 향후 조치 계획

또한, 후쿠시마 원전의 해체를 포함한 중장기 로드맵[TEPCO(2011d)]이 <그림 3.22>에 나와 있다. 현재 격납용기 및 원자로 내부 상태에 대한 이해가 부족하고, 외부적으로도 지진이나 쓰나미의 재발생 등 다양한 위협 요인이 있으므로, 로드맵의 이행과정에서 현실을 반영한 지속적인 수정이 필요할 것으로 예상된다.

동경전력은 4호기의 사용후연료저장조에 대한 구조물 보강작업을 꾸준히 수행하고, 2012년 6월에는 4호기의 저장조가 대형 지진에 대해 안전하다고 발표하는 등 앞으로 발생 가능한 지진 및 쓰나미 등에 대한 대비 작업을 진행하고 있다. 반면에 규제기관인 원자력 안전보안원이 2012년 3월 후쿠시마 원전의 저온 냉각 상태를 유지하기 위한 동경전력의 계통 보수 계획이 적절치 못함을 지적하고 이에 대한 대처 계획을 제출하도록 요구하는 등 아직도 많은 부분에서 추가 노력이 필요한 상황으로 판단된다.



<그림 3.22> 후쿠시마 제1원전의 제염/해체를 위한 중장기 로드맵[TEPCO(2012b)]

4. 환경 영향 및 비상 대응

4.1 방사성물질 방출 및 확산

가. 방사성물질 방출 정보

1) 대기 중 방사성물질 방출

후쿠시마 사고로 인해 외부로 방출된 방사성물질의 총량을 정확히 알 수는 없으나, 중대사고 해석코드를 이용하여 방출량을 산출하거나, 발전소 주변 지역에서 측정된 방사성 오염으로부터 방출량을 역계산하는 방법으로 추정할 수는 있다. 일본 정부는 2011년 4월 12일 후쿠시마 사고를 국제원자력사고등급(INES)³³⁾ 상의 7등급 사고로 발표하면서, 대기 로 방출된 방사성핵종의 총량을 $3.7\sim6.3\times10^{17}$ Bq로 추정한 바 있다.(<표 4.1> 참조) 원자력 안전·보안원(NISA)은 중대사고 해석코드인 MELCOR를 이용하여 계산하였고, 원자력안전위원회(NSC)는 환경 모니터링 관측 자료에 근거하여 SPEEDI 시스템으로 방사선원항(Source Term)을 역 추정하였다. 그 이후에도 방사성물질의 방출이 계속되었으나, 그 양은 상대적으로 매우 작으므로 계산에 큰 영향을 미치지 않는다.

<표 4.1> 후쿠시마 사고에 대해 추정된 방사성물질 방출량³⁴⁾[TEPCO(2012b)]

구 분		방사성핵종 방출량 추정치[단위: PBq = 10^{15} Bq]				
기 관	발표일	비활성기체	I-131	Cs-134	Cs-137	INES 환산
NISA	2011.4.12	-	130	-	6.1	370
JAEA/NSC	2011.4.12	-	150	-	12	630
JAEA/NSC	2011.5.12	-	150	-	13	670
NISA	2011.6.6	-	160	18	15	770
JAEA/NSC	2011.8.22	-	130	-	11	570
NISA	2012.2.16	-	150	-	8.2	480
JAEA	2012.3.6	-	120	-	9	480
TEPCO	2012.5.24	-	150	-	13	670
(참고) IRSN (프랑스)		2000	200	30		-
(참고) 체르노빌 사고 시 방출량		6500	1800	-	85	5200

33) 국제원자력사고등급(International Nuclear and Radiological Event Scale; INES)은 원자력 사건·사고 시의 소통을 원활하게 하기 위하여 사건·사고의 심각성(노심 손상, 방사능 누출, 사망자 발생 여부 및 숫자)에 따라 0등급부터 7등급까지로 정의한 것이다. 과거 사고 중에서 체르노빌 사고는 7등급, TMI 사고는 5등급으로 평가되었다.

34) 원전 사고 시 다양한 종류의 방사성물질이 방출되지만, 넓게 확산되고 많은 피해를 주는 대표적인 원소가 I-131과 Cs-137이다. 따라서 이 두 원소가 대표적으로 다루어지며, 방출 총량을 표현할 때 I-131 환산량이 흔히 사용한다. I-131은 반감기가 8.05일이므로 곧 소멸되지만, Cs-137의 반감기는 30년이어서 오랫동안 영향을 미친다. I-131 환산량을 구할 때, Cs-137 방사능에는 40배를 곱하여 사용한다.

4월 12일 이후 원전의 상태에 대한 이해가 높아지고 상세한 환경 모니터링 결과가 확보됨에 따라 방사성물질 방출량이 수정 발표되었는데, <표 4.1>에는 추정값의 변화 과정을 보여주고 있는데, 후쿠시마 사고에서 방출된 방사성물질의 양이 대체로 체르노빌 사고 시의 약 10~20% 수준임을 나타내고 있다. 또한, IRSN 등 외국에서도 일본 발표와는 다른 방출량 추정 결과를 발표하기도 했다. 현재 유엔방사선영향과학위원회(UNSCEAR)에서 주관하여 방사성물질의 대기 및 해양 확산 평가와 관련한 국제협력 활동이 진행되고 있으므로 조만간 후쿠시마 사고의 방사성물질 방출량에 대한 국제적 공감대가 이루어질 것으로 예상된다.

2) 방사성물질의 해양 방출

후쿠시마 사고에서 방출된 방사성물질로 인근 해역도 크게 오염되었다. 해양의 오염은 주로 방사성물질로 오염된 냉각수가 바다로 직접 방출되거나, 대기 중으로 누출된 방사성물질이 태평양 방향으로 이동하면서 해수면에 침적하면서 발생하였다. 전체적으로는 후자의 영향이 더 컸으리라 추정되지만, 원전 인근 해역에서는 지표면이나 발전소 시설 내의 오염수가 해양으로 직접 방출된 데 따른 영향이 두드러졌다.

방사성 오염수는 3월 21일 발전소 부근 연안에서 처음 관측되었고, 3월 25일~30일 사이에는 인근 해역에서 I-131과 Cs-137의 농도가 높게 측정되었을 뿐만 아니라 계속 증가하였다. 오염수의 직접적인 해양 누출은 대부분 지진에 의해 발생한 구조물의 균열이나 부주의 때문이었다. <표 4.2>는 여러 기관에서 평가한 방사성물질 누출량을 요약하고 있다.

<표 4.2> 방사성물질 해양 방출 추정치[IRSN(2012), TEPCO 웹사이트]

발표 기관	평가 대상 기간	방출량 평가(10^{15} Bq)		
		I-131	Cs-134	Cs-137
일본원자력 연구개발기구	2011.3.21 ~ 4.30	11.4	-	3.6
프랑스 IRSN	2011.3.21 ~ 7월 중순	-	-	27
동경전력 (2012.5.24.)	2011.3.26 ~ 9.30	11	3.5	3.6

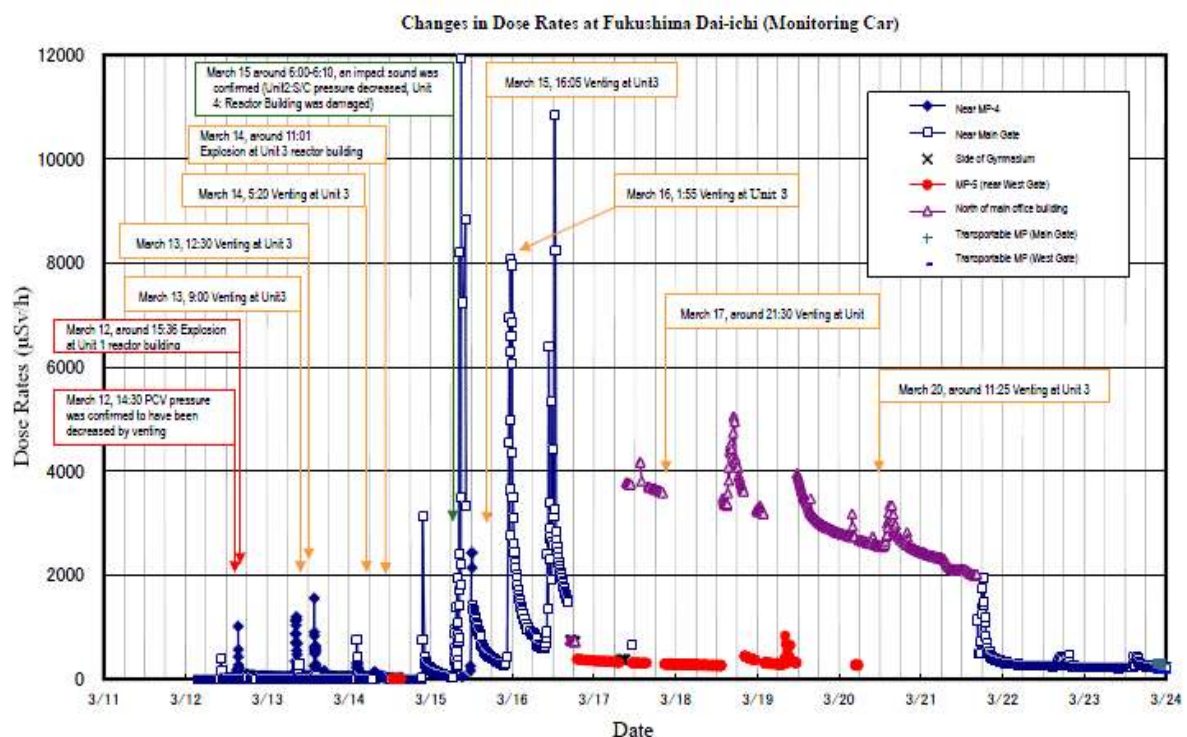
나. 방사능 모니터링 자료

1) 후쿠시마 제1원전 지역

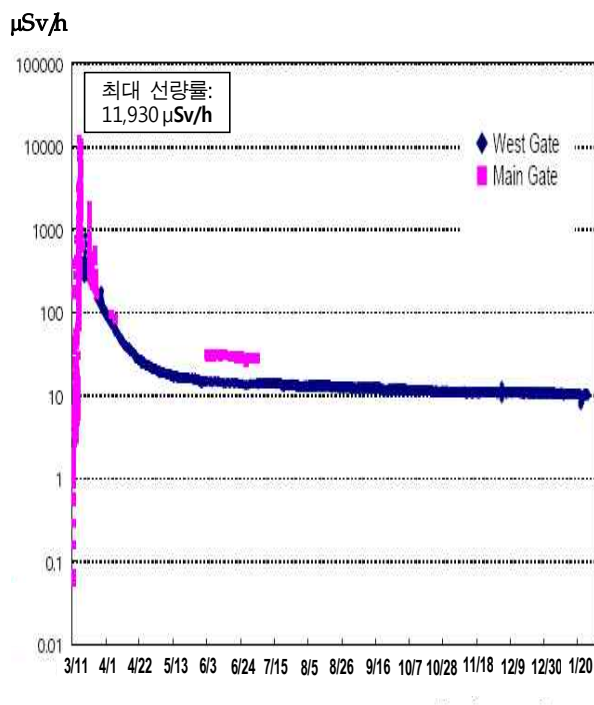
지진의 영향으로 후쿠시마 제1원전 주변에서 운영 중이던 많은 방사선 계측기들이 기능을 상실했으므로, 사고 초기에는 이동 차량을 이용하여 후쿠시마 원전 지역의 방사선

량률(Dose Rate)을 측정하였다. 그 결과를 <그림 4.1>에 나타내었는데, 격납용기 배기나 손상, 또는 수소가스 폭발 등에 따라 선량률이 순간적으로 급격하게 상승하곤 하였다. 한편, 원전 정문에 설치된 계측기가 사고 후에도 정상 작동하였음을 사고에 대한 초기 수습 후에 알게 되었다. 정문과 서문에서 측정된 공간 방사선량률 변화와 2012년 1월 기준으로 부지경계에서의 선량률을 <그림 4.2>에 예시했다. 정문에서의 선량률은 2호기 격납용기 손상과 4호기 수소가스 폭발이 발생한 3월 15일 시간당 11,930 μSv (= 11.9 mSv)까지 증가했다가 그 이후에는 계속 감소하는 추세를 보이고 있다. <그림 4.1>과 <그림 4.2>는 매우 유사한 방사선량률을 보여준다.

동경전력과 문부과학성은 대기, 해양 및 토양에서 방사성물질 분포와 선량률을 지속해서 모니터링 해왔으며, 주요 모니터링 위치를 <그림 4.3>에 제시하였다. <그림 4.4>는 원전 부지에서 3월 23일과 4월 23일 측정된 방사선량률을 보여주는데, 한 달 사이에 상당히 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한, 4호기 근처의 방사선량률이 상대적으로 낮은 것으로 보아, 사고 직후 안전성에 대해 많은 우려를 자아내었던 4호기 사용후연료저장조의 핵연료집합체들은 거의 손상되지 않았을 것임을 유추할 수 있다.



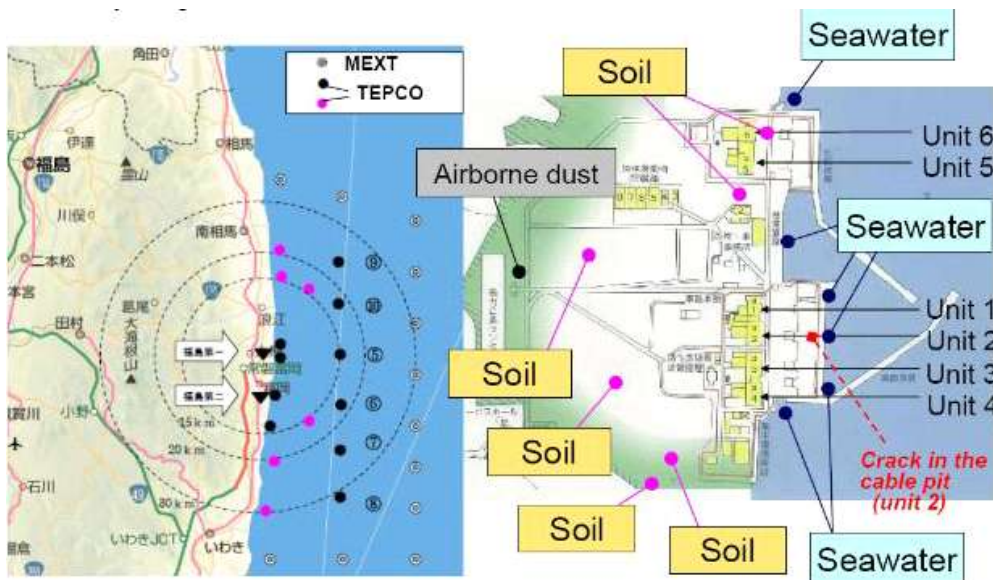
<그림 4.1> 사고 초기 후쿠시마 원전에서 이동 차량에 의해 측정된 방사선량[TEPCO 웹사이트]



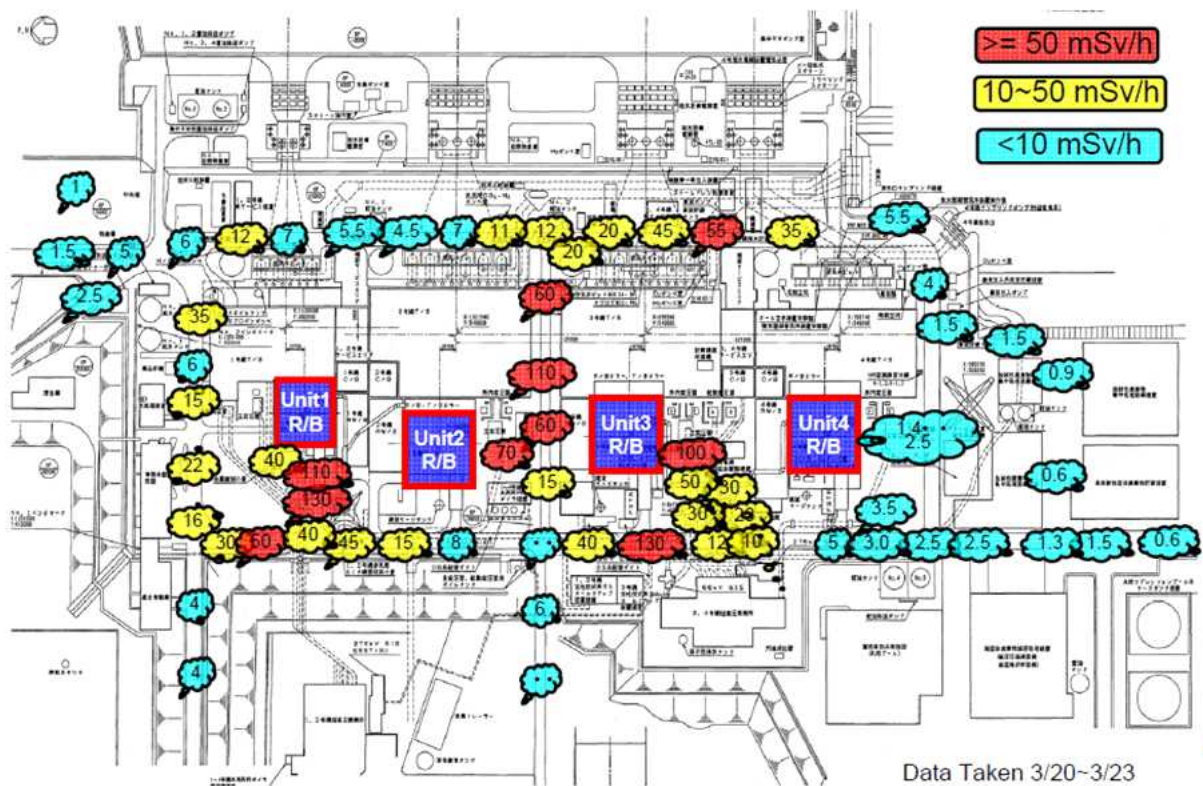
<정문 및 서문에서 측정된 공간 선량률 변화>

<부지 경계에서의 2012년1월26일 선량률>

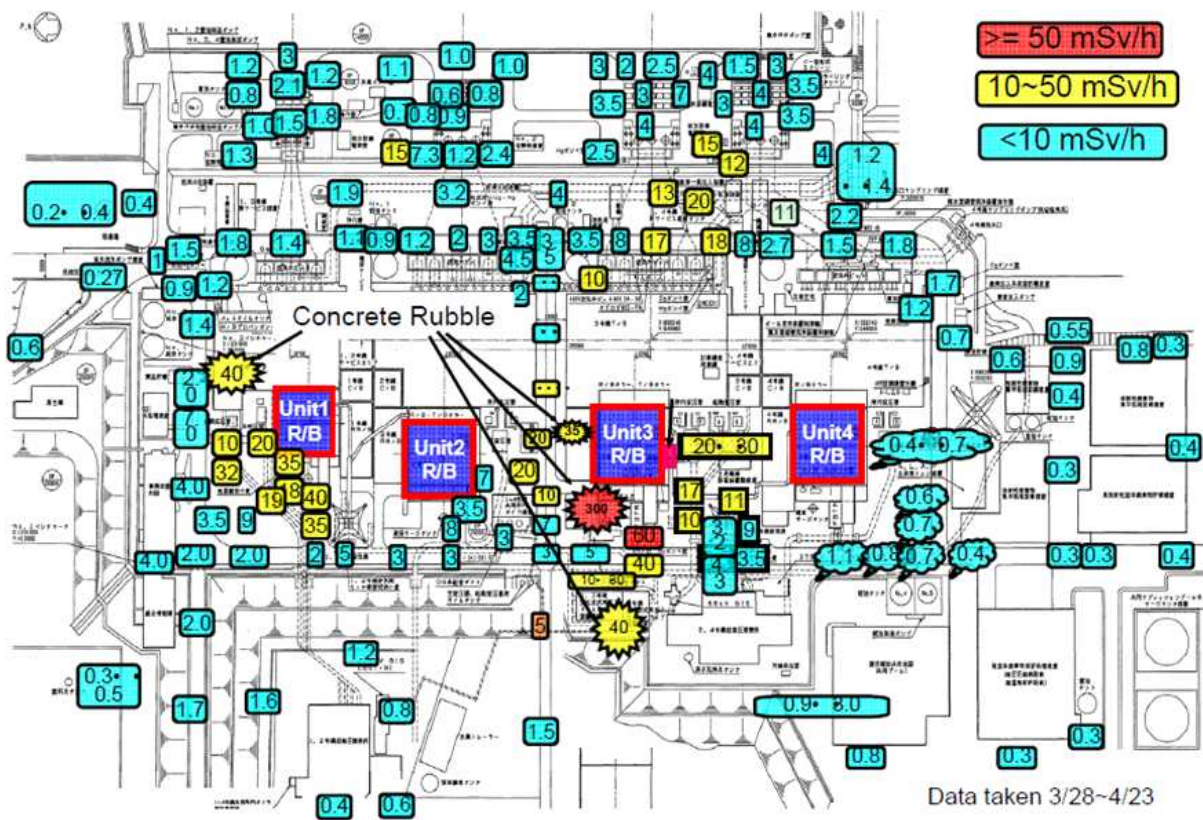
<그림 4.2> 후쿠시마 제1원전 정문 등에서 측정된 공간 방사선량의 변화[TEPCO 웹사이트]



<그림 4.3> 후쿠시마 원전주변 모니터링 위치[Masui(2011)]



(a) 2011년 3월 23일



(b) 2011년 4월 23일

<그림 4.4> 후쿠시마 원전 부지 내 측정된 공간 방사선량도[TEPCO 웹사이트]

2) 원전 주변지역의 오염

일본 문부과학성은 여러 기관과 공동으로 2011년 3월 19일부터 5월 30일까지 원전으로부터 반경 60km 이내의 8개 측정지점에서 공기 중 I-131과 Cs-137의 농도를 지속해서 측정하고 그 값을 웹 사이트를 통해 공개하였다. 원전의 북서쪽에서 I-131과 Cs-137의 농도가 다른 지역보다 높게 측정되었는데, 이는 방사성물질이 많이 누출된 3월15일의 풍향이 북서쪽으로 형성된 것과 관계가 있다. 또한, 간이 선량계를 장착한 이동 차량을 이용하여 반경 80km 이내 지역에서 3월 18일부터 공간선량률을 계속 측정하였다.

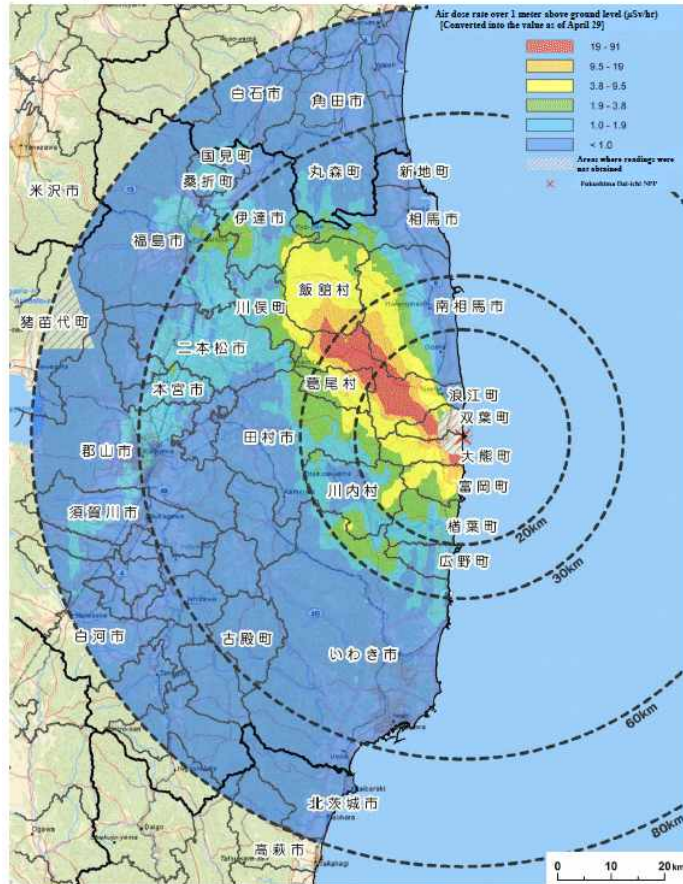
일본 문부과학성(MEXT)과 미국 에너지부(DOE)는 4월 6일부터 29일까지 원전 반경 80km 내의 공간 방사선량률과 토양에 침적된 Cs-137과 Cs-134의 오염지도를 작성하였다(<그림 4.5>). 주로 원전 북서쪽으로 많은 양의 방사성 물질이 확산한 것으로 확인되었는데, 이는 3월20일의 강우 때문에 많은 양의 세슘(Cs-137, Cs-134)이 지표면에 침적되었기 때문으로 추정된다. 4월 29일을 기준으로 원전에서 30km 떨어진 곳에서 가장 높은 방사선량률은 시간당 10 μ Sv 수준이었다. 한편, <그림 4.6>은 2011년 9월 18일을 기준으로 좀 더 넓은 영역에서 측정·분석된 세슘의 침적량을 보여주고 있다.

한국원자력연구원에서 개발한 대기확산모델 LADAS(Long-range Accident Dose Assessment System)의 결과에서도 후쿠시마 원전의 북서쪽으로 많은 양의 방사성물질이 지표면에 침적된 것으로 산정되었다. 우리나라 기상청의 수치예보 자료와 LADAS를 이용하여 Cs-137의 지표면 침적 계산결과를 <그림 4.7>에 나타내었다. 그림에서와 같이 2호기의 격납건물 손상이 발생한 3월 15일에 풍향이 동풍에서 남동풍으로 변화하였고, 또한 3월 20일에는 남동풍 및 강수에 의해 많은 양의 방사성물질이 북서쪽의 지표면에 침적되었다. LADAS에 의한 계산은 많은 가정을 포함하고 있지만, 그 결과가 일본 문부과학성과 미국 에너지부에서 관측한 Cs-137의 농도 분포와(<그림 4.5>) 비교하여 유사한 패턴을 나타내고 있다.

일본 정부는 4월 21일 후쿠시마 원전 주변에 대한 3월 11일부터 4월 21일까지의 누적 방사선 공간 선량 값을 측정하여 발표하면서, 원전 반경 20km 지역을 경계구역으로 지정하여 출입금지 구역으로 설정하였다. <그림 4.8>은 사고 후 40일간의 누적 공간선량을 기준으로 평가한 1년간의 방사선 피폭선량 추정치를 보여준다. 여기서 보여주는 값은 사고 직후부터 해당 지역에서 1년간 거주할 때 외부 피폭³⁵⁾에 의해 예상되는 선량이라 할 수 있다. 그런데 이 지역에 실제로 거주할 경우에는 분진 등의 흡입에 의한 내부 피폭도 일어날 수 있고, 빗물이 고여 국부적으로 높은 방사능을 보일 수도 있기 때문에, 피폭량이 증가할 가능성이 있다. 반면에 주거지역을 중심으로 효과적인 제염이 이루어진다면, 실제 피폭량을 <그림 4.8>의 값보다 크게 줄일 수도 있다.

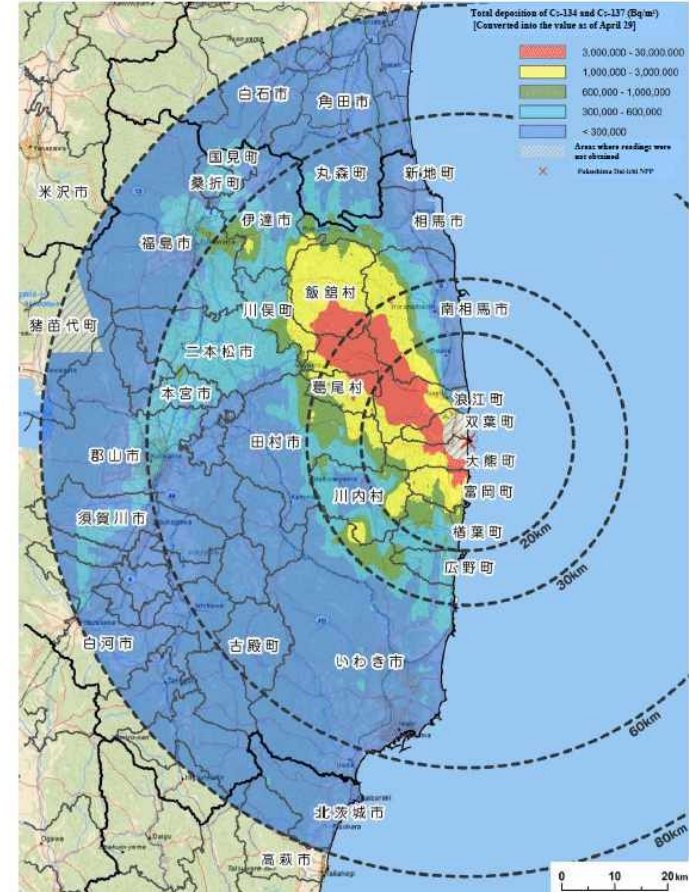
35) 오염 지역에 실제로 거주할 경우 외부 피폭(External Exposure)뿐만 아니라 방사성물질을 흡입하면서 내부 피폭(Internal Exposure)도 일어날 수 있다.

Results of airborne monitoring by MEXT and DOE
(Readings of air dose monitoring inside 80km zone of Fukushima Dai-ichi NPP)



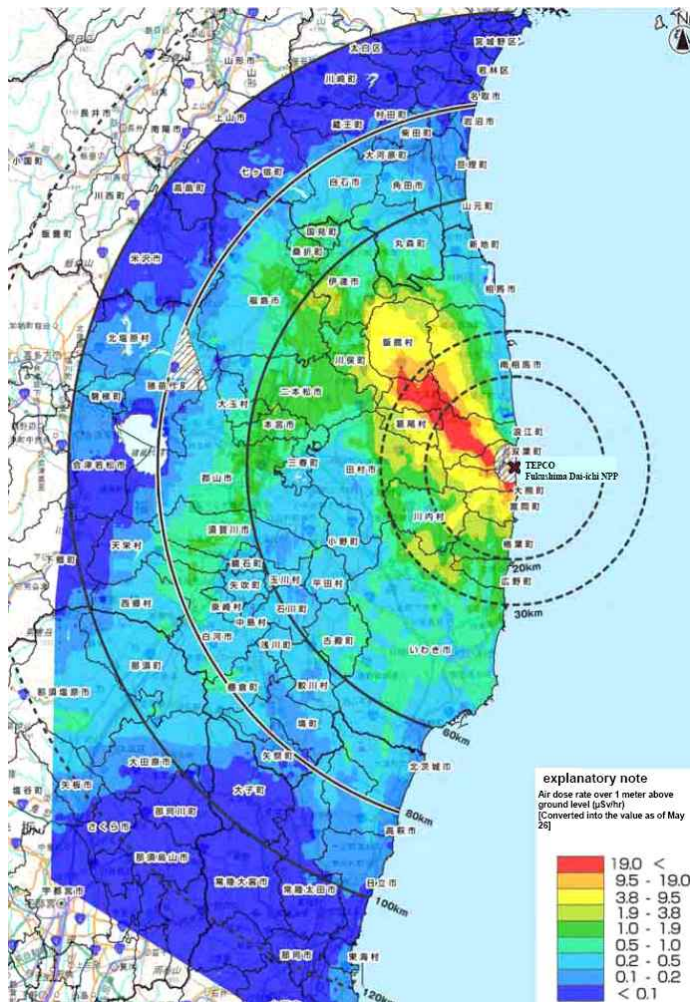
(a) 공간 방사선량 (mSv/h)

Results of airborne monitoring by MEXT and DOE
(Total surface deposition of Cs-134 and Cs-137 inside 80 km zone of Fukushima Dai-ichi NPP)

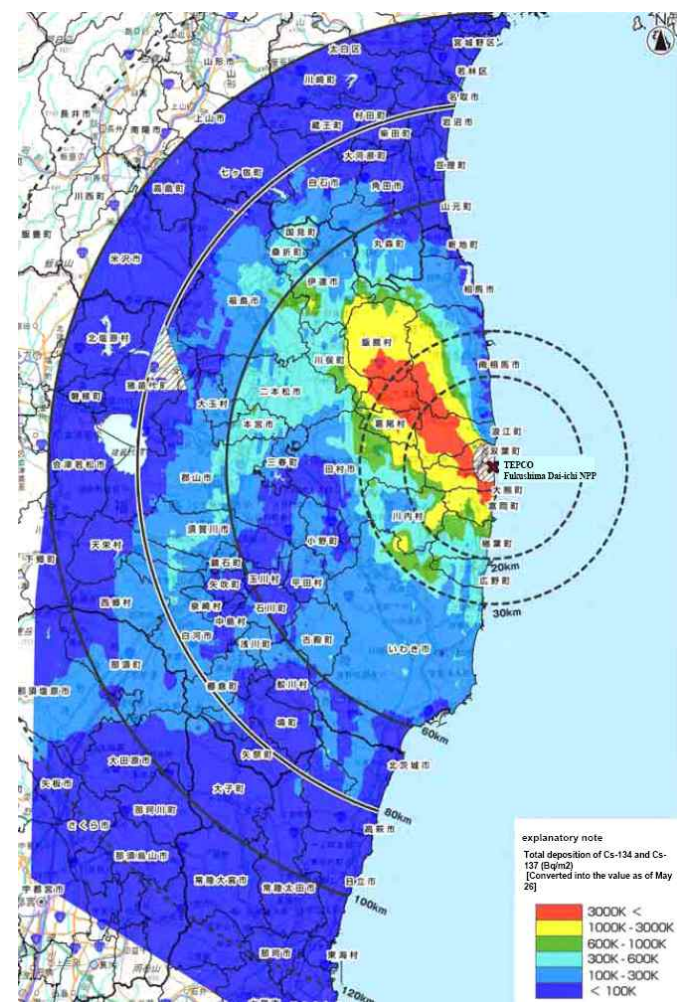


(b) 지표면에 침적된 Cs-134와 Cs-137 (Bq/m²)

<그림 4.5> 일본 문부성과 미국 에너지부가 공동 개발한 후쿠시마 주변지역 오염지도 (2011.4.29. 기준)[MEXT(2011a)]

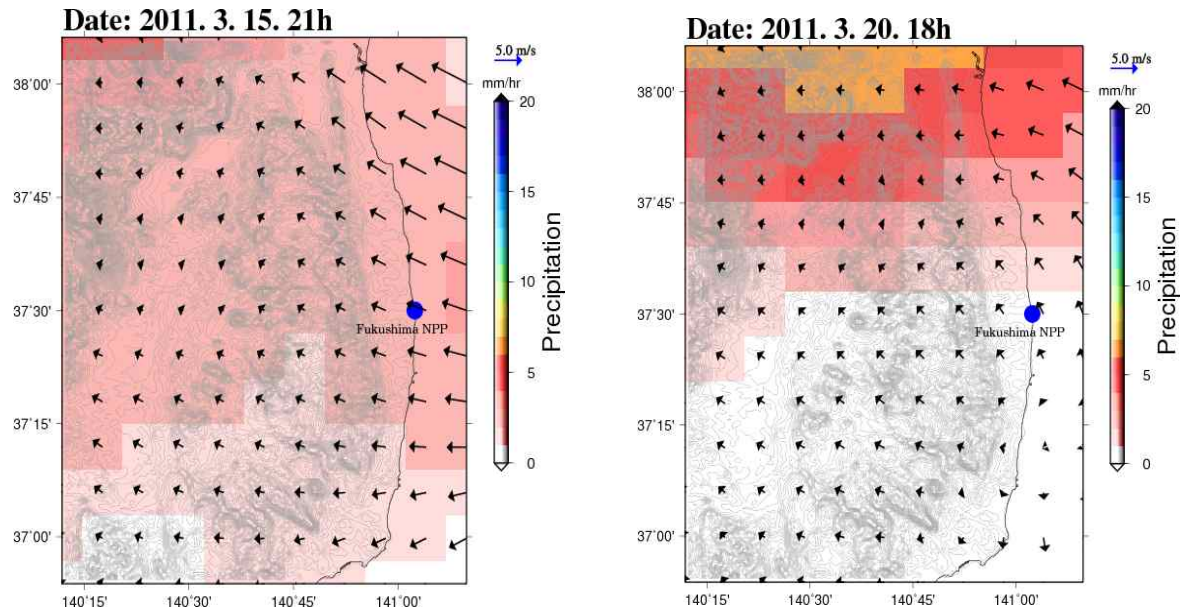


(a) 공간 방사선량 (mSv/h)

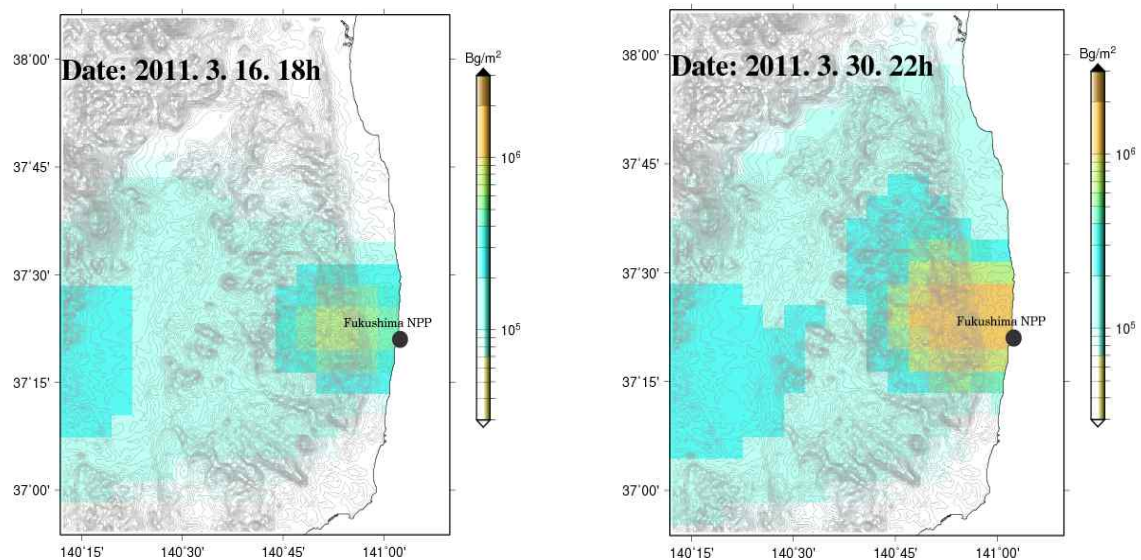


(b) 지표면에 침적된 Cs-134와 Cs-137 (Bq/m²)

<그림 4.6> 일본 문부성과 미국 에너지부의 2차 공동 측정 오염지도 (2011.5.26. 기준)[MEXT(2011b)]



(a) 후쿠시마 원전 반경 80 km내 바람과 강수 기상예보자료

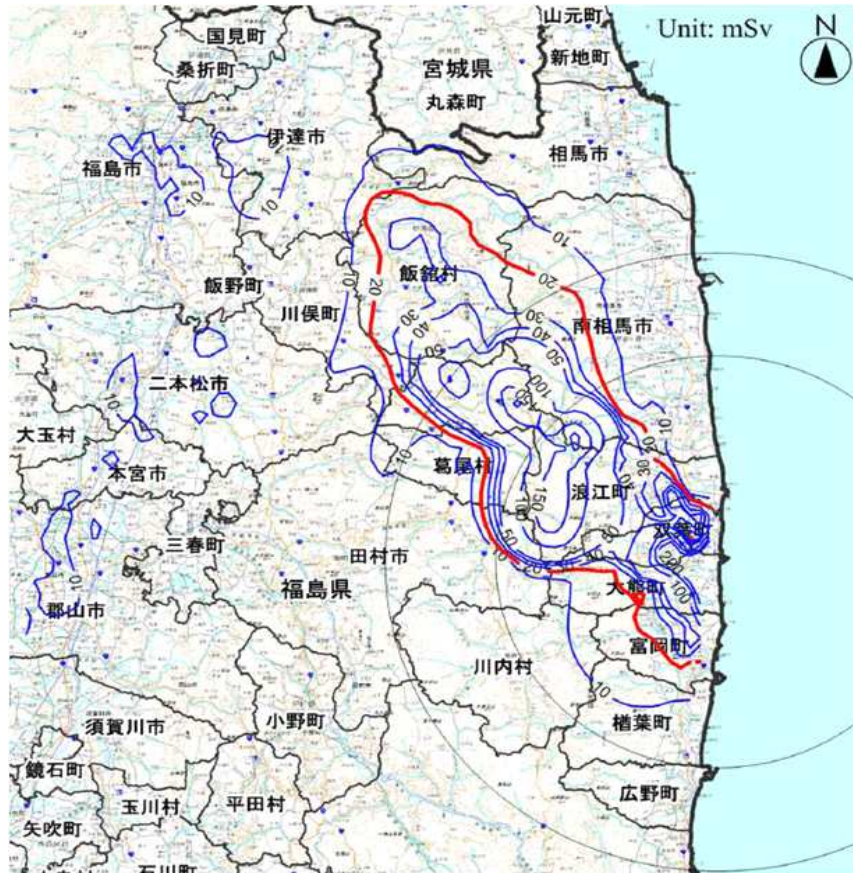


(b) 원전 반경 80 km내 Cs-137 지표 침적량

<그림 4.7> 원자력연구원 LADAS에 의해 평가된 방사성물질 침적량 분포

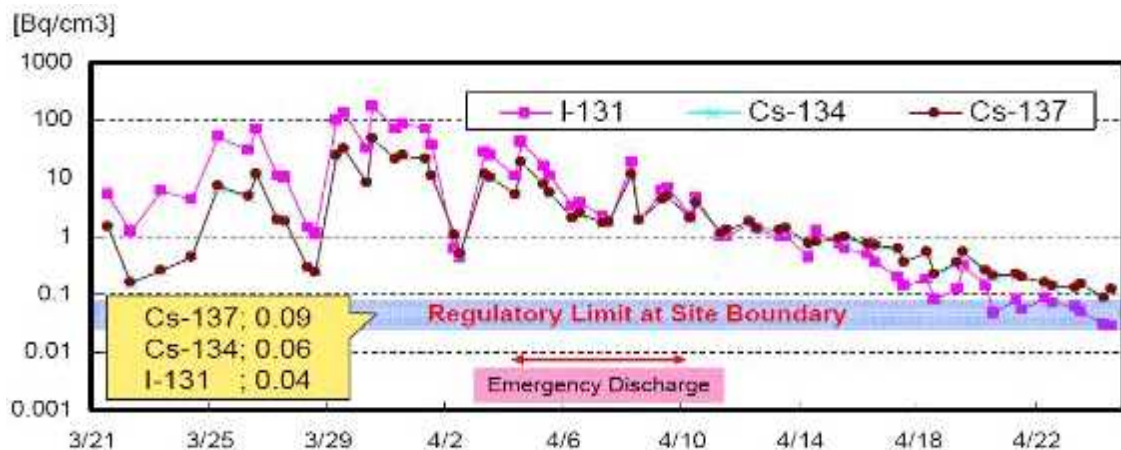
3) 해양 내 핵종 농도 측정

동경전력과 문부과학성은 후쿠시마 제1원전으로부터 후쿠시마 주변 해역으로 누출된 방사성 핵종을 모니터링 하였다. 주로 후쿠시마 제1원전 반경 30 km 이내 해역과 연안을 중심으로 방사능 농도를 측정하고 있는데, 반경 20 km 이내에서 12개 지점, 그리고 20 km 이외의 해역에서 13개 지점 등 총 25개 지점에서 방사능 농도를 측정하고 있다.



<그림 4.8> 4월21일까지의 선량자료를 근거로 한 2012년 3월까지의 피폭선량 예측[MEXT 웹사이트]

후쿠시마 제1원전 1~4호기 배수로 남쪽 해수에서 관측한 방사능 농도를 <그림 4.9>에 나타내었다. I-131, Cs-134, Cs-137 모두 고농도의 오염수가 방출된 4월 1일~2일 사이에 가장 높은 농도를 보였고, 4월1일 이후에는 전체적으로 농도가 감소하는 추세를 보이고 있다.



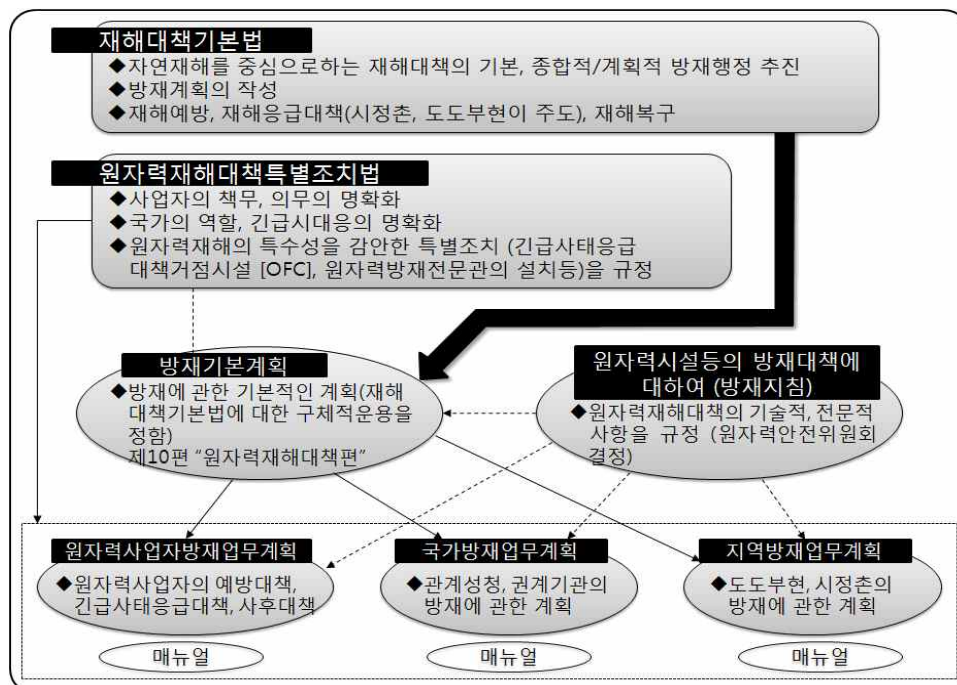
<그림 4.9> 후쿠시마 원전 해역에서 측정된 방사성 핵종 농도[Masui(2011)]

4.2 사고 비상 대응

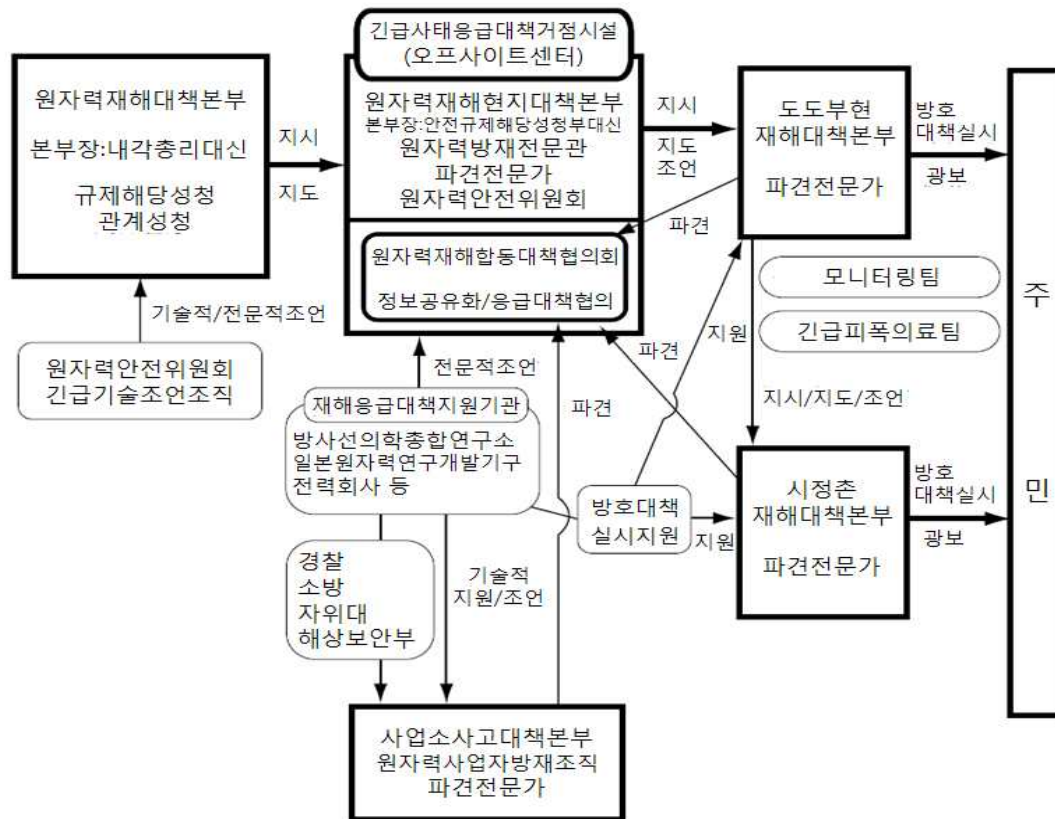
가. 일본의 원전 사고 비상대응체제

원자력 재해 대응과 관련한 일본의 법령 및 규정 체계는 <그림 4.9>와 같다. 재해대책기본법(1961년 최초 제정)과 원자력재해대책특별조치법(2000년 4월 제정)에 따라 방재기본계획이 수립되며, 이를 기반으로 국가, 원자력사업자 및 지역의 방재업무계획이 수립된다. 일본은 원자력재해의 특성에 따른 기술적, 전문적 사항을 반영한 “원자력발전소 등 주변의 방재대책에 대해”란 지침을 1980년 6월에 발행하여 운영하였다. 이 지침은 1999년 9월의 도카이무라 JCO 핵연료공장 핵임계 사고 후속조치를 반영하여 2000년 5월에 “원자력시설 등의 방재대책에 대해”(일명 ‘방재지침’)로 개정되었다.

법에서 정한 기준을 초과하는 원자력 재해가 발생하는 경우, ‘원자력긴급사태’가 선언되고, 총리를 본부장으로 하는 ‘원자력재해대책본부’가 발족된다. 또한 도, 부, 현 등 지방정부에도 재해대책본부가 설치된다. 아울러, 긴급사태 응급대책실시구역에 ‘원자력재해 현지대책본부’를 두도록 하였다. 원자력재해대책특별조치법에 따른 원자력재해 현지대책본부와 재해대책기본법에 따른 지방정부 재해대책본부가 정보 교환 및 상호 협력을 할 수 있도록 “원자력재해 합동대책협의회”를 조직하여 “현장 비상대응센터”(Off-Site Center; 이후 OFC 또는 ‘오프사이트센터’라 함)에 설치하여 운영하도록 되어 있다. 원자력 재해에 대한 중앙정부, 지역, 사업자 및 전문기관을 포함한 전체적인 대응조직 체계는 다음 <그림 4.10>과 같다.



<그림 4.9> 일본의 방사능방재관련 법 및 계획 체계[KINS(2011)]



<그림 4.10> 원자력재해대응 조직운영체계[KINS(2011)]

오프사이트센터에 설치되는 원자력재해 합동대책협의회는 그 산하에 총괄반, 홍보반, 발전소반(플랜트반), 방사선반, 의료반, 주민안전반, 운영지원반을 두어 실제 업무를 수행한다. 이러한 업무의 수행을 위하여 설치되는 설비에는 ① 주요 정보의 영상 표시 시스템, ② 화상회의 시스템, ③ 긴급시대대책지원시스템(Emergency Response Support System; ERSS), ④ 긴급시 신속방사능영향예측 네트워크시스템(SPEEDI), ⑤ 방사선 감시 시스템, ⑥ 기상 정보 시스템, ⑦ 각종 통신 시스템(위성통신 포함), ⑧ 방사선 측정 및 방호 기자재류 등이 포함된다.

주민 의료 대책과 관련해서는 “언제라도, 어디에서라도, 누구라도 최선의 의료 서비스를 제공 받는다”는 기본이념을 달성할 수 있도록 원자력시설 종사자와 지역 주민이 차별 없이 평등한 치료를 받을 수 있는 체계의 구축을 시도하고 있다. <그림 4.11>은 원자력 재해에 대비한 일본의 의료 대응 체계를 보여준다.

한편, 원전 사업자도 긴급사태가 발생하는 경우 본사(본점)와 현장(발전소)에 비상대응기구를 설치하여 운영한다. 본사와 발전소에는 원전운영자가 사고를 수습하기 위한 비상대응센터(Emergency Response Center; ERC)³⁶⁾가 설치되는데(<그림 4.12>), 후쿠시마 사고 시에는 내진 성능과 방사선 차단시설을 갖춘 먼진 건물에 발전소 비상대응센터가 설치되어 사고 수습에 큰 역할을 하였다.

36) Emergency Control Center(ECC)라고도 하며, 일본에서는 ‘긴급시대대책본부’라는 용어를 사용하고 있다

나. 후쿠시마 사고 시의 비상 대응 조치

후쿠시마 사고가 발생한 후 일본정부, 지자체, 동경전력 등은 앞에서 소개한 법령 및 조직체계에 따라 비상 대응 조치를 취하였다. 사고가 급박하게 진행되는 상황에서 다수 기관과 인원이 동원되어야 했을 뿐만 아니라 초대형 지진과 쓰나미라는 최악의 환경 속에서 상당한 혼란이 있었지만, 각자 최선을 다하여 사고 수습을 위해 노력하여 비상 대피와 긴급 의료 조치 등이 비교적 효과적으로 이루어졌다. 사고 대응 및 수습 과정에 참여한 각 주체들의 활동이 적절했는가에 대해서는 사고 당시부터 지금까지 다양한 논란이 있으나, 정확한 정황이나 사실의 확인이 어려운 부분이 많아서 본 보고서에서는 구체적으로 다루지 않는다. 다만, 후쿠시마 원전 인근에 설치되었던 오프사이트센터가 방사성물질 차단설비 미흡 등으로 기능을 발휘하지 못하여 원자로재해 현지대책본부를 후쿠시마현청에 설치할 수밖에 없었다는 점과 제1원전의 비상대응센터(<그림 4.13>)는 방사성물질 차단시설을 갖춘 면진건물에 설치되어 사고 수습에 결정적인 기여를 했다는 점만 언급하고자 한다.

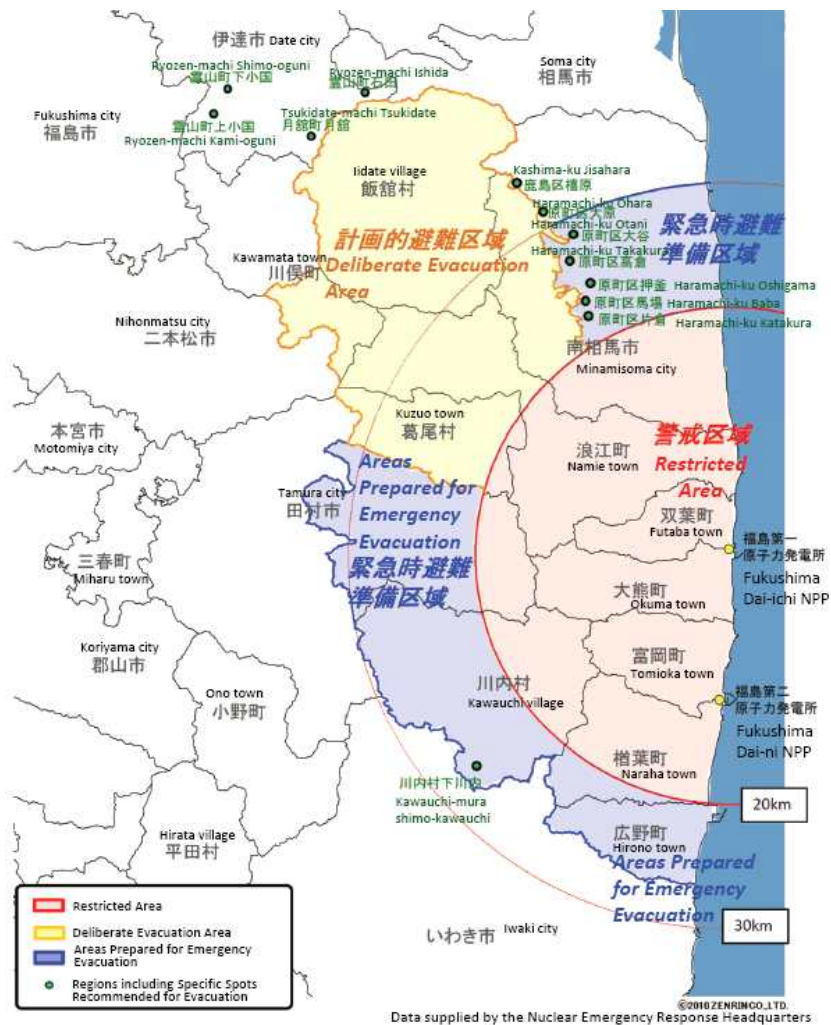
<표 4.4>은 사고 직후부터 이행된 정부의 비상 대응 조치들을 요약하고 있다. 원자력긴급사태가 선언된 3월 11일 저녁부터 3월 12일 오후까지 원전 상태가 심각해짐에 따라 주민 대피구역이 반경 2km에서 시작하여 3km, 10km, 20km로 계속 확대된 것을 알 수 있다. 반경 20~30km 지역에 대해서는 3월 15일 옥내 대피 지시가 내려졌으며, 3월 25일에는 자발적 대피 권고가 내려졌다. 이후 원전 주변지역의 방사성 오염에 대한 상세한 측정이 이루어졌으며, 그 결과를 반영하여 4월 21에는 반경 20km 구역을 ‘경계구역(Restricted Area)’으로 지정하였고, 4월 22일에는 반경 20km 외부의 방사성 오염이 높은 지역은 ‘계획적 피난구역(Deliberate Evacuation Area)’으로, 그 주변 일부 지역을 ‘긴급 시 피난 준비구역(Areas Prepared for Emergency Evacuation)’으로 설정하였다(<그림 4.14> 참조). 9월 30일 긴급 시 피난 준비구역이 해제되고, 12월 16일에는 후쿠시마 제1원전에 대한 원자력긴급사태가 해제되었다. 오염지역의 제염작업 등이 진행됨에 따라 2012년 3월, 6월, 8월, 12월 각각 피난구역을 재조정하였다. 2012년 12월말 기준으로 설정되어 있는 피난구역을 <그림 4.15>에 예시하였다.



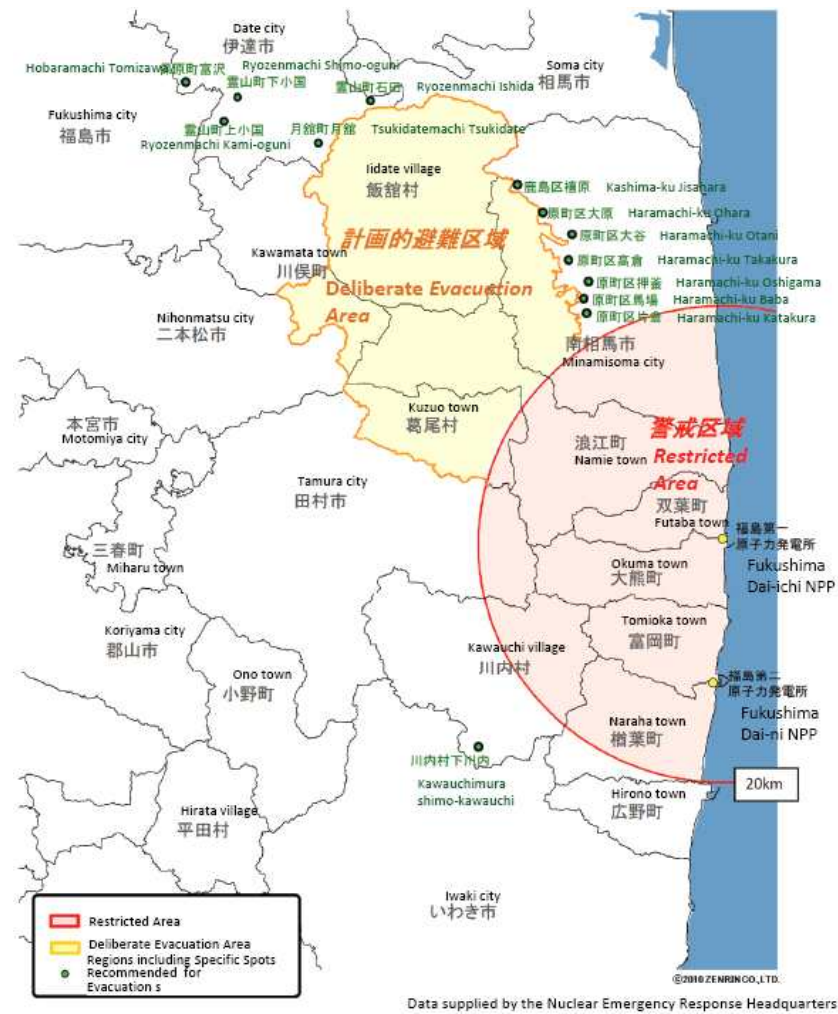
<그림 4.13> 후쿠시마 사고시 비상대응센터가 설치된 면진건물과 내부[TEPCO(2011b)]

<표 4.4> 사고 초기 시간별 대응 상황

일 시	주요 상황
2011-3-11 14:46	지진 발생에 따라 원자력재해대책본부 설치(NISA)
2011-3-11 15:42	후쿠시마 제1원전 1,2,3호기: 원재법 제10조(비상통보)에 근거한 신고(모든 교류전원 상실)를 받아 원자력재해대책본부와 현지대책본부를 설치
2011-3-11 16:00	원자력안전위원회는 임시회의를 개최하고 긴급대응조직의 설치를 결정
2011-3-11 16:36	후쿠시마 제1원전 1,2호기: 원재법 제15조(원자력 긴급사태)에 해당하여 총리대신에 보고
2011-3-11 18:08	후쿠시마 제2원전 1호기: 원재법 제10조(비상통보)에 따른 신고
2011-3-11 18:33	후쿠시마 제2원전 1,2,4호기: 원재법 제10조(비상통보)에 따른 신고
2011-3-11 19:03	총리대신 원재법 제15조 2항에 따라 “원자력 긴급사태” 선언하고 원자력재해 대책본부와 현지대책본부를 설치
2011-3-11 20:50	후쿠시마 제1원전 반경 2 km 이내 주민 소개(피난) 지시
2011-3-11 21:23	- 후쿠시마 제1원전 반경 3 km 이내 주민 소개(피난) 지시 - 후쿠시마 제1원전 반경 10 km 이내 주민 옥내대피(피난) 지시
2011-3-12 05:22	후쿠시마 제2원전 1호기: 원재법 제15조(원자력 긴급사태)에 해당
2011-3-12 05:32	후쿠시마 제2원전 2호기: 원재법 제15조(원자력 긴급사태)에 해당
2011-3-12 05:44	후쿠시마 제1원전 반경 10 km 이내 주민 소개(피난) 지시
2011-3-12 06:07	후쿠시마 제2원전 4호기: 원재법 제15조(원자력 긴급사태)에 해당하여 총리대신에 보고
2011-3-12 07:45	원재법 제15조 2항에 따라 총리대신은 후쿠시마 제2원전에 대해 원자력긴급사태를 선언 - 후쿠시마 제2원전 반경 3 km 이내 주민 (피난) 지시 - 후쿠시마 제2원전 반경 10 km 이내 주민 옥내 대피 지시
2011-3-12 18:07	후쿠시마 제2원전 반경 10 km까지 주민 소개(피난) 범위 확대
2011-3-12 18:25	후쿠시마 제1, 제2 원전 반경 20 km로 주민 소개(피난) 범위 확대
2011-3-13 06:39	후쿠시마 제1원전 3호기 원재법 제15조(원자력 긴급사태)에 해당
2011-3-15	일본정부 후쿠시마 제1원전 주변 20~30 km 지역에 옥내 대피 지시
2011-3-25	일본정부 후쿠시마 제1원전 20~30 km 반경 주민에게 자발적 소개(피난) 권고
2011-4-21	후쿠시마 제1원전 반경 20 km 구역을 경계구역으로 설정하고 허가없이 출입을 금함
2011-4-22	방사능 측정 결과를 반영하여 반경 20 km 외부에 계획적 피난구역과 긴급시 피난 준비구역을 설정
2011-9-30	긴급시 피난 준비구역 해제
2011-12-26	후쿠시마 제2원전 원자력긴급사태 해제 선언
2012-3-30	경계구역 및 계획적 피난구역 개정(카와우치, 타무라, 미나미소마 지역)
2012-6-15	이타테 지역의 계획적 피난구역 개정
2012-8-10	나하라 지역의 경계구역 및 계획적 피난구역 개정
2012-12-10	오쿠마 지역의 경계구역 및 계획적 피난구역 개정

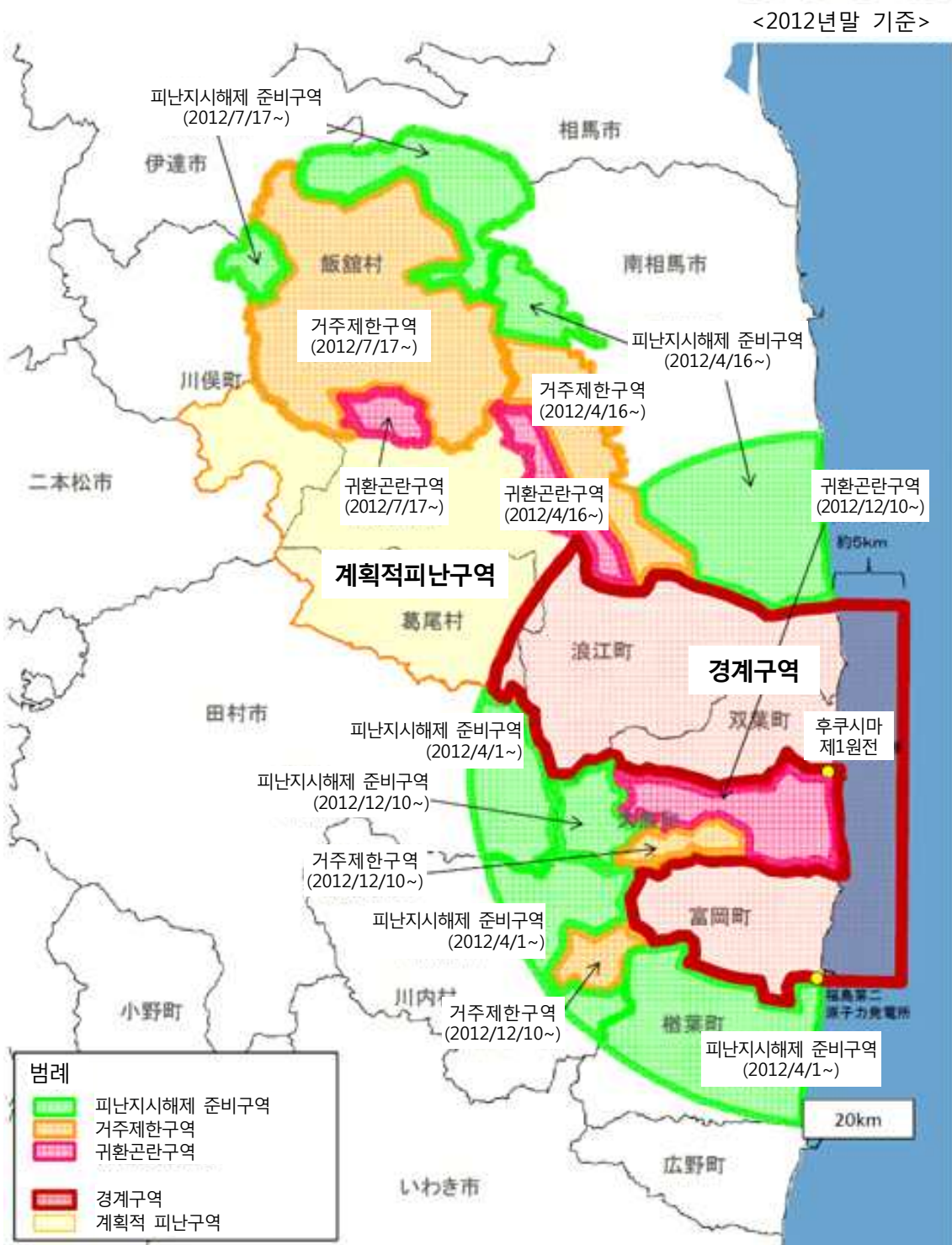


(a) 4월 21~22일 설정된 피난구역



(b) 9월 30일 긴급시 피난 준비구역 해제 후

<그림 4.14> 후쿠시마 제1원전 주변의 경계구역 등 설정[TEPCO/경제산업성 웹사이트]



<그림 4.15> 후쿠시마 제1원전 주변에 설정된 피난구역의 최근 상황[TEPCO/경제산업성 웹사이트]

<그림 4.15>에서 각 구역의 의미는 다음과 같다.

- 귀환곤란구역(Difficult-to-Return Zone): 예상되는 연간 방사선량이 50 mSv 이상으로서 5년 경과 시에도 20 mSv 이하로 내려가기 어려운 지역. 원칙적으로 출입이 금지되며, 국가가 토지 매입을 검토.
- 거주제한구역(Habitation-Restricted Zone): 예상되는 연간 방사선량이 20~50 mSv로서 수년 안에 20 mSv 이하로 낮출수 있는 지역. 일시적인 방문만 허용되며, 제염으로 선량이 더 낮아져야만 귀환이 가능.
- 피난지시 해제 준비구역(Ready-to-Return Zone): 예상되는 연간 방사선량이 20 mSv 이하인 지역으로, 조기 귀환을 위한 제염, 도시기반 복구, 고용대책 등을 조속하게 시행하여, 생활환경이 정비되면 단계적으로 거주 허용.

4.3 작업종사자 및 주민의 방사선 피폭

가. 사고 복구에 참여한 작업종사자의 피폭

사고 이전, 일본에서는 원전 사고 시 긴급작업종사자의 방사선 피폭 선량한도를 최대 100 mSv까지 인정하고 있었다. 3월15일 일본 후생노동성은 비상상황에서의 피폭 선량한도를 250 mSv로 상향 조정했는데, 이는 국제방사선방호위원회(ICRP)와 세계보건기구(WHO)가 인정하는 비상시 작업자에 대한 최대 허용선량 500 mSv보다는 낮은 값이다. 2012년 1월부터는 선량한도를 연간 50 mSv로 다시 낮추었다.

후쿠시마 제1원전에서 사고 대응 및 후속조치 이행에 참여한 작업종사자들의 피폭 선량을 정확하게 파악하는 데는 약간의 어려움이 있다. 특히, 쓰나미로 인해 방사선 측정기들이 많이 유실되어 그룹별로 선량계를 사용해야 하는 등 개인별 선량 평가에 불확실성이 개입되어 있기 때문이다. 작업자 피폭과 관련된 다수의 보도와 관련 자료들이 있는데, 동경전력이 2011년 12월까지 방사선구역에서 복구 작업에 참여한 총 19,594에 대한 피폭선량(외부 및 내부 피폭 포함)을 평가한 결과는 다음과 같다.³⁷⁾

- 250 mSv 초과: 6명(동경전력 6, 협력업체 0)
- 200 mSv 초과 250 mSv 이하: 3명(동경전력 1, 협력업체 2)
- 150 mSv 초과 200 mSv 이하: 23명(동경전력 21, 협력업체 2)
- 100 mSv 초과 150 mSv 이하: 135명(동경전력 118, 협력업체 17)
- 50 mSv 초과 100 mSv 이하: 697명(동경전력 382, 협력업체 315)

37) 동경전력 Press Release(2012.1.31), Status of Exposure Dose Evaluation for the Workers at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.

- 20 mSv 초과 50 mSv 이하: 2,521명(동경전력 625, 협력업체 1,896)
- 10 mSv 초과 20 mSv 이하: 3,032명(동경전력 474, 협력업체 2,558)
- 10 mSv 이하: 13,177명(동경전력 1,741, 협력업체 11,436)

2011년 복구작업 종사자의 평균 피폭선량은 11.55 mSv이며(동경전력 23.53 mSv, 협력업체 9.06 mSv), 최대 피폭 선량은 동경전력 직원은 679 mSv, 협력업체 직원은 238 mSv인 것으로 평가하였다. 250 mSv 이상 피폭자의 선량은 309~679 mSv으로 평가되었는데, 대부분 요오드-131을 흡입한 영향으로 알려져 있다. 2012년 들어서는 원전 부지의 방사선량 준위가 크게 떨어졌기 때문에, 100 mSv를 초과하는 피폭자의 수는 거의 증가하지 않고 있다. 그러나 손상된 원전에 대한 조사와 오염물 제거 작업 등이 본격화됨에 따라 50 mSv 이하의 피폭선량을 갖는 작업종사자의 수는 계속 증가하고 있다.

나. 지역 주민의 피폭

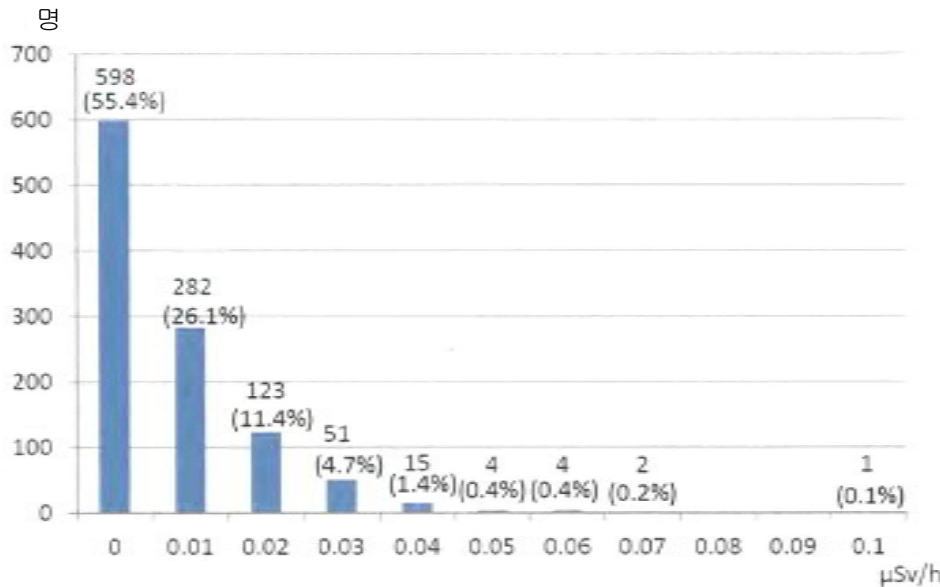
원전 주변 지역주민의 피폭선량 평가는 다양한 방법으로 이루어지고 있으며, 대부분의 내용이 후쿠시마현 홈페이지(<http://www.pref.fukushima.jp>)에 공개되고 있다.

후쿠시마현에서는 사고 직후인 2011년 3월13일부터 현 내 의료진 등의 도움을 받아 각 지역에서 긴급 피폭검사를 실시해왔는데, 건강에 영향을 미치는 사례는 보고되지 않았다. 2012년 2월8일까지 긴급 피폭검사를 받은 주민은 모두 243,992명이었으며, 그중 47%인 114,488명은 2011년 3월에 검사를 받았다.

한편, 원자력재해대책본부는 2011년 3월24일부터 30일 사이³⁸⁾에 후쿠시마 원전에서 30km 이상 떨어진 지역 중 비교적 방사선량이 높은 곳에서 만 0~15세 어린이 1,149명에 대한 갑상선 간이검사를 수행한 바 있다. 측정 조건이 갖추어진 1,080명 중에서 55.4%는 검출되지 않았으나, 43.6%는 0.01~0.04 $\mu\text{Sv/h}$, 1.1%는 0.05 $\mu\text{Sv/h}$ 이상(최고값: 0.1 $\mu\text{Sv/h}$)으로 나타났다. 이에 따라 즉각적인 의료조치는 필요하지 않은 것으로 판단되었으나, 장기적인 추적 조사가 필요할 것으로 보인다.

후쿠시마현 주민들에 대해서는 전신계측기(Whole Body Counter; WBC)를 이용한 내부 피폭 조사도 이루어졌다. 2012년 1월 말까지 약 14,000명에 대해 이루어진 Cs-134 및 Cs-137 오염 검사 결과, 건강에 의미 있는 영향을 줄 수 있는 방사선량 준위는 측정되지 않았고, 가장 높은 평가 결과는 3 mSv 수준으로 나타났다.

38) 일본 원자력안전위원회 회의자료(2011.9.5): <http://www.nsc.go.jp/anzen/shidai/genan2011/genan067/siryo1.pdf>



<그림 4.16> 후쿠시마 어린이들에 대한 감상선 간이검사 결과(2011년 3월)[후쿠시마현 홈페이지]

한편 후쿠시마현에서는 주민의 외부피폭 평가를 위한 조사를 대대적으로 실시하고 있다.³⁹⁾ 여기서는 설문조사를 통해 파악된 주민의 이동 경로와 방사성물질 확산 및 외부 방사선량에 대한 SPEEDI 시뮬레이션 결과를 함께 활용하여 주민의 피폭선량을 추정한다. 2011년 12월 발표된 선행조사 결과에 의하면, 사고 후 4개월에 대해 추정할 수 있는 최대 외부 피폭선량은 23 mSv였으며, 99% 이상이 10 mSv 이하, 58%가 1 mSv 이하로 나타났다. 이 결과는 설문에 대한 답변이 계속 회수됨에 따라 지속적으로 수정되어 발표되고 있다.

다. 세계보건기구의 임신 평가

최근 세계보건기구(World Health Organization; WHO)에서는 후쿠시마 원전사고로 인한 방사선 영향에 대한 예비 평가 결과를 발표하였다[WHO(2013)]. 2011년 9월까지 입수된 자료를 사용하여 건강 영향을 과소 평가하지 않도록 주의를 기울여 분석한 결과를 제시하고 있는데, 후쿠시마현 지역에 주민에 대한 방사선 영향 예측 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 방사선의 영향을 가장 크게 받은 지역을 제외하면, 후쿠시마현 내에서조차 사고에 의해 예측되는 리스크가 낮고, 관찰 가능한 수준의 암 발생률 증가가 예상되지 않는다.
- 2) 방사선량이 매우 낮기 때문에 후쿠시마 현의 일반 대중에게서 결정론적 영향이 나타날 것으로 예상되지 않는다.
- 3) 배아의 성장이나 임신 결과에 영향을 미치기에는 방사선량이 매우 낮아서 임산부 피폭으로 인한 자연유산, 출산 전후 사망, 선천성 결함, 인지장애의 증가가 나타날 것으로 예상되지

39) 후쿠시마현 홈페이지의 관련 자료: <http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/240813senryousuikei.pdf>

않는다.

4) 후쿠시마현에서 방사선량이 가장 높은 곳에서 피폭된 영아에게 나타날 수 있는 최대 영향은 방사선에 노출되지 않았을 경우 예상되는 기준값(Base Rate)과 비교하여 다음과 같이 예측된다.

- 남자 영아의 생애기간 백혈병 리스크는 기준값의 약 7%까지 증가할 수 있다.
- 여자 영아의 생애기간 유방암 리스크는 기준값의 약 6%까지 증가할 수 있다.
- 여자 영아의 생애기간 고형암(Solid Cancer) 리스크는 기준값의 약 4%까지 증가할 수 있다.
- 여자 영아의 생애기간 갑상선암 리스크는 기준값의 약 70%까지 증가할 수 있다.
- 기준 발생률이 낮기 때문에 개인의 암 리스크가 실제로 크게 증가하는 것은 아니다.

예를 들어 선량이 가장 높은 지역 여자 영아의 갑상선암 리스크 증가는 0.5% 수준이다.

5) 위의 예측은 후쿠시마현에서 가장 큰 피폭을 받은 지역의 영아에 대한 것이며, 두 번째로 피폭을 받은 지역에서는 생애기간 암 리스크 증가율이 각각 1/2 수준으로 낮아진다. 또한 유아 이거나 성인인 경우에는 영아에 비해 리스크 증가가 낮다.

6) 예측되는 영향은 방사선 피폭량이 줄어들수록 현저하게 낮아지며, 특히 일본 이외 국가에서 인지 가능한 영향이 나타날 것으로 예측되지 않는다.

4.4 방사성 제염 활동

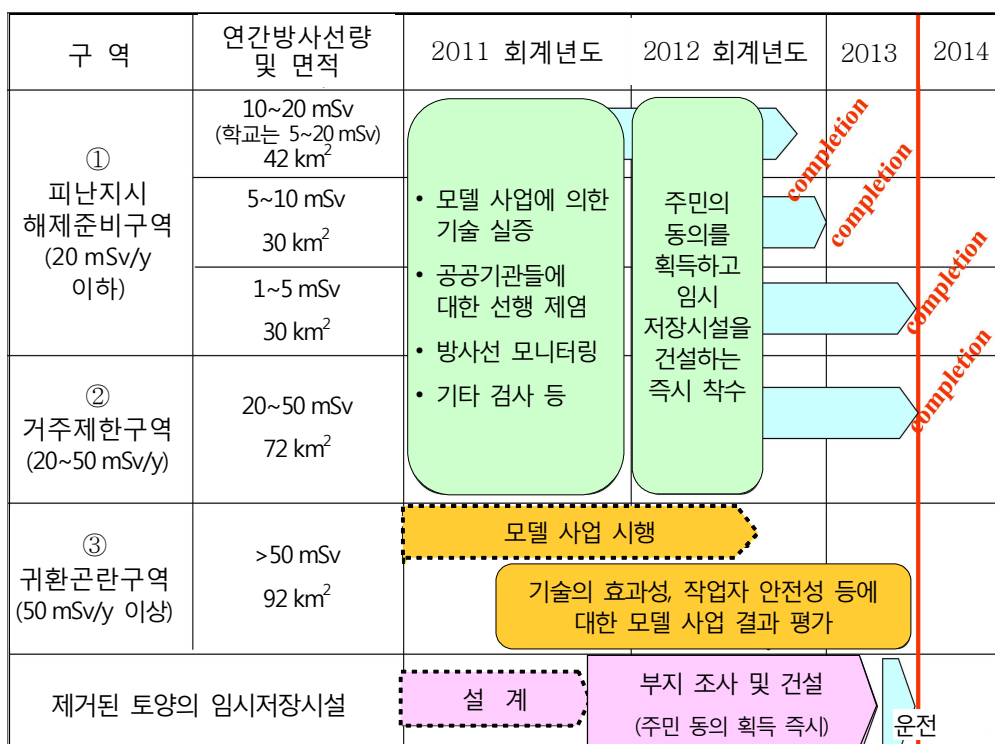
후쿠시마 사고로 방사성물질에 오염된 지역은 매우 넓으며, 연간 예상되는 피폭선량이 10 mSv를 초과하는 지역이 약 800km², 5mSv를 초과하는 지역이 약 1,800km²인 것으로 알려져 있다. 일본 정부는 방사성 오염으로 인한 대중의 방사선 피폭을 최소화하기 위하여, 제염 작업을 적극적으로 추진하고 있다. “제염작업을 추진하기 위한 기본정책”이 2011년 8월26일 원자력재해대책본부에 의해 결정되었다. 핵심 내용은 20mSv 이상의 연간선량이 예상되는 구역에 대한 제염 작업은 중앙정부가 주도권을 갖고 추진하여 신속하고 단계적으로 20 mSv 이하로 감소시키고, 연간선량 1~20 mSv의 지역에 대해서는 피폭선량을 1 mSv 이하로 감소시키기 위하여 지자체가 제염계획을 수립하고 시행하는 것이다. 중앙정부는 지자체에 전문가를 파견하고, 지자체에 의해 수행되는 제염작업에 대한 재정적 지원을 제공한다.

기본 정책이 담고 있는 장기 목표는 1mSv 이하의 연간 피폭선량을 실현하는 것이다. 잠정적인 목표는 2년 내에 연간 피폭선량을 최소한 50%를 감소시키는 것이며, 최우선적으로 어린이들의 환경(학교, 운동장 등)에 대한 철저한 제염을 수행하여 2년 이내에 연간 피폭선량을 60%까지 감소시킬 목표를 갖고 있다. 또한, 고방사능 오염지역의 경우에는 지역차원의 제염을 수행하지만, 슬러지가 모여진 배수구 또는 낙수 홈통과 같은 핫 스팟이 확인된 저방사능

오염지역의 경우에는 국부적인 제염을 수행하도록 권고하고 있다. 기본정책에는 2014년 3월 말까지 거주지역 주변의 빌딩, 도로, 농지, 숲 및 들판을 정화하고 이를 통해 제거된 오염 토양은 임시 저장 부지로 이송하는 내용을 포함하고 있다. 따라서 피난민들이 집으로 귀환하는 시간은 상기 제염 작업들이 완전히 종료되는 시점이 될 것으로 예상된다.

일본 정부는 후쿠시마 원전 사고에 의해 영향을 받는 농토를 어떻게 복원할 것인가에 대한 방안을 시험하여 왔으며, 표토 제거 및 심경(Deep Ploughing)과 같은 가장 효과적이라고 알려져 있는 기술에 역점을 두었다. 현재 중앙 정부는 제한 구역 및 계획적 피난구역에서의 제염 실증 프로젝트를 수행하고 있다. 이를 통해서 다양한 제염 방법에 대한 유효성이 시험되고 있으며, 이들 결과를 기초로 안전하고, 효율적이며, 성능이 우수한 제염 활동을 수행하기 위한 가이드가 확립될 것이다. 이러한 가이드를 사용하여 일본 정부는 지방 정부와 협력하여 2012년 말 전에 대규모 제염 활동을 계획하고 추진할 예정이다.

일본 정부는 2012년도에 제염을 위해 4,510억엔, 환경복원 및 재건축 프로그램에 2조 2,500억엔, 기타 작업으로 1조 690억엔의 예산을 책정하였다. 2012년 3월 말부터 본격적인 제염 프로젝트가 제한구역 및 계획적 피난구역 내의 11개 지자체에서 수행되고 있다. 2012년 1월26일 환경성에서는 새로운 구역 분류에 따른 제염 로드맵을 발표하였다.(<그림 4.17>)



<그림 4.17> 환경성이 수립하여 시행 중인 제염 로드맵[일본환경성 웹사이트⁴⁰⁾]

40) <http://www.env.go.jp/jishin/>

향후 풀어야 할 숙제 중의 하나는 제염 및 환경복구 과정에서 발생하는 폐기물 저장 문제이다. 이를 위해서 거주민의 동의를 확립한 폐기물 중간 저장 시설의 건설이 시급하게 필요하다. 제염 작업에 의해서 발생된 오염 토양, 침전물, 그리고 다른 폐기물은 현재 다양한 방법으로 임시 저장되어 있으며, 이러한 임시 저장시설에 3년 정도 저장해 두고 중간저장시설로 옮기어 10년 동안 저장을 하고 후쿠시마 현 밖에 있는 최종 처분장으로 옮길 계획이다.

4.5 한국 내 영향

국가 환경방사선 자동감시망을 통해 감시되고 있는 한국의 환경방사선량률은 지역과 자연 현상에 따라 평상시 대략 $0.05\sim 0.3\mu\text{Sv/h}$ 범위에 있다. 후쿠시마 사고 이후에도 평상 범위를 벗어나는 이상치는 없었으며, 방사선량 관점에서 본다면 우리나라에 미친 영향은 거의 무시할 수 있다고 판단된다.

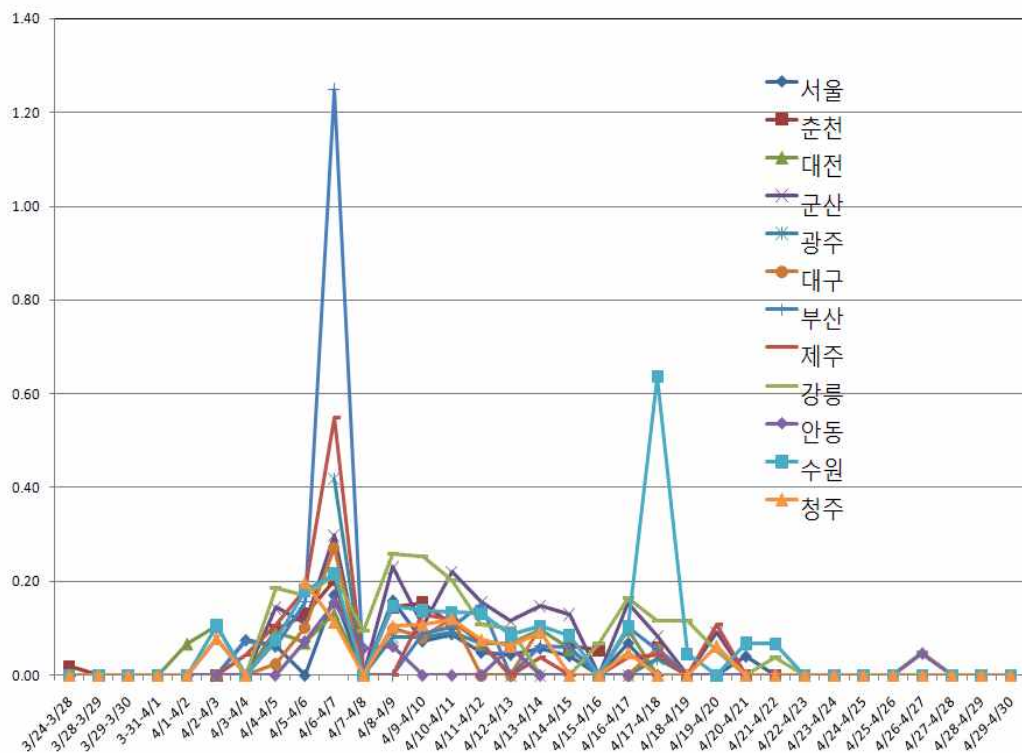
한편, 전국 12개 지방의 대기 환경 시료를 매일 채집하고, 비가 오면 바로 빗물 시료를 채취하여 방사성 핵종을 정밀 분석한 결과, 후쿠시마 원전의 영향으로 추정되는 I-131, Cs-134, Cs-137 등이 극미량으로 검출되었으며, 일부 지역의 대기에서는 Ag-110m가 검출된 바 있다. 3월 28일부터 4월 26일까지는 후쿠시마 사고에 기인한 방사성물질이 지속적으로 검출되었으나, 5월 28일부터 3일간 일부 지역의 대기에서 방사성세슘이 검출된 이후에는 더 이상 검출되지 않았다.

<그림 4.18>에 3월24일부터 4월30일까지 주요 도시에서 측정한 공기 중 Cs-137의 농도를 나타내었다. I-131은 4월6일 군산에서 최대 3.12 mBq/m^3 , Cs-134와 Cs-137은 4월7일 부산에서 각각 최대 1.19 mBq/m^3 , 1.25 mBq/m^3 로 검출되었으며, 빗물의 경우 I-131이 4월7일 제주에서 최대 2.81 Bq/L , Cs-134와 Cs-137은 4월11일 제주에서 각각 최대 1.67 Bq/L , 2.02 Bq/L 로 나타났다. 수돗물에 대해 29차에 걸쳐 조사한 결과, I-131과 Cs-137은 검출되지 않았으며, 해양환경 시료(해수 및 해양생물)에 대한 매월 분석 결과도 평소 수준으로 나타나고 있다. 토양 방사능 분석 결과, I-131은 검출되지 않았으며 Cs-137과 Pu도 과거 강대국 핵실험 결과로 평상 시 검출되는 수준이었다.

후쿠시마 사고로 인한 한국 국민의 피폭선량은 무시할 수 있다. 2011년 4월7일~8일 사이에 국내에서 관측한 I-131과 Cs-137의 농도가 그대로 유지된다고 하더라도 연간 피폭 선량이 0.0007 mSv 수준에 불과하였다. 이러한 선량을 기준으로 개인의 리스크를 평가하는 것은 과학적으로 무의미하며, 특히 한국인이 연간 자연방사선에 의해 피폭되는 선량인 3.0 mSv 와 비교하면 더욱 미미한 값이다. 한편, 후쿠시마 주변 아동의 갑상선 피폭 사실이 발표된 이후 우

리나라 어린이의 갑상선암 발생 증가를 우려하는 언론 보도로 인해 국민들의 불안감이 증폭되었었다. 그러나 국내에서 측정된 I-131의 양이 미미하다는 점과, 체르노빌 원전과의 거리가 한국과 후쿠시마 간 거리와 비슷한 스웨덴 북부지역에 대해 체르노빌 사고 이후 실시된 연구에서 백혈병과 갑상선암의 초과 발생이 없었던 점을 고려할 때, 후쿠시마 원전 사고와 관련하여 한국 어린이의 갑상선암 발생률 증가를 우려할 필요가 없다.

사고 오염수의 해양 방출 영향과 관련하여, 한국은 2011년 12월까지 해양방사능 상시감시 프로그램을 수립하여 운영하였다. 동·서·남해로의 방사성물질 유입 가능성을 확인하기 위하여, 3월26일부터 4월1일까지 근해 12개 지점과 원해 11개 지점에 대한 해수 시료와 해양생물(어류 14종, 패류 6종, 해조류 3종)을 현장 채취하여 방사성핵종을 분석하였다. 4월에는 국립수산물과학원 및 수산자원사업단의 협조로 표층 해수 25개, 층별 해수 19개, 해양 생물 17종을 채취하여 방사능을 조사하였다. 해양 시료 및 해양 생물에 대해 측정된 방사능은 사고 이전 평상시의 준위를 나타냄으로써, 후쿠시마 사고가 국내 해양 환경에 특이한 변화를 가져오지 않은 것으로 확인되었다.



<그림 4.18> 국내 공기중 측정된 Cs-137 농도[KINS(2012)]

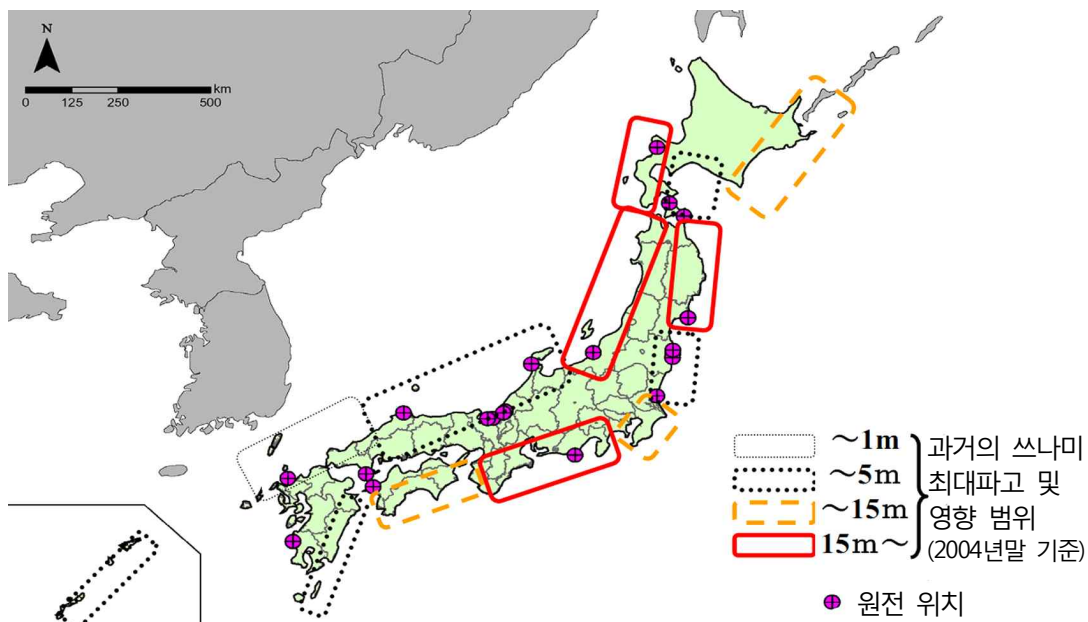
5. 후쿠시마 사고의 원인과 교훈

5.1 사고 발생 및 악화의 주요 원인

가. 사고의 근본 원인

1) 일본 고유의 자연재해 특성 고려 미흡

후쿠시마 제1원전 사고가 발생하고 효과적으로 대응하지 못한 근본적인 원인은 원전의 설계·건설·운영 과정에서 지진과 쓰나미가 빈발하는 일본 고유의 자연 환경 특성을 적절하게 고려하지 못한 데 있다. 건설 당시 적용된 부지 설계기준에서 지진에 의한 최대 지반 가속도를 0.18 g, 쓰나미의 최대 파고를 3.1 m로 설정했다는 것은 미국에서 개발된 원전을 일본에 도입하면서 일본 고유의 지질학적 특성을 적극적으로 반영하지 않았음이 명백하다. 대형 지진이 거의 없는 한국 원전들에 대한 설계기준 지진가속도가 0.2 g였음을 보더라도 0.18 g는 지나치게 낮은 값이다. 한편, 쓰나미와 관련해서는 869년의 조간 쓰나미를 포함하여 해당지역의 과거 기록조차 제대로 검토되지 않았음이 밝혀졌는데, 일본의 다른 원전들도 대체로 쓰나미에 대한 대비가 미흡했던 것으로 밝혀지고 있다.



<그림 5.1> 일본의 대형 쓰나미 기록 및 원전 위치[Mori et al. (2005)]

<그림 5.1>은 2005년 IAEA 워크숍에서 발표된 일본의 과거 쓰나미 기록과 원전 위치를 보여준다[Mori et al. (2005)]. 후쿠시마 지역의 최대 파고는 5 m 이하로 평가되고 있는데(869년의 조간 쓰나미 기록은 반영되지 않은 것으로 보임), 인접 지역에서는 15 m 이상의 쓰나

미가 관측되었음을 고려할 때 후쿠시마 원전에 대한 쓰나미 설계기준이 안일하게 설정되었다고 할 수 있다. 더욱이 15m 이상의 파고가 관측된 지역에 위치한 원전들도 다수 있었으나, 일본의 어느 원전도 15m 이상의 설계기준을 적용하지 않았다.

후쿠시마 원전 건설 후 일본 사회에서는 대형 지진이 핵심적인 위협 요인으로 인식되면서 원전에 대한 내진 성능 평가와 보강 작업을 적극적으로 추진한 결과, 설계기준이 0.45~0.50 g 수준(수평방향 지반가속도)으로 강화되었다. 그러나 쓰나미에 대한 연구는 활발하지 않았고, 1990년대 이후 얻어진 새로운 연구 성과의 반영에도 소극적이어서, 설계기준이 5.4~5.7 m로 상향 조정된 것 이외에는 본격적인 보강 작업이 이루어지지 않았다.

후쿠시마 원전에서 현실적인 쓰나미 조건을 고려하였다면 핵심 안전설비들의 위치를 변경하거나 침수에 대비한 설계를 보강함으로써 대응능력을 크게 향상시킬 수 있었을 것이다. 그러나 <그림 3.8>에서 보는 바와 같이 핵심적인 설비들이 야외 또는 건물 내의 지하 또는 1층에 위치하여 쓰나미 도달 후 침수되면서 일시에 기능을 상실하게 되었다.

2) 최상의 지식에 기반을 두지 않은 의사 결정

후쿠시마 제1원전의 건설 당시 자연재해에 대한 최상의 지식을 확보하여 활용하려는 노력이 부족했음은 앞서서도 언급하였다. 이는 원전의 안전에 대해 지나치게 낙관적으로 생각하고, 다양한 안전설비를 갖춘 원전에서는 중대사고가 발생하지 않으리라고 믿었기 때문이었을 수도 있다. 반면, 동일본 대지진의 진앙에서 가장 가까운 원전인 오나가와 원전의 경우는 쓰나미의 위험을 인식한 토목담당 중역이 자신의 자리를 걸고 당초 계획된 부지 높이를 높여야 한다고 주장하여 관철시켰기 때문에 이번에 안전했다고 한다. 이는 정확한 지식에 근거한 합리적인 의사 결정의 중요성을 일깨워준다.

더 중요한 문제는 원전 건설 이후에도 세계 각국의 원전에서 얻어진 사고 및 운전 경험과 중요한 연구 성과들을 성실하게 반영하지 않고, ‘우리 원전은 안전하다’는 잘못된 믿음을 계속 강화시켜 왔다는 점이다. TMI 사고 후 전 세계적으로 취해진 안전성 강화조치들을 일본에서도 도입하였지만, 전력회사와 규제기관에서 실제 중대사고 발생 가능성을 심각하게 받아들이지 않았음은 물론 사고 대응 조치의 완결성과 이와 관련한 교육훈련도 부족하였다고 본다. TMI 사고의 후속조치로 강화된 배기계통(Hardened Vent System)이 제대로 작동하지 않아서 격납용기 배기 후 수소가스 폭발이 발생한 점, 3호기에서 발생한 수소가스가 배기 과정에서 4호기 원자로건물로 이동하여 폭발한 점, 운전원들이 배기밸브가 설치된 위치를 찾지 못하여 작동시키는데 수 시간을 소요한 점 등은 모두 이와 관련되어 있다. 안전성 강화 조치에서는 단지 무엇을 하는 것이 중요한 것이 아니라, ‘최상의 지식을 근거로 제대로’ 하는 것이 더욱 중요하다.

최신 또는 최상의 지식이 제대로 활용되지 않은 배경으로 산업체(전력회사, 원전 공급업체)

와 규제기관이 일본 내의 관련 연구계 및 학계로부터 의도적으로 고립되어 있었던 것도 간과할 수 없다. 원자력 산업계와 규제기관은 상용 가압경수로 및 비등경수로 기술을 완성된 기술로 간주하고 스스로의 울타리 내에서만 해결하려 했다. 학계와 연구계에 많은 전문가들이 있었지만, 이들은 대부분 미래형 원자력 시스템과 관련된 연구에 집중하게 되었고, 이들의 지식이 원자력 산업과 규제에 효과적으로 활용되지 못하였다.

3) 제도/조직 및 규제의 실패

일본은 경제산업성 산하 자원에너지청에서 원자력 발전 산업을 담당하고, 그 산하의 원자력안전·보안원(NISA)에서 규제를 담당하는 체제였다. 이와 관련한 외부로부터의 규제 독립성 문제 제기에 대해 일본은 2가지 관점에서 방어하여 왔다. 첫째는 민간이 수행하는 원전 산업에 대해 정부부처인 경제산업성이 규제 업무를 수행하므로 아무런 문제가 없고, 둘째는 원자력안전·보안원과 원자력안전위원회(NSC)의 이중 점검(Double Check) 체계로 인해 안전 규제가 더욱 완벽하다는 것이었다. 그러나 후쿠시마 사고 후 경제산업성에서 독립된 새로운 규제기관을 설립키로 함으로써 과거의 논리에 문제가 있었음을 인정한 셈이다.

또한, 관료주의가 매우 강한 일본의 특성 때문에 원자력안전기반기구(JNES) 등 전문가 조직보다는 전문성이 부족한 관료 조직인 원자력안전·보안원이 실질적인 규제 결정 권한을 갖고 있었다. 특히, 경제산업성 등 관련 행정부서 공무원들이 퇴직 후 전력회사의 고위직으로 진출하는 경우가 많아서 정확한 기술적 판단에 근거한 규제가 엄정하게 이루어지기 어려웠다. 퇴직한 정부 관료가 관련 업체에 낙하산으로 취업하는 것을 가리키는 아마쿠다리(あまくだり; 天下り · 天降り)와 같은 관행은 규제기관의 독립성을 저해한 핵심적인 요인으로 받아들여지고 있다. 이와 함께 자신에게 직접 책임이 있는 일이 아니면 상관하지 않는 일본 특유의 문화가 외부로부터의 문제 제기를 차단한 측면도 있다.

4) 안전 문화의 미흡 및 유착문화

원자력에 종사하는 사람치고 ‘안전이 최우선’이라고 생각하지 않는 사람은 없을 것이나, 실제 행동은 생각이나 말과 다를 수 있다.

동경전력의 안전 문화에 대해 의심할 수 있는 사건은 후쿠시마 사고 이전에도 여러 차례 발생하였다. 2002년에는 원자로 내부 구조물의 균열을 장기간 은폐한 사실이 발견되어 가동 중이던 원전 17기 모두 2003년 여름까지 가동 정지된 바 있다. 또한 2006년에는 199건의 데이터 조작 사실이 확인되기도 하였다. 사건이 터질 때마다 경영진 교체와 사과 등이 뒤따랐지만, 안전을 최우선 가치로 삼는 안전문화가 회사 내에 뿌리를 내리지 못한 것으로 보인다.

안전 문화 문제는 동경전력에만 국한되지 않으며, 규제기관에서도 심각했던 것으로 판단된다. 일본은 54기의 상용 원전을 운영하고 있을 뿐만 아니라, 여러 종류의 시험용 또는 실

중용 원자로, 선박용 원자로, 핵연료 재처리 및 농축 등 원자력 관련 시설과 연구개발 활동이 매우 광범위하지만, 이에 상응하는 효과적인 안전관리체계를 구축하는 데는 실패했다고 본다. 독립적인 안전 관리·감독보다 사업자 자체의 품질관리 활동 등에 의존하는 경향이 컸으며, 안전규제 체제에 대한 외부의 비판이 많았음에도 이를 개선하려는 노력이 거의 없었다. 또한, 쓰나미 등 자연재해와 관련된 설계기준을 시의 적절하게 강화하는 데에도 실패하였다.

후쿠시마 사고는 기술적 측면 이외에 일본사회의 집단주의 특성, 여러 개인과 집단의 심리 기제 및 여러 기관의 조직문화의 영향도 컸던 것으로 보인다. 집단주의 문화에서는 자기가 속한 회사의 이익을 위하여 부정을 저지르거나 검사 결과를 조작할 수도 있다는 점을 고려하면, 과거 일본 동경전력의 검사 부정사건이나 후쿠시마 원전사고는 동경전력만의 문제가 아니라 원자력산업 전반에 퍼져있는 유착문화(Culture of Complicity)도 원인이 될 수 있다.

나. 사고 발생 및 악화의 기술적 원인

1) 초대형 쓰나미에 대한 무방비

후쿠시마 제1원전 사고의 가장 직접적인 원인은 높이 15 m 수준에 이른 초대형 쓰나미였다. 대지진으로 인해 외부에서 공급되는 교류 전력망이 완전히 붕괴되었으나, 12대의 비상용 디젤발전기가 가동하여 안전 기능 유지에 필요한 핵심적인 교류 전력을 공급하고 있었다. 그러나 지진에 수반하여 발생한 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 안일하게 결정되었을 뿐만 아니라, 이를 초과하는 쓰나미에 대한 대책이 수립되지 않았기 때문이다. 쓰나미에 대해 합리적인 고려를 했다면 안전 관련 핵심 설비들의 설치 위치를 변경하거나, 차단벽이나 방수설비 등을 크게 보강했을 것이다. 결국 설계기준을 안일하게 설정하면서도 이를 초과하는 쓰나미에 대한 대응설비 등 하드웨어나 절차서 및 교육훈련 등 소프트웨어 측면의 대비에 소홀하였고, 이것이 중대한 사고 발생의 직접적인 원인이었다고 할 수 있다.

2) 중대사고 대책의 미흡

후쿠시마 원전에 대해서도 1990년대에 중대사고에 대비한 설비 개선이 이루어지고 중대 사고관리지침서(Severe Accident Management Guidelines; SAMG)가 도입되었다. 원자로 및

격납용기로의 냉각수 주입 방법을 다양화하고 소방차를 이용한 주입 라인도 확보했으며, 격납용기에서의 수소가스 폭발을 방지하기 위해 질소주입계통을 설치하고 배기계통을 강화하였다. 또한 인접 호기와의 전력망 연결 등을 통하여 전원의 다양화를 통한 신뢰도 향상을 꾀했으며, 당초 10대의 수냉식 비상디젤발전기만 갖추고 있던 후쿠시마 원전에 3대의 공랭식 비상디젤발전기를 추가로 설치하였다. 이렇게 보강된 설비들은 사고의 초기 진행을 억제하는 데는 한계가 있었지만, 사태를 궁극적으로 수습하는 데에는 큰 역할을 하였다.

이러한 설비 보강에도 불구하고 종합적인 관점에서 후쿠시마 원전의 중대사고 대책은 크게 미흡하였다. 우선 중대사고관리지침서가 다분히 형식적이었던 것으로 보고되고 있고, 운전원들은 전원이 완전히 상실될 때의 원자로 거동에 대해 충분히 이해하지 못하였다. 이미 많은 양의 핵연료가 용융되고 일부는 원자로용기 밖으로 누출되었을 것이 확실했던 시점까지도 냉각수 주입과 관련하여 효과적인 논의가 이루어지지 못한 것은 의사 결정자들이 중대사고 시의 원자로 거동을 충분히 이해하지 못했기 때문이다. 또한, 다수 호기에서 동시에 중대사고가 진행되는 상황에 대한 대비가 전혀 없었는데, 이는 사고 당시까지 다른 나라에서도 마찬가지였기 때문에 원전의 안전성 확보와 관련하여 새로운 시사점을 던져 주었다.

3) 지진과 쓰나미에 의해 악화된 작업 환경

후쿠시마 원전에서 다수 호기의 중대사고가 진행되는 것을 신속하게 억제하지 못한 것은 지진과 쓰나미로 인하여 발전소에 접근하는 도로와 발전소 내부 도로의 상태가 크게 악화되어 이동식 비상 설비들을 손쉽게 활용하지 못한 데에도 큰 영향을 받았다. 만일 정상적인 환경이었다면 이동식 발전기나 펌프 등의 핵심 장치들을 훨씬 더 쉽게 이용함으로써, 중대사고로의 진행을 억제할 수 있었을 것이다. 지진이 발생한 3월 11일의 경우, 지진과 쓰나미로 인해 발전소 현장에서 유무선 통신망조차 거의 마비되어 수습 대책 수립이 어려웠던 것으로 알려져 있다.

사고가 급속하게 진행된 1호기에 대해서는 악화된 작업 환경이 직접적인 영향을 주지 않았을 것으로 보이지만, 피동안전계통이 작동하여 2~3일 동안 원자로 비상 냉각이 이루어졌던 다른 호기들의 경우에는 작업 환경만 좋았다더라면 대량의 노심 용융이나 수소가스 폭발은 예방할 수 있었을 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 격리응축기(IC) 작동 상태에 대한 오판: 격리밸브들의 작동 특성을 고려하면 쓰

나미로 의해 직류전원이 상실된 이후에는 격리응축기가 정상적으로 기능할 수 없었음. 그러나 상당기간 동안 정상 작동하는 것으로 오인하였으며, 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 노심격리냉각계통(RCIC), 이후에는 고압냉각수주입계통(HPCI)에 의한 원자로 냉각이 이루어짐. 3월 13일 새벽 임시 설치된 디젤구동 소방펌프를 이용하여 냉각수를 주입하기로 결정하고 불안정해진 HPCI를 정지시켰으나, 축전지 고갈로 원자로 감압밸브 작동에 실패하여 냉각수 주입이 이루어지지 못했는데, 축전지 상태를 사전에 파악하지 않은 것이 큰 실수였음.

③ 격납용기 배기밸브 작동 문제: 사고에 대비한 배기밸브 작동 훈련은 주로 주제어실에서 간단히 버튼을 누르는 것으로 실시되었기 때문에, 전원 상실로 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 3월 12일 15시36분 발생한 1호기 원자로건물에서의 수소가스 폭발이 첫 번째 큰 사건이었고, 3월 14일 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 한 두 가지가 잘 진행되었다면, 1호기 수소가스 폭발부터 예방할 수 있었거나 그 이후의 사고 진행을 억제시킬 수 있었을 것이다. 특히, 2호기 배기밸브만 제대로 개방했다라도 방사성물질 방출량을 크게 줄일 수 있었다고 평가되고 있다.

후쿠시마 제1원전에서 초대형 쓰나미가 휩쓸고 간 이후의 상황을 돌이켜보면, 사고의 악화를 며칠 내로 진정시킨 운전원들의 노력을 인정하지 않을 수 없다. 그러나 운전조직원 이 사고 시의 발전소 거동에 대해 좀 더 잘 알고 있었거나 관련된 사람들 간의 의사소통이 좀 더 원활하게 이루어졌다면 사태의 악화를 더 일찍 중단시킬 수 있었는데, 이는 현장 운전원들의 잘못이라기보다는 이러한 사태를 사전에 대비하지 못한 데 근본적인 원인이 있다.

5) 원자로 내부 상태에 대한 정보 부족

발전소 상태에 대한 정보와 이해 없이는 사고에 대한 적절한 대응이 매우 어렵다. 후쿠시마 사고 발생 직후부터 운전원들이 방사선량이 증가하고 있는 깜깜한 암흑 속에서 온

도, 압력, 수위 등 핵심적인 정보를 얻기 위해 사투를 벌였음에도 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 어려웠다. 운전원들은 손전등과 이동 전원을 이용하여 주기적으로 주요 변수들을 확인했는데, 원자로 내부의 상태를 정확하게 유추하기에는 한계가 있었다. 특히, 원자로 수위계의 경우 지진 등의 영향으로 성능이 저하되어 잘못된 값을 표시함으로써 원자로 내에 상당한 양의 냉각수가 존재하고 있는 것으로 오해하게 만들어 사고 대응에 많은 혼란을 초래하였다. 물론 후쿠시마 원전에 설치되었던 대부분의 계측기들은 중대사고 환경에 대해 검증되지 않은 것들이었다.

그리고 의존할만한 계측기가 매우 제한적이고 현장이 혼란한 상황에서는 외부 전문가들을 최대한 활용하여 다양한 사고 시나리오를 분석하면서 원자로 내부의 상태를 추정하여 사고 관리에 활용했어야 했다. 하지만 후쿠시마 사고의 초기 과정에서는 JNES 등의 중대사고 전문가들조차도 의사결정 과정에서 자기 목소리를 내지 못하였고, 중요한 의사결정들이 잘못된 정보나 상식적인 판단에 따라 이루어진 것으로 보인다.

6) 다수 호기에서의 동시 중대사고 전개

동일본 대지진은 3개 현에 위치한 총 14기의 원전에 직접적인 영향을 주었고, 동경전력은 후쿠시마 제1원전(총 6개 호기)과 제2원전(총 4개 호기)에 대해 각각 시시각각으로 비상대피 선언을 해야 하는 상황을 맞았다. 다행히 제2원전의 상황은 수 일 내에 수습되어 안정화 단계에 이르는 저온 정지(Cold Shutdown) 상태를 확보했지만, 사고 초기 동경전력은 2개 원전 부지, 10개 호기에서의 위기 상황을 동시에 파악하면서 통제해야 하는 상황에 내몰렸던 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 임시 전기 공급 라인이나 냉각수 주입 라인을 망가뜨리기도 하고, 작업자들이 일시적인 피신을 필요로 하기도 하였다. 특히 사태가 진행되면서 방사능 준위가 계속 높아짐에 따라 작업 환경이 매우 악화되었다.

5.2 후쿠시마 사고의 교훈

원자력의 특성 상 원자로와 원전의 개발 및 이용에 있어서는 안전 문제가 초기부터 최우선적인 과제로 고려되었으며, 이에 따라 다른 산업시설에 비하여 상대적으로 엄격한 안전관리체계와 높은 수준의 안전성을 보였다. 그러나 더 이상 향상시킬 필요가 없을 정도로 높은 안전 수준이란 없으므로, 운전 경험과 사고의 교훈 및 연구 성과들을 반영하면서 안전성을 지속적으로 향상시켜야 함은 이론의 여지가 없다. 특히, 원자력 이용의 역사를 살펴보면 원자력 시설에서 발생한 대형 사고들이 안전성을 획기적으로 향상시키는 계기로 작용하였다.

1950년대에는 다양한 종류의 실험용 원자로들이 건설되었는데, 당시 지식과 경험의 미숙으로 인하여 크고 작은 사고들이 발생하였다. 특히 부주의에 의한 반응도 사고들이 여러 차례 발생하면서 원자로정지계통의 신뢰도 문제가 중요하게 대두되었고, 이에 따라 원자로정지계통에는 서로 다른 작동원리를 갖는 2가지 이상의 설비를 채택하는 것이 일반화되었다. 동시에 설계기준사고(Design Basis Accident; DBA) 및 심층방어(Defense-in-Depth; DID)의 개념이 정립되고, 사고 시 방사성물질의 외부 방출을 방지하기 위해 격납용기(또는 격납건물) 요건도 도입되었다. 1979년 발생한 TMI 사고는 원전 안전 문제에 대한 새로운 각성을 가져왔으며, TMI 사고 후속조치로서 다수의 안전성 증진 대책들이 전 세계적으로 이행되었다. 중대사고 현상과 대처 방안에 대한 연구개발이 본격화되고, 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment; PSA), 인적 실수, 격납용기 등과 관련한 연구와 응용이 활발하게 이루어졌다. TMI 후속조치를 통해 전 세계 원전들의 중대사고 발생 가능성은 1/10 수준 이하로 줄어든 것으로 평가된다. 이후 발생한 1986년의 체르노빌 사고에서도 원자로 정지 능력과 격납용기의 중요성이 다시 확인되었으며, 특히 안전문화가 원자력에서 중요한 문제로 고려되는 계기가 되었다. 그러나 체르노빌 사고는 옛 소련이라는 폐쇄된 국가의 특정 원자로형에서 발생한 사건으로 인식되어 안전성 향상에 실질적으로 미친 영향은 TMI 사고보다 작았다.

1986년의 체르노빌 사고 이후 25년 동안 전 세계적으로 400여 기의 원전이 운전되면서도 대형 사고가 발생하지 않았던 것은 사고로부터 얻어진 교훈들이 원전의 설계, 건설 및 운영에 적극적으로 반영되었기 때문이다. 이러한 관점에서 대형 자연재해로부터 비롯되어 다수 호기에서 중대사고가 발생한 후쿠시마 사고의 경우도 사고의 원인과 교훈을 철저하게 분석하여 그 결과를 안전성 향상에 반영해야 할 것이다.

한국원자력학회 후쿠시마위원회는 후쿠시마 사고에 대한 분석 결과를 바탕으로 하여 ① 안전 철학 및 확보체계, ② 중대사고 예방을 위한 설계 안전성, ③ 중대사고 대처 능력,

④ 비상대응(방재) 체계, ⑤ 원자력 안전 기반 등 5개 분야에서 총 22개 항목의 교훈을 도출하였다. 이들은 <표 5.1>에 요약·정리하였으며, 각 항목들은 뒤에 보다 구체적으로 설명한다.

<표 5.1> 후쿠시마 사고의 교훈 요약

분 야	교 훈
[1] 안전 철학 및 확보체계	1-1) 원전 안전을 위한 심층방어 전략을 보완하고 강화시켜야 한다. 1-2) 원전 안전 목표에 인명손실 측면과 사회적 위기 측면이 함께 고려되어야 한다. 1-3) 방사선안전기준, 비상대피기준 등의 정비와 국제적 조화가 필요하다. 1-4) 규제기관의 독립성과 전문성이 매우 중요하다. 1-5) 안전에 대한 운영기관의 책임이 더 강조되고 관련 인프라가 강화되어야 한다.
[2] 중대사고 예방을 위한 설계 안전성	2-1) 자연재해에 대한 설계기준을 재검토하고 대응능력을 향상시켜야 한다. 2-2) 전원공급계통의 다양성과 신뢰성을 강화해야 한다. 2-3) 피동 안전성 및 최종 열제거기능 강화를 통해 붕괴열을 신뢰성있게 제거해야 한다. 2-4) 원전 설계 및 운영에서 리스크 정보를 더욱 적극적으로 활용해야 한다. 2-5) 사용후연료저장조의 안전특성을 재확인하고 강화할 필요가 있다.
[3] 중대사고 대처능력	3-1) 원전의 중대사고를 가정하고 현실적인 대응능력을 갖추어야 한다. 3-2) 극한적 중대사고 대응까지를 포함하여 원전 절차서들이 개선되어야 한다. 3-3) 사고 대응에 중요한 계측기 등 원전 상태 감시설비가 보강되어야 한다. 3-4) 사고 대응은 최상의 매뉴얼 구비와 함께 인간의 창의성에도 의존해야 한다.
[4] 비상대응(방재) 체계	4-1) 비상대응시설을 포함하여 대형사고에 대비한 비상대응시스템을 강화해야 한다. 4-2) 방사선 감시체계, 신속한 방사능 확산·영향 평가, 작업자 선량 관리가 강화되어야 한다. 4-3) 원자력시설 사고에 대비한 의료대응체계가 준비되어야 한다. 4-4) 원전 사고에 대비한 소통체계가 강화되어야 한다. 4-5) 인접국가 원전 정보를 확보하고 사고 영향을 평가할 수 있어야 한다.
[5] 원자력 안전 기반	5-1) 원자력 안전문화가 체질화되고 독립적으로 평가되어야 한다. 5-2) 원자력 안전연구가 강화되고 성과가 공유되어야 한다. 5-3) 방사선에 대한 이해를 증진시키기 위한 노력이 강화되어야 한다.

가. 안전철학 및 확보체계 강화

1) 원전 안전을 위한 심층방어 전략을 보완하고 강화해야 한다.

방사성물질과 인간/환경 사이에 여러 겹의 방벽(Multiple Barriers; 다중 방벽)을 두고 이들을 보호하기 위해 여러 단계의 방호(Multiple Levels of Protection) 조치를 취하는 심층방어(Defense-in-Depth; DID) 전략은 1950년대 이래 높은 수준의 원자력 안전을 달성하기 위한 핵심적인 철학이자 방법론으로 간주되어 왔다⁴¹⁾. 반면, 후쿠시마 사고는 일단 후쿠시마 제1원전에 적용된 심층방어 전략이 초대형 자연재해에 의해 무너진 것이라 할 수 있다. 그러나 후쿠시마 사고가 심층방어 전략이 효과가 없었음을 보여주는 것은 아니며, 오히려 심층방어 전략의 이행에 철저하지 못했던 점을 반성하면서 보완해야 한다는 점을 보여주었다. 후쿠시마 제1원전의 경우 방사성물질의 외부 누출을 막는 가장 중요한 방벽인 격납용기가 취약점을 지니고 있었지만 이를 보완하기 위한 조치들이 미흡했던 점을 중요한 예로 들 수 있다.

후쿠시마 사고 이후 IAEA나 OECD/NEA 등 원자력관련 국제기구를 중심으로 심층방어 전략을 개선하기 위한 논의가 이루어지고 있다. 이를 통하여 그동안의 사고들에서 발견된 취약점들을 종합적으로 검토하고 더욱 완결성이 높은 전략으로 재정립해야 할 것이다. 심층방어 전략의 보강 관점에서 중요한 것은 기존에 원전 설계에서 고려해온 사고의 범위를 확장하여 중대사고의 가능성을 더욱 낮추고, 중대사고 시에도 방사성물질 외부 누출을 극소화하기 위한 대비를 강화하는 것이다. 또한, 다중 방벽들 간의 독립성을 강화하여 동시에 손상될 가능성을 줄여야 하며, 결정론적 접근 방법과 확률론적 접근 방법의 효과적인 연계도 고려할 필요가 있다.

안전성 향상을 위한 구체적인 방안들은 이어지는 각 항목들에서 다룬다.

2) 원전 안전 목표에 인명손실 측면과 사회적 위기 측면이 함께 고려되어야 한다.

원자력 안전의 핵심적인 목표는 원자력시설의 운영으로부터 발생할 수 있는 방사선 재해로부터 인간과 환경을 보호하는 것이다. 이와 관련하여 지금까지 대량 피폭에 의한 단기 사망자 수와 암 발생에 따른 잠재적 사망자 수 등 인명 피해에 초점을 맞추어 많은 노력을 기울였다. 인명 피해 가능성의 극소화는 앞으로도 원자력 안전에서 최우선적으로 추구되어야 할 과제임에 틀림없다.

후쿠시마 사고의 경우 체르노빌 사고의 20% 수준에 달하는 대량의 방사성물질이 대기 중으로 방출되어 광범위한 방사성 오염을 일으켰음에도 불구하고, 비상 대피 등이 비교적 효과적으로 이행되어 방사선 과다피폭으로 인한 단기 사망자는 발생하지 않았다. 향후, 소

41) 국제원자력기구 국제원자력자문단은 심층방어 전략을 “Defense in Depth in Nuclear Safety”(INSAG-10, 1996)를 통해 정리한 바 있음. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1013e_web.pdf)

량의 방사선에 피폭된 주민들과 작업자 중에서 나중에 사망자가 발생할 가능성을 배제할 수는 없으나⁴²⁾, 기존의 암 발생률이 의미 있게 증가하지 않을 것임은 분명한 것 같다. 반면에 이번 사고가 미친 사회적·정치적·심리적 영향은 2만 명에 가까운 사망·실종자를 낸 지진과 쓰나미에 비할 바가 아닐 정도로 클 수 있으며, 사고 원전 인근 지역은 높은 방사선량률로 인해 일상적인 활동이 어려운 상태가 상당기간 지속될 것이다. 1986년 발생한 체르노빌 사고의 경우에도 막대한 양의 방사성물질이 방출되고 작업자 및 주민에 대한 보호조치들이 제대로 이루어지지 못했음에도 실제 확인되거나 추정되는 인명 피해는 일반적인 예상보다 작았던 반면, 사고가 가져온 정치·사회적 파장은 막대하였다.

이러한 점을 고려할 때, 향후 원자력 안전 문제를 다룰 때는 인명 손실 측면은 물론, 사회적 위기 측면과 산업적 피해 측면도 함께 고려하는 목표를 설정하는 것이 바람직하다.

3) 방사선안전기준, 비상대피기준 등의 정비와 국제적 조화가 필요하다.

방사선 안전과 관련한 국제방사선방호위원회(ICRP)의 안전기준은 관련된 과학적 지식과 임상경험이 축적되는 것을 반영하여 계속 수정되어 왔다. ICRP의 새로운 기준이 공표되면 대부분의 국가는 통상 자국의 여건을 반영하여 어느 정도의 시차를 두고 도입하지만, 미국과 같이 독자적인 기준을 고수하는 국가도 있다.

원자력 시설이나 방사선 기기 등의 정상적인 운전과 관련한 개인 방사선량 한도 등은 ICRP 권고 등에서 비교적 잘 정의되고, 각국이 기본적으로 이를 도입하므로 큰 문제가 되지는 않는다. 그렇지만, 식수, 농산물, 수산물, 공산품 등에 대해 허용되는 방사능 또는 방사성물질 농도 등은 국가별로 차이가 크고, 기준이 정해지지 않은 경우도 많다. 이는 곧 각국에서 사용하고 있는 기준에 대한 불신으로 이루어지고, 대중은 가장 엄격한 기준을 선호할 가능성이 많다. 따라서, 이와 관련하여 국제적으로 통용될 수 있는 기준이 정비될 필요가 있다.

후쿠시마 사고는 원자력 사고 시의 피난(소개) 기준과 복구 기준에 대한 심층 검토가 필요함을 보여주었다. 사고 당시 직접적인 방사선 피폭으로 사망한 주민은 없었으나, 열악한 환경의 피난생활을 하는 과정에서 생활의 불편이나 스트레스가 노인들의 사망을 촉진시킨 경우가 다수 보고되고 있다. 방사능이 높은 상황이 아니라면 노인들의 경우는 피난이 조금 지체되더라도 피난 예정지의 환경이 정비될 때까지 기다리는 것이 위험도 관점에서 나올 수 있다. 또한 사고로 오염된 토양의 복구와 관련해서도 합리적인 기준을 마련하는 것이 바람직하다.

42) 최근 스탠포드대학의 Ten Hoeve & Jacobson은 후쿠시마 사고로 인한 전 세계의 암 발생자 수를 180명 수준(24~1,800명), 이로 인한 사망자 수를 130명 수준(15~1,100명)으로 추정한 바 있다.[Ten Hoeve & Jacobson(2012)]. 또한 세계보건기구(WHO)는 후쿠시마 사고의 방사선 영향을 예비적으로 분석한 결과를 발표하였는데(WHO(2013)), 후쿠시마 원전 부근의 주민에게 있어서 결정론적 영향은 나타날 가능성이 매우 낮고, 암 발생률로 방사선을 가장 많이 받은 주민들에게서만 조금 상승하는 것으로 예측하였다.

4) 규제기관의 독립성과 전문성이 매우 중요하다.

2001년 설립된 원자력안전·보안원(NISA)은 상업적 목적으로 이용되는 모든 원자력관련시설 및 활동(원자력발전소 및 핵연료 관련 시설, 방사성 폐기물 관련 시설, 상업용 원전을 위한 연구시설 등)에 대한 안전규제 업무를 수행하도록 되어 있으나, 원자력의 이용 및 진흥을 담당하는 경제산업성 산하 자원에너지청의 산하조직이었다. 별도로 원자력안전위원회가 설치되어 NISA를 감독하고 중요사항에 대해 권고하는 기능을 갖고 있었다. 그렇지만 관료의 힘이 강한 일본에서 민간 출신 전문가들로 구성된 안전위원회가 감독 기능을 제대로 발휘할 것으로 기대하기 어려워서, 후쿠시마 사고 이전부터 일본 원자력체계에서 진흥과 규제의 분리가 미흡하다는 지적이 국제사회로부터 지속되어 왔다. 이러한 체계 하에서 일본의 규제기관은 일단 건설된 원전의 안전성 개선을 위한 규제활동에 소극적이었고, 후쿠시마 사고의 중요한 원인이 되었다고 판단한다.

한편 원자력 안전규제와 관련한 의사 결정은 최상의 전문성에 근거하여 이루어져야 한다. 일본의 경우 NISA 산하에 원자력안전기반기구(JNES)라는 전문기관을 설치하여 안전규제의 전문성을 보완하고 있지만, JNES의 많은 인력이 산업체로부터 이직해온 전문가들이어서 독립성 측면의 한계가 있었을 뿐만 아니라, 후쿠시마 사고 진행 중 중요한 의사결정에서 전문가들의 역할이 크지 않았던 것으로 보인다.

후쿠시마 사고 이후 일본과 한국은 안전규제의 독립성을 강화하는 방향으로 원자력 행정기구 개편이 추진되었다. 실질적인 독립성 확보와 더불어 규제기관의 전문성 확보를 위한 노력도 필수적이다.

5) 안전에 대한 운영기관의 책임이 더 강조되고 관련 인프라가 강화되어야 한다.

후쿠시마 사고의 가장 직접적인 책임자는 원전을 소유하고 운영한 동경전력이다. 동경전력이 원전 건설 당시에 자연재해 가능성에 더 주의를 기울였거나, 운전에 들어간 이후라도 보다 적극적이고 열린 자세로 안전성을 확보하기 위한 노력을 기울였거나, 사고 대응 절차를 더 철저하게 준비하고 운전원에 대한 교육훈련을 더 잘 시켰더라면 후쿠시마 사고를 예방하거나 피해를 크게 줄일 수 있었을 것이다. 한편, 사고 당시 상상하기 어려울 정도로 열악한 상황에서도 운전등에 의존하여 발전소 변수를 파악하고, 가용한 모든 자원을 동원하면서 사고의 진행을 억제시키는 데 주도적인 역할을 한 조직도 동경전력이었다. IAEA 안전기준의 최상위 문서인 “기본 안전 원칙(Fundamental Safety Principles)” 문서[IAEA(2006)]에서도 첫 번째 원칙으로 “안전에 대한 근본적인(일차적인) 책임은 방사선 리스크를 가져올 수 있는 시설이나 행위에 대해 책임이 있는 사람 또는 조직에게 있다”⁴³⁾고 명확하게 기술하

43) The prime responsibility for safety must rest with the person or organization responsible for facilities

고 있다.

원전 운영기관으로서 원전 운영으로부터 이익을 창출하는 것이 중요한 경영목표이기 때문에, 안전 문제가 경제성 또는 효율성 문제와 충돌할 때 후순위로 밀릴 가능성이 항상 존재한다. 안전문제가 발견되더라도 주관적인 판단으로 무시하거나 해결을 미룰 가능성도 있다. 특히 사소하다고 생각되는 안전문제 때문에 원전이 장기간 운전을 중지해야 할 가능성이 있거나 개인적인 징계가 예상된다면 이는 곧 은폐 유혹으로 연결되기 쉽다. 따라서 원전 운영기관에는 구호로서가 아닌 실체로서의 안전 최우선 절차 및 관행이 확립되고 필요한 인프라가 구축되어야 한다.

이와 관련하여 중요한 사항을 살펴보면, 기관의 안전철학에 대한 전 조직원의 공유, 최고 경영진의 확고한 안전 의지 표명 및 인사, 상벌 등에 의한 입증, 시설 운영 조직과 독립적이고 권한이 있는 안전 감시조직 운영, 안전문화 정착을 위한 지속적인 노력 및 평가, 효과적인 품질관리체계 구축 및 엄격한 적용, 전문성을 고려한 적재적소 인력 배치, 원전 사고에 신속하게 대응할 수 있는 전문 인력 확보, 운전·사고경험의 효율적 반영체계 구축 등 매우 다양하다.

나. 중대사고 예방을 위한 설계 안전성 강화

1) 자연재해에 대한 설계기준을 재검토하고 대응능력을 향상시켜야 한다.

후쿠시마 사고는 초대형 지진으로 외부 전력망이 붕괴된 상태에서 해당 원전의 설계기준을 초과하는 쓰나미가 발생하여 안전에 중요한 전력계통, 취수구 구조물 및 다수의 안전 설비들이 침수되거나 파손되어 기능을 발휘하지 못함으로써 초래된 것이다. 이에 대한 주요 원인으로는 미국에서 개발된 설계를 일괄발주 방식으로 건설하는 단계에서 부지의 자연재해 특성을 충분히 반영하지 않고, 비상디젤발전기, 분전반, DC 축전지, 취수 펌프 등 핵심 안전설비들을 침수 방지 기능이 미흡한 터빈건물이나 해변에 설치한 것을 들 수 있다. 이로 인해 교류 및 직류 전원의 상실뿐만 아니라 최종 열제거 기능의 상실을 포함한 핵심 안전 기기의 고장 또는 파손이 동시에 발생했는데, 두 가지 중에서도 어느 하나만 문제가 없었더라도 사태 수습이 훨씬 쉬었을 것이다.

사고 후 동경전력에서는 설계기준을 초과한⁴⁴⁾ 초대형 쓰나미에 의해 유발된 불가항력적인 사태였다는 인식을 드러냄으로써 대중의 공분을 일으켰다. 그러나 설계기준을 보수적으로 설정해야 할 뿐만 아니라 설계기준이 초과될 가능성을 염두에 두고 대비할 책임도 전력회사에 있으므로, 동경전력이 책임을 다하지 못한 점은 명백하다. 지진, 태풍, 화

and activities that give rise to radiation risks.

44) 일본에서는 ‘想定外’로 표현함

재, 홍수, 쓰나미 등 자연재해나 이번 사고와 같은 복합재난과 관련한 설계기준을 정할 때는 인근지역에서의 과거 기록을 면밀하게 분석하고, 기후변화 등 미래의 시나리오들도 불확실성을 충분히 고려하면서 반영해야 한다.

이번 사고는 자연재해로부터 비롯되었지만, 지진에서 비롯된 외부 전원 상실이나 취수구 파손 등은 인공적인 테러에 의해서도 유발될 가능성이 있다. 후쿠시마 사고는 원전 설비 자체의 신뢰도 향상뿐만 아니라, 자연적·인공적인 외부 사건에 대한 대응능력 향상에도 더 관심을 기울여야 함을 보여준 사고이다.

2) 전원공급계통의 다양성과 신뢰성을 강화해야 한다.

후쿠시마 사고는 원전에서 전원공급계통이 얼마나 중요한가를 여실히 보여주었다. 지진으로 인해 발전소 외부 전력망이 붕괴되고 쓰나미에 의해 모든 교류 전원과 대부분의 직류 전원이 기능을 상실함으로써, 운전원들은 주요 기기를 조작할 수 없었을 뿐만 아니라 발전소 상태에 대한 기본적인 정보도 확보하기 매우 어려웠다. 또한 주제어실을 비롯한 발전소 현장의 조명조차 이루어지지 않았기 때문에, 그야말로 최악의 환경에서 엄청난 재난에 맞서 싸웠던 것이다.

이번 사고에서 비록 전원 상실뿐만 아니라 해수에 의한 냉각시스템의 붕괴 등 다수의 핵심기기들의 손상이 동시에 발생했지만, 전원이 완전히 상실되지 않았거나 신속한 복구가 이루어졌다면 사고의 결과의 심각성이 훨씬 덜했을 것이다. 예를 들어 축전지만이라도 고갈되지 않았더라면 발전소 상태를 훨씬 쉽게 파악했을 뿐만 아니라, 감압 밸브 등의 조작이 쉽게 이루어져서 대부분의 수소가스 폭발과 대규모 방사성물질 방출을 막았을 가능성이 높다.

비상사태에 대비한 전력계통의 신뢰성 제고는 비상디젤발전기 및 연료공급계통 신뢰도 향상, 축전지 용량 증대, 이동식 전원 확보 등 다양한 방법으로 추진되어야 한다. 특히 비상디젤발전기나 축전지 자체의 신뢰도뿐만 아니라 분전반 등 배전설비, 연료공급계통·냉각계통 등 보조설비의 신뢰도도 함께 확보되어야 한다.

3) 피동 안전성 및 최종 열제거기능 강화를 통해 붕괴열을 신뢰성있게 제거해야 한다.

후쿠시마 사고는 위급 상황에서 원자로를 신속하게 정지시켜서 핵분열 반응을 중단시키는 데에는 성공했으나, 연료봉 내부에 축적된 방사성물질이 붕괴하면서 생성하는 붕괴열 제거에 실패하여 방사성물질을 환경과 격리시키는 방벽들이 손상된 사고이다. 가압경수로, 비등경수로, 가압중수로 등 물에 의해 냉각되는 원자로는 일단 원자로가 정지된 이후에는 노심, 즉 핵연료가 냉각수에 잠기기만 하면 충분한 냉각이 가능하다. 따라서 원자로 안으로 냉각수를 공급하는 것이 가장 중요한 과제이며, 이를 달성하는데 교류전원이 필요

하지 않은 피동(Passive) 계통과 펌프나 밸브 등을 작동시키기 위해 교류전원이 필요한 능동(Active) 계통이 사용될 수 있다. 일반적으로 능동 설비는 효율성 관점에서 유리하고 피동 설비는 신뢰도 관점에서 유리하므로, 두 가지 종류의 설비를 적절히 조합하여 사용하는 방향으로 고려할 필요가 있다.

후쿠시마 제1원전의 1호기는 피동 안전계통인 격리응축기(IC)가 쓰나미 이후 제대로 작동하지 않아 사고 수 시간 만에 노심의 용융이 시작되고 하루 만에 수소가스 폭발이 발생했다. 반면에 2호기와 3호기에서는 교류전원의 완전 상실에도 불구하고 피동 안전계통인 노심격리냉각계통(RCIC)이 작동함으로써(3호기에서는 RCIC가 멈춘 후 고압냉각수주입계통(HPCI)도 작동함) 수 일 동안 노심 용융 및 수소가스 폭발이 늦춰졌다. 그 사이에 2,3호기에 냉각수 주입이 적절히 이루어졌다면 사고가 수습될 수 있었을 것이다.

후쿠시마 사고는 전력공급계통의 중요성과 함께 외부 전기에 의존하지 않는 피동 안전 설비의 가치를 잘 보여주었다. 향후 원전의 안전성은 능동 설비와 피동 설비를 잘 연계하여 확보하되, 운전원이 사고 직후의 혼란에서 벗어나 다양한 대응수단을 모색할 수 있을 때까지 필요한 최소한의 안전 기능은 피동계통에 의해 달성되도록 추구하는 것이 바람직하다. 능동 계통과 피동 계통의 최적 결합이나 운전원 개입 전까지 견뎌내야 할 시간 등은 리스크 정보를 활용하여 결정할 수 있다.

한편, 2,3호기의 피동안전계통이 결국 성능을 잃게 된 것은 해수 등을 이용하는 최종 열 제거 기능이 상실(Loss of Ultimate Heat Sink; LUHS)되었기 때문이다. 따라서, 극한 자연 재해나 테러 등이 발생하더라도 필요한 최종 열제거 기능을 유지하거나 신속하게 복구할 수 있도록 설계의 평가 및 강화가 필요하다.

4) 원전 설계 및 운영에서 리스크 정보를 더욱 적극적으로 활용해야 한다.

후쿠시마 제1원전 1~5호기에 채택된 Mark-1 격납용기의 경우 외부사건(자연재해 또는 인공적 재해)에 대한 취약성은 오래 전부터 지적되어 왔는데, 대표적인 것이 미국 원자력 규제위원회(USNRC)가 1991년 발행한 확률론적안전성평가(PSA) 보고서 NUREG-1150 [USNRC(1990)]이다. 이에 따르면 다양한 비상노심냉각계통을 갖춘 BWR의 경우 내부적인 요인으로 인해 중대사고가 발생할 가능성은 PWR보다 훨씬 낮으나 외부 사건에 대해서는 강점이 없으며, 특히 일단 노심이 용융되는 사고가 발생하면 격납용기가 손상될 가능성이 매우 높다는 결과가 제시되어 있었다. 이번 사고는 이를 그대로 확인함으로써 PSA 또는 리스크 평가의 유용성을 잘 보여주었다.

일본에서도 모든 원전에 대해 PSA를 수행하였으나, 내부 기기 고장에 의한 내부사건 PSA와 지진 PSA가 주로 수행되어왔다. 후쿠시마 원전은 다른 나라에서 일반적으로 수행되는 침수 PSA도 수행되지 않은 것으로 알려져 있으며, 이는 IAEA 전문가 보고서에서도 향후

개선점으로 지적된 바 있다. 아울러 쓰나미 설계 기준을 결정할 때 확률론적인 방법을 사용하지 않음으로써 이번과 같은 대형 쓰나미의 발생 확률을 전혀 고려하지 못한 것으로 알려져 있다. 아직 세계적으로도 상세한 쓰나미 PSA 방법이 정립되어 있지는 않지만, 이번 사고는 리스크 평가 방법론의 문제라기보다는 심각한 자연재해의 가능성을 충분히 고려하지 않은 원자력산업계 전체의 문제로 볼 수 있다.

리스크 정보는 일차적으로 사고 예방을 위한 설계와 정상 및 비상운전 절차 개발에 활발하게 활용되어 중대사고의 발생 가능성을 극소화해야 한다. 다음에는 중대사고가 발생했을 때 방사성물질의 외부 방출을 최소화하기 위한 중대사고 완화 설계와 중대사고 관리 절차서 개발에 실질적으로 사용되어야 한다. 지금까지는 정상운전 조건에서의 제한된 범위의 내부사건 PSA(내부 화재/침수 PSA 포함)와 지진 PSA가 수행되어 왔다. 그러나 근래에는 태풍, 홍수, 쓰나미와 같은 더 광범위한 외부 사건에 대한 PSA, 원전 정지 중 PSA 및 외부 주민 피해 평가 등 PSA의 범위가 확대 되고 있다. 아울러 후쿠시마 사고 이후는 다중 호기 및 사용후핵연료 저장조 PSA에 대한 요구가 증대되고 있다.

리스크 정보 활용의 확대에 있어서 가장 중요한 측면 중의 하나는 리스크 평가에 사용되는 고장 확률이나 인적 실수 확률 등 기초 데이터의 신뢰도이다. 원전 고유 특성을 반영한 실제적인 데이터를 확보하기 위한 노력과 산업체의 정직한 데이터 사용, 이에 대한 규제기관의 엄격한 검증 노력이 필요하다고 본다. 또한 리스크 정보의 활용 노력과 기존의 결정론적 안전성 평가 체계를 효과적으로 연계시켜 통합적인 안전성 확인 체계를 구축하려는 노력도 필요하다.

5) 사용후연료저장조의 안전특성을 재확인하고 강화할 필요가 있다.

후쿠시마 사고 이전에도 사용후연료저장조에서의 냉각수 고갈 시 안전문제에 대한 관심이 일부 있었지만, 후쿠시마 사고는 이 문제를 크게 부각시켰다. 사고가 진행되던 당시에는 4호기에서 발생한 수소가스 폭발의 원인으로 저장조 내의 연료봉이 산화되면서 다량의 수소가스가 생성되어 폭발한 것으로 추정되었으며, 이로 인해 저장조의 건전성이 의심되는 상황이었다. 더욱이, 저장조가 원자로건물의 높은 위치에 있기 때문에 바닥이나 벽체의 균열로 냉각수가 대량으로 누출되는 사태가 발생하면 다량의 연료봉이 공기에 노출되기 때문에 사용후연료저장조의 안전 확보가 초미의 관심사가 되었다. 다행히 4호기 사용후연료저장조 구조물은 안전하게 보강되어 우려하던 사태는 발생하지 않았다.

상기 상황은, Mark-I 격납용기에서와 같이 저장조가 건물의 높은 위치에 있는 것은 바람직하지 않고, 수조 내의 냉각수 상태, 특히 수위 정보를 손쉽게 확인할 수 있어야 함은 물론, 수조 내의 냉각수가 고갈되는 경우에 대비하여 냉각수를 손쉽게 공급할 수 있는 설비가 구비되어야 한다는 사실을 시사하고 있다.

또한, 후쿠시마 사고를 통하여 수조 내에 대량의 핵연료를 저장(습식 저장; Wet Storage)하는 것보다 소량씩 건식 저장(Dry Storage)하는 것이 극한 상황에서의 안전성 관점에서는 유리할 수도 있다는 점이 확인된 바, 향후 사용후연료 중간 저장 방법을 결정할 때 중요하게 고려되어야 할 것이다.

다. 중대사고 대처 능력 강화

1) 원전의 중대사고를 가정하고 현실적인 대응능력을 갖추어야 한다.

TMI 사고와 체르노빌 사고 이후에도 원자력계 내부에서 중대사고에 대한 시각이 다양하였다. 낙관적인 그룹은 과거의 중대사고는 특수한 경우일 뿐이며, 그 후에 안전성을 크게 향상시켰으므로 자신들의 원전에서는 중대사고가 발생하지 않을 것이라고 믿었다. 이들은 중대사고를 심각하게 생각하고 대비하는 것은 비용-효과(Cost & Benefit) 측면에서 비논리적이라 여기고, 최소한의 설비 개선과 절차서 등을 갖추면 충분하다는 입장을 견지하였다. 다른 한편에서는 안전계통의 신뢰도 향상에도 불구하고 중대사고의 가능성은 있으므로 중대사고 가능성을 미리 예상하고 실질적인 대응책을 갖추어야 한다고 보았다. 일견 후자의 관점이 당연한 것처럼 보일 수도 있지만, 중대사고에 대비한 설비 개선은 때로 많은 비용을 수반하는 경우가 있어서 단순하지 않고, 어느 수준까지의 사고를 고려해야 하느냐는 문제에도 봉착하게 된다.

후쿠시마 사고 전 전반적인 일본 원자력계는 중대사고의 발생 가능성을 매우 낮게 보고 있었다. 이러한 이유로 가동 중 또는 개발 중인 원전의 중대사고 대응능력을 향상시키기 위해 TMI 사고 후속조치를 취하기는 했으나, 완결성 측면에서는 이론의 여지가 있다. 안전성 향상을 위해 TMI 사고 후속조치가 제대로 이행되었다면 수소가스 폭발이 대부분 예방되는 등 후쿠시마 사고의 결과가 훨씬 완화되었을 것이다.

중대사고 시 나타날 수 있는 물리적 현상과 안전에 대한 위협 요인들이 다양하기 때문에 당연한 모든 현상들을 동일한 수준으로 다루는 것은 바람직하지 않다. 원자로 격납용기의 건전성에 직접적이고 급박한 위협을 가져올 가능성이 있는 고압조건에서의 노심 용융물 방출 시나리오의 설계를 통해 확실하게 배제하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 원자로의 신속한 감압을 위한 밸브들과 이들을 작동시키기 위한 전력계통(축전지)의 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 원자로의 압력이 낮아진 상태에서는 용융된 핵연료를 원자로용기 또는 격납용기 내부에 억류시킴으로써 대규모의 방사성물질 외부 누출을 차단해야 한다. 이를 위해서는 용융된 핵연료의 붕괴열을 제거할 수 있어야 하며, 수소가스 폭발이나 증기 폭발 등에 의한 격납용기 손상 가능성도 제거해야 한다.

중대사고 대응 능력의 강화를 위해서는 ① 중대사고 현상에 대한 이해 및 예측 능력의 향상, ② 중대사고의 진행을 완화시키기 위한 설비의 보강, ③ 중대사고 시 원자로 내부 계측성

능의 향상, ④ 중대사고 관리 절차서의 보강, ⑤ 중대사고 관련 교육훈련의 강화 등이 서로 연계하여 이루어져야 한다. 이를 뒷받침하기 위한 연구개발과 실질적인 설비 강화를 위한 재원 투자가 필수적이며, 최상의 지식을 갖춘 전문가들도 지속적으로 육성되어야 한다. 위의 여러 항목들은 뒤에서 다시 별도의 항목으로 논의한다.

2) 극한적 중대사고 대응까지를 포함하여 원전 절차서들이 개선되어야 한다.

원전의 운전과 사고에 대한 대응은 기본적으로 해당 절차서에 따라 이루어진다. 절차서가 충실하게 작성되고 운전원이 충실히 따른다면, 사건·사고의 가능성을 줄일 뿐만 아니라 작은 사건·사고가 중대사고로 이어지는 것을 방지하고, 중대사고 시에도 방사성물질의 방출을 최소화할 수 있다. 하지만 이는 어디까지나 절차서가 제대로 작성되었을 경우에만 적용될 수 있는 상황이며 제대로 된 절차서의 작성은 예상되는 상황과 발전소 거동에 대한 정확한 이해가 있어야만 가능하다. 특히 중대사고와 같이 발생 가능성이 매우 낮은 상황에 대한 절차서·지침서는 자칫 형식적으로 작성되기 쉬우므로 주의가 필요하고, 최상의 지식과 전문성이 활용되었는지에 대해 규제기관이 철저하게 검토할 필요가 있다. 특히, 후쿠시마 사고 이후 도입되는 다양한 설비 및 관련 운전방법이 기존의 비상운전 체계와 충돌하지 않도록 종합적인 검토가 이루어져야 한다.

원전 사고 시 적용되는 절차서로는 설계기준사고에 대한 비상운전절차서(Emergency Operating Procedures; EOP)와 설계기준을 초과하는 중대사고 관리를 위한 중대사고관리지침서(Severe Accident Management Guidelines; SAMG)가 대표적이고 발전소의 광범위한 손상에 대응하는 극한재해완화지침서(Extensive Damage Mitigation Guidelines; EDMG)의 활용도 확대되고 있다. 이러한 절차서·지침서들은 최상의 지식을 반영하여 개발되어야 하며, 절차서 간에 일관성 있고 효과적으로 연계될 수 있어야 한다. 특히 후쿠시마 사고와 같은 다중호기 사고와 원전 교류전원 상실 사고시에 대한 절차서도 반드시 준비되어야만 한다.

후쿠시마 사고와 유사한 상황에 대처하기 위해 요구되는 중대사고 대응지침서, 특히 EDMG의 경우 발전소 내부의 설비뿐만 아니라 발전소 인근 지역사회의 여러 자원들도 고려해야 하며, 최악의 경우 원거리에서 이동시켜 활용할 수 있는 자원들도 고려하면서 개발되어야 한다. 중대사고의 예방과 완화를 위해 하드웨어를 개량하는 데는 한계가 있지만, 절차서·지침서를 개발할 때는 최대한의 상상력을 발휘해야 한다는 의미가 "Imagine the Unimaginable"이라는 말에 잘 함축되어 있다.

3) 사고 대응에 중요한 계측기 등 원전 상태 감시설비가 보강되어야 한다.

후쿠시마 사고에서는 원자로 내부를 비롯한 원전 상태에 대한 직접적인 정보의 부족으로 사고 수습에 커다란 어려움을 겪었다. 이는 교류 및 직류 전원이 상실되고 주제어실

의 기능이 거의 마비되어 다양한 계측기들로부터 얻어지는 정보들을 확인할 수 없었던 것이 가장 큰 원인이지만, 계측기 자체가 기능을 상실한 경우도 있다. 후자의 대표적인 예가 원자로 수위계이다. 원자로 내부 수위는 원자로 상하 위치의 압력 차이를 측정하여 환산하는데, 핵연료 높이의 절반쯤은 계속 냉각수에 의해 잠겨있는 것으로 표시되었고, 공식적으로 계속 발표되었다. 이에 따라 심각한 노심 용융이 진행되지 않았을 수도 있다는 판단을 하게 만들었다. 수개월이 지난 후 1호기에서 처음으로 수위계가 잘못되어 있음을 확인했는데, 새롭게 보정된 수위는 대부분의 핵연료가 녹아내려 원자로용기 하부헤드를 뚫고 격납용기로 방출된 상태를 가리켰다. 수위계가 오작동을 한 원인은 지진으로 인한 진동 과정에서 차압계의 압력균형관에 채워진 냉각수가 일부 유실되었기 때문인 것으로 추정된다.

원전의 안전 기능 유지나 사고 관리에 필수적인 계측기기 및 보조설비들은 요구되는 운전 환경에서 기능을 발휘할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 견고하게 설계·제작되어야 할 뿐만 아니라, 사고 시 예상되는 극한 환경에도 충분히 견딜 수 있도록 내환경 검증 등을 통해 성능이 검증되어야 한다. 이는 계측기 자체뿐만 아니라, 계측 및 지시에 요구되는 전원 등 관련설비들에도 적용된다.

4) 사고 대응은 최상의 매뉴얼 구비와 함께 인간의 창의성에도 의존해야 한다.

일본이 후쿠시마 사고뿐만 아니라 대지진과 쓰나미에 대한 효과적인 초기 대응에 실패한 중요한 원인 중의 하나로 '매뉴얼 의존 사회'가 지적되고 있다. 매뉴얼에 있는 것은 매우 잘 이행되지만, 매뉴얼에 없는 경우에는 의사결정을 내리는데 시간이 걸렸고, 적기에 필요한 조치를 취하는데 실패한 경우가 많았다는 것이다. 출장 중이던 동경전력 사장의 조기 복귀 실패, 도로 잔해물 제거의 지연 및 긴급 인력 이동 문제, 원자로 해수 주입의 지연, 자위대 출동 지연 등 여러 문제들이 이와 관련되어 있다.

사고나 사건에 대처하는 매뉴얼은 사전에 가정된 상황이 발생할 때는 커다란 위력을 발휘한다. 따라서 원전에서 정상 운전이나 고장 및 사고와 관련하여 운전원 대처에 대해 최상의 매뉴얼 체계를 구축하고, 이를 철저히 따르도록 하는 것은 매우 중요하다. 그러나 이와 아울러, 매뉴얼에서 미처 생각하지 못한 상황이 발생할 경우에는 담당조직 또는 담당자가 가용한 정보를 최대한 활용하면서 창의적으로 대처할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 매뉴얼 적용이 불가능한 경우에 대처하는 기본 방향이 명확하게 정립되어야 하고, 담당자들이 올바른 판단으로 창의적 대응을 할 수 있도록 교육과 훈련을 철저히 해야 한다.

기술적인 관점에서 높은 수준의 원자력 안전은 3가지 단계로 달성할 수 있을 것이다. 첫 단계로 다양한 위해요인들을 고려하여 설비 자체의 안전성을 확보하고, 다음 단계로

최대한 체계적이고 완결성 있는 매뉴얼을 구비하여 고장 및 사고에 대응하며, 마지막 단계로 미처 예상하지 못한 사태가 발생한 경우에는 인간의 창의력을 최대한 활용하여 대처하는 것이다. 최종 단계와 관련하여, 발전회사 내에 최고수준의 사고 대응 전문가 그룹을 확보하거나, 비상 시 외부 전문가와의 연계체계를 사전에 구축하는 것도 매뉴얼에 없는 사고를 대처하기 위한 방안이 될 수 있을 것이다.

라. 비상대응(방재) 체계 강화

1) 비상대응시설을 포함하여 대형 사고에 대비한 비상대응시스템을 강화해야 한다.

후쿠시마 사고 시 비상대응체계는 매뉴얼 상으로는 잘 정립되어 있었지만, 실제 원전 사고라는 비상사태에서 운영되면서 많은 문제점을 노출하였다. 긴급사태 시 대응조직인 '원자력 재해대책본부'에 여러 기관과 조직(산업체 및 지방 자치단체 포함)이 포함된 복잡한 체계이면서, 모든 정보가 총리실로 모여 결국 총리실에서 중요한 결정을 내리는 구조였기 때문에 신속한 결정을 내리는데 많은 시간과 절차가 필요하였다. 그리고 의사결정 과정에서 전문가의 의견이 배제된 경우가 많았고, 그 과정이 혼란스럽기까지 하였다. 사고 초기 단계에 총리가 기술적인 문제까지 과잉 개입하여 사고 수습에 부정적인 역할을 미쳤다는 견해도 있으나, 현 단계에서 정확한 판단을 하기 어렵다. 또한 사고 대응 시 각 기관별로 역할에 대한 명확한 구분이 없었고, 기관 간의 소통이 잘되지 않았다. 특히 현장을 통제하는 발전사업자와 국가 기관과의 소통에 문제가 있었다. 따라서 비상대응체계는 그 구조가 간단하고 명료해야 하며, 사고에 대응하는 전문가 집단에게 신속하게 결정을 집행할 수 있는 권한이 부여되어야 하고, 참여 기관의 역할과 권한이 명확하게 정의되어야 한다.

후쿠시마 사고에서는 비상대응조직 간의 책임 분담 및 협조체계 이외에도 두 가지 중요한 문제점이 노출되었다. 첫째는 동경전력 본사의 초기 대응 문제이다. 사고 발생 시점에 지방출장 중이던 동경전력 사장이 교통편 문제로 다음 날 오전에야 회사에 도착하는 등 긴급대응능력의 한계를 드러냈다. 둘째는 후쿠시마 원전 인근 오프사이트센터(OFC)의 기능 미비이다. OFC는 원자력 재난 시 현지대책본부가 설치되도록 마련된 시설이지만, 후쿠시마 원전 인근의 OFC는 외부로부터의 방사성물질 유입을 효과적으로 차단할 수 있는 시설이 미흡하여 이용할 수 없었고, 현지대책본부는 후쿠시마현 청사에 마련해야만 했다. 아울러 사고 인근 지역의 주민 소개 단계에 SPEEDI가 계산하는 방사성 오염 정보가 주민 대피에 활용되지 못한 것도 아쉬운 항목이다.

일본이 1999년의 도카이무라 핵연료 재처리공장 사고를 겪은 후 비상대응시스템을 대폭 개선했던 점을 상기할 때, 사고를 경험하지 않은 다른 나라들은 비상대응체계를 전체적으로

재검토하고 필요한 개선 조치를 취할 필요가 있다. 특히, 후쿠시마 사고와 같이 다중 호기에서 동시에 발생하거나 장기간에 걸쳐 지속되는 사고를 고려해야 한다. 이러한 경우 사고 대응 및 구호 인력과 다른 자원이 분산되는데 따른 어려움을 가져올 수 있다.

실제 사고 시 제 기능을 다하지 못한 오프사이트센터와는 달리 후쿠시마 제1원전의 면진 건물에 설치된 비상대응센터는 제 역할을 다하였다. 이 면진건물은 대형 지진에 견디고 방사성물질 차단 및 환기 기능을 갖추고 있었으며, 발전소 비상대응센터가 활동할 공간뿐만 아니라 정보수집, 통신, 회의, 비상용품 저장, 샤워 등을 위한 시설들을 갖추고 있었다. 이번 사고 시 비상대응센터는 초대형 지진과 초대형 쓰나미, 발전소 부지의 높은 방사선량률에도 불구하고 기능을 유지하여, 사고 수습에 결정적인 역할을 하였다. 발전소대책본부와 비상대응작업자들이 사고 원자로와 매우 가까운 거리의 발전소 현장에 머무를 수 있었기 때문에 시시각각으로 변하는 상황에 즉각적인 대응이 가능하였다.

원전 부지 내에서 사고를 수습하는데 사용될 핵심적인 시설과 원전 인근에서 방사능 방재를 지휘하기 위해 필요한 시설은 예상되는 자연재해와 방사능 환경에 대응할 수 있는 충분한 능력을 갖추어야 한다.

2) 방사선 감시, 방사성 확산·영향 평가, 작업자 선량관리 체계가 강화되어야 한다.

원전 사고 시 방사성물질의 방출과 확산은 불연속적으로 일어나고, 풍향, 지리, 날씨 등에 의해 방향이 변화할 수 있다. 따라서 사고 상황의 분석과 주민 보호를 위해서는 무엇보다도 실측된 방사선량준위가 최우선적으로 필요하다. 그러나 사고 초기 원전 주변 모니터링지점의 환경방사능 감시 장비와 전원 및 통신설비 등이 지진 및 쓰나미로 인해 대부분 파괴되어 제 기능을 하지 못하였다. 방사선 감시는 방사선량계를 직접 휴대한 인력에 의해서 간헐적으로 수행되었는데, 그나마 도로사정 등 열악한 조건으로 제대로 수행되지 않았다.

또한, 사고 발생 및 전개 과정에서의 방사선 영향 평가를 수행하는데 필요한 기상 및 방사선원향 정보를 취득하는데도 다소 미흡하였다. 사고 초기에 정전으로 인해 격납건물 및 발전소 내외부 기상 및 방사선 감시설비가 작동하지 않아 대기 및 해양환경으로 방사성물질 누출량을 정확히 파악할 수 없었다. 따라서 방사성물질 확산 예측 시스템인 SPEEDI를 이용하여 방사능 확산 범위를 예측하는데 어려움을 겪었고, 결과적으로 방사성물질이 많이 누출되던 시점에 바람이 향하던 북서쪽으로 주민이 대피하는 경우를 미연에 방지하지 못하는 상황이 발생하였다.

한편, 사고의 장기화에 따른 환경모니터링을 위한 관계부처간 역할분담이 명확히 수립되지 않아서 '11년 7월경에 중앙정부 차원에서 종합모니터링 계획(Comprehensive Monitoring Plan)을 발표하고 이때부터 체계적으로 모니터링을 실시하였다. 후쿠시마 원전사고와 같이 중대사고의 경우 주변지역에 대한 방사성오염은 장기간 지속이 되기 때문에 복구과정에서

의 시계열상 단계별 모니터링계획이 필요하고, 특히 관계부처 간 역할분담이 평상시에 명확히 구분되어 있어야 한다.

쓰나미로 인하여 개인 방사선량계도 다수 유실되어 현장 작업자들에게 선량계를 개인별로 배분하지 못하고 팀별로 배분하였다. 이로 인해 작업자들 중 일부에 대해서는 추정선량으로 평가할 수밖에 없었는데, 재난에 대비하여 선량계를 안전한 장소에 보관할 필요가 있다. 또한 내부선량평가를 위한 전신 계측기를 사고에 대비하여 충분히 준비해야 하고 측정시스템의 정비가 필요하다. 또한, 사고의 진행으로 방사성물질 누출이 증가됨에 따라 방사선 관리구역 외의 구역도 관리구역으로 설정해야 할 정도로 방사성물질이 확산되었다. 이 과정에서 관리대상이 아닌 종사자들의 피폭선량이 1mSv 이상이 된 경우도 있었다. 따라서, 방사선관리구역의 확대 시 개인선량을 적절히 통제하는 방안을 강구해야 한다.

한편, 자연재해를 동반한 원전 사고 시 응급의료체계가 붕괴될 가능성을 감안해서 발전소 내 진료실과 협약병원, 지방자치단체, 중앙정부와의 긴밀한 의료지원시스템이 이루어져야 한다.

3) 원자력시설 사고에 대비한 의료대응체계가 준비되어야 한다.

사고 이전 후쿠시마현에는 8개의 병원에 1,240명이 입원할 수 있고 17개의 복지시설에 983명이 입소 가능하였다. 그렇지만, 사고 이후 원전 인근지역으로부터 소개된 환자를 수용하기에는 역부족이었으며, 소개시설의 확충과 의료 인력의 확보를 중요한 과제로 남겼다.

한편, 소개된 환자들에 대한 입원 결정이 신속하게 이루어지지 못하였다. 이는 평상시 의료 인력과 학생들을 대상으로 한 방사선에 관한 교육이 강화되어야 할 이유이다. 또한, 방사선비상진료체계가 세밀하게 정비될 필요성이 있는데, 2차 비상진료기관인 후쿠시마의 과대학이나 다른 의료기관들은 동시에 파견 진료를 포함한 재난의료대책을 수행해야 했기 때문이다. 다행히 원자력재해현지대책본부가 방사선비상진료체계를 즉각적으로 재건하고 3차 병원을 포함한 대학병원과의 공조대응시스템을 강화하였는데, 방사선 비상진료체계는 필요한 기능을 수행한 것으로 평가되고 있다.

방사성물질 누출 사고 시 방사성 요오드의 흡입으로 인한 암 발생을 최소화하기 위해 안정화 요오드가 사용되는데, 후쿠시마에서는 신속하고 정확하게 분배되지 않았다. 따라서 실제 대피 시 지방자치단체가 주민들에게 안정화 요오드를 분배하는 방법을 시나리오별로 정리할 필요가 있다. 집단적인 비상 대피 시의 버스 안이나 입원 중인 병원 등에서 분배하는 것이 현실적이고, 스스로 대피하는 경우는 대피 장소에서 의사의 판단에 따라 분배되어야 할 것이다.

4) 원전 사고에 대비한 소통체계가 강화되어야 한다.

후쿠시마 사고는 특히 사고의 초기 대응 단계에 있어서 심각한 소통 문제를 노출하였다. 사고 수습에 직접 관여한 기관 및 개인 간의 소통 미흡 문제는 앞에서도 언급한 바 있다. 더 심각했던 것은 책임 있는 당국과 일반대중 간의 소통 문제, 일본과 사고에 관심 있는 다른 국가와의 소통 문제, 잘못된 정보의 확산(일부는 의도적이었을 가능성이 있음) 문제 등이었다.

사전에 충분히 대비하지 못한 심각한 사고가 발생하는 경우, 사고 수습에 책임이 있는 주체들은 외부와의 소통에 충분한 주의를 기울이기 어려운 반면, 외부에서는 충분한 정보가 없는 경우 마음대로 상상하기가 쉽다. 따라서 사고 발생 이후 운영될 소통체계를 개선하는 것만으로는 소기의 성과를 거두기 어렵고, 사전에 사건 유형에 따라 소통되어야 할 내용과 방법에 대해 준비되어야 한다. 현재의 사고통보체계 등이 효과적인지, 사고 발생 시 마스크와 국민이 필요로 하는 정보를 생산·제공할 수 있는 준비가 되어있는지 등에 대해 후쿠시마, 체르노빌, TMI 사고의 경험을 종합적으로 분석하여 필요한 개선이 이루어져야 한다.

5) 인접국가 원전 정보를 확보하고 사고 영향을 평가할 수 있어야 한다.

일본에서 가장 가까운 국가인 한국의 국민과 언론매체는 후쿠시마 사고에 대해 매우 민감하게 반응하였다. 이는 체르노빌 사고 당시 유럽에서 보인 반응을 돌이켜보더라도 자연스런 반응이었고, 사고 초기에 한국 내의 원자력 전문가들이 사고 원전에 대한 정보를 거의 갖고 있지 않아서 국민과 언론매체가 필요로 하는 설명을 시의적절하게 제공하지 못한 것도 한 원인이 되었다고 볼 수 있다. 그렇지만, 원전 설계 특성과 사고 상황에 대해 이해하면서 신뢰할만한 설명들이 제공된 이후에도 일부 미디어가 확인되지 않은 사실에 근거한 충격적인 예측을 중심으로 한 보도를 계속한 것도 사실이다. 특히 방사성비(Radioactive Rain)에 대한 우려로 일부 지역에서 휴교조치까지 시행한 것은 공공기관조차도 과학적 합리성을 쉽게 무시될 수 있음을 보여준 심각한 사건이었다. 한국 원자력계가 사전에 대표적인 일본 원전들의 사고 진행과 외부 영향을 평가할 수 체제를 사전에 갖추어 중요한 사건이 발생하기 전에 충분한 설명을 제공할 수 있었다면, 국민의 동요도 줄이고 정부도 더욱 체계적으로 대응할 수 있었을 것이다.

초기 편서풍과 북태평양 해수순환 특성에 따라 후쿠시마 사고로 인해 대기 및 해양으로 유출된 방사성물질에 의해 한국이 직접적인 피해를 입지는 않았지만, 중국의 원전에서 사고가 발생할 경우에는 사고 크기에 따라 직접적인 방사성물질에 의한 영향권에 속할 여지가 있다. 특히, 큰 잎을 가진 열채류, 사료, 그리고 지표수는 공기 중에서 하강한 방사성

낙진에 쉽게 오염될 수 있기 때문에 일반적으로 신선 식품(우유,엽채류,과일)이나 물이 원전 사고 후 초기단계에서 쉽게 방사성물질에 오염될 수 있고, 해수로 방사성 오염수가 유입될 경우에는 해산물도 방사성물질에 오염될 수 있다. 사전에 충분한 준비와 국민 이해가 이루어지지 않은 상태라면, 낮은 수준의 방사성 오염이라도 국민의 공포와 사회적 혼란을 피할 수 없을 것이다.

따라서 자국 원전은 물론이고 인접국 원전에서 발생 가능한 사고의 진행과 영향을 평가할 수 있는 체계를 갖추는 것이 필수적이다. 그리고 사전 분석을 통해 다양한 대응책을 마련해두고 만일의 경우에 대비하는 것이 필요할 것이다.

마. 원자력 안전 기반 강화

1) 원자력 안전문화가 체질화되고 독립적으로 평가되어야 한다.

‘안전문화’는 체르노빌 사고 교훈을 분석하는 과정에서 사용하기 시작하여 이제는 누구나 즐겨 사용하는 구호가 되었다. 그러나 안전문화가 조직과 종사자들에게 체질화되어 있는지 겉모습만 갖추고 있는지를 정량적으로 평가하기는 어렵기 때문에, 외부에서 안전문화를 평가하고 강제로 정착시킨다는 것은 거의 불가능하다. 그 동안 동경전력에서 안전문화가 미흡했다는 것은 과거의 여러 사례에서 쉽게 확인할 수 있었음에도, 이를 근본적으로 개선시키려는 노력을 동경전력도, 규제기관도 하지 않았다고 보아야 한다. 후쿠시마 사고는 안전에 소홀하면 거대한 회사도 순식간에 망할 수 있다는 사실을 보여주었는데, 이는 너무나 뼈아픈 교훈이다.

후쿠시마 사고 이후 중요한 위험 요소를 의도적으로 무시하는 경영자나 관리자 또는 작업자는 없을 것이다. 그렇지만 전기 생산원가 등 원전 이용의 경제성·효율성과 관련한 지표들도 여전히 중요한 자리를 유지할 것이므로, 이들이 안전성에 앞서는 고려사항이 될 가능성이 늘 존재한다. 따라서 원자력 안전에 중요한 조직의 안전문화는 독립적인 조직에 의해 평가되고 감시되는 것이 바람직하다. 원자력 산업체는 규제기관이, 규제기관이나 연구기관은 독립적인 위원회가 평가를 주관할 수 있을 것이다. 안전문화는 조직의 경영 목표 및 방침, 안전 문화를 정착시킬 수 있는 제도와 절차, 하부 조직 및 개인의 업무 수행 방식 등 다양한 관점에서 측정될 수 있는데, 각 기관의 안전문화 평가 및 개선을 위해 필요한 사항들이 여러 기관에 의해 개발되어 왔다⁴⁵⁾.

45) IAEA-TECDOC-1329(2002), Safety Culture in Nuclear Installations; IAEA-INSAG-15(2002), Key Practical Issues in Strengthening Nuclear Safety Culture; INPO(2004), Principles for a Strong Nuclear Safety Culture

2) 원자력 안전 연구가 강화되고 성과가 공유되어야 한다.

가동 중인 원전의 안전성 확인과 향상 및 안전한 운영, 만일의 사고에 대비한 대응능력의 확보, 안전성을 더욱 향상시키는 신형 원전의 개발 등에 있어서 안전 연구의 중요성은 새삼 강조할 필요가 없다. 안전 연구는 새로운 지식을 창출할 뿐만 아니라, 안전성 평가 및 검증에 사용될 수 있는 해석도구 및 실험시설 등 인프라를 확충시키고, 안전기술을 개발하고 현안 발생 시 대응할 수 있는 고급 전문가를 양성하는데 매우 효과적이다. 안전 연구가 최상의 성과를 얻기 위해서는 가급적이면 최상의 시설과 최상의 인력에 의해 수행되고, 결과의 신뢰성에 대한 엄정한 평가가 이루어져야 한다.

전통적으로 원자력 안전 연구에 있어서는 국제적으로도 경쟁보다는 협력이 우선되어 왔다. 예를 들어 OECD/NEA에서는 다양한 국제공동연구를 주관하고 있는데, 원자력 산업 측면에서는 경쟁 관계에 있는 국가들 간에도 협력이 매우 활발하다. 또한 규제기관, 연구기관, 산업체 간에도 협력하면서 비용을 분담하고 성과를 공유하고 있다. 앞으로도 안전 연구에 있어서의 협력과 소통 및 정보 공유가 더욱 강화될 필요가 있다.

3) 방사선에 대한 이해를 증진시키기 위한 노력이 강화되어야 한다.

원자력 사고에 대한 공포는 방사선에서 비롯된다. 특히 낮은 선량의 방사선 영향에 대해 어떻게 생각하느냐에 따라 원자력 사고에 대처하는 자세가 크게 달라진다. 방사선에 대한 정확한 이해가 이루어지지 않으면 미량의 방사선량에도 지나친 공포감을 갖게 되거나, 그 반대로 방사선 피폭에 대한 합리적인 우려조차도 무시할 가능성이 높다. 방사선과 관련해서는 후자의 경우는 매우 드물기 때문에 비합리적인 지나친 공포가 문제가 되는 경우가 많다.

원자력 시설에서 사고가 진행되는 과정에서는 사고 자체의 진행과정을 정확하게 예측하여 국민과 매스컴에 전달하는 데는 어려움이 많다. 그렇지만 각 지역의 방사선량률을 신속하게 측정하여 제공하는 것은 상대적으로 용이한 일이다. 그런데 측정된 선량률에 대한 위험 인식 수준은 방사선에 대해 얼마나 알고 있느냐에 따라 큰 영향을 받는다. 따라서 사고 이전부터 방사선의 본질, 자연 방사선, 의료 방사선, 기타 생활 방사선, 방사선 피폭 영향 등에 대해 신뢰성 있고 이해하기 쉬운 정보를 생산하여 제공할 필요가 있다. 그리고 방사선의 단위를 비전문가가 이해하는 것은 거의 불가능하므로, 자연방사선량률을 비교척도로 사용한다면 하는 새로운 척도의 개발도 필요한 것으로 보인다.

아울러 국민이 가장 관심을 갖는 낮은 선량의 방사선 피폭 영향에 대해 더욱 확실한 과학적 지식을 확보하기 위한 연구도 지속되어야 한다.

6. 결론 및 제안

6.1 결 론

후쿠시마 사고는 동일본 대지진과 쓰나미라는 초대형 복합 자연 재해로부터 비롯된 대형 원전 사고이다. 오나가와 원전, 후쿠시마 제1원전, 후쿠시마 제2원전, 토카이 제2원전 등 4개 부지의 원전(총 14기)이 동일본 대지진의 직접적인 영향을 받았으며, 그 중에서 후쿠시마 제1원전은 파고가 약 15 m에 이르는 쓰나미를 견뎌내지 못하고 노심(핵연료) 용융, 원자로건물에서 수소가스 폭발, 방사성물질 대량 방출이라는 중대사고를 초래하였다.

후쿠시마 제1원전은 6개 호기로 이루어져 있는데, 동일본 대지진 발생 당시 1,2,3호기는 정상 출력 운전 중이었고, 4,5,6기는 핵연료 교환과 정기 점검을 위해 운전이 정지된 상태였다. 지진이 발생하자 운전 중이던 3기는 모두 자동으로 정지되어 핵분열을 중단하였고, 지진으로 파괴된 외부 전력망 대신 발전소 내의 비상 디젤발전기들이 바로 가동하여 노심의 붕괴열 제거 등에 필요한 교류전기를 공급함으로써 안전한 상태를 유지하였다. 그러나 지진 발생 약 40~50분 후에 들이닥친 초대형 쓰나미가 후쿠시마 제1원전 1~4호기의 모든 비상용 디젤발전기들과 대부분의 직류전원 시스템 및 최종 열제거원을 비롯한 다수의 냉각 관련 기기들을 무력화시켰다. 그 결과 피동 냉각계통이 거의 기능을 하지 못한 1호기에서는 수 시간 안에 노심의 용융이 시작되었고, 일부 피동 냉각장치가 기능을 수행한 2,3호기는 1~2일 동안 최소한의 냉각이 가능했으나, 궁극적으로 핵연료 용융을 피할 수는 없었다. 이후 원자로 및 사용후연료 저장조 안에 있는 핵연료의 냉각 기능은 해수 주입, 담수 주입, 재순환 공급이 순차적으로 이루어지면서 안정적으로 확보되었으나, 그 과정에서 많은 양의 방사성물질이 유출되었다.

후쿠시마 사고를 보는 관점은 여러 가지가 있을 수 있지만, 본 위원회는 핵심적인 특징을 다음 3가지로 요약하고자 한다.

- 극한 복합 자연재해로 인한 최초의 원전 중대사고: 1979년의 미국 쓰리마일아일랜드(TMI) 사고와 1986년 옛 소련의 체르노빌 사고는 설비 자체의 문제와 인적 인자가 결합하여 발생했던 반면, 후쿠시마 사고는 외부 사건(극한 자연재해)과 설비 내부 문제 및 인적 인자가 모두 결합한 사고라고 할 수 있다. 초대형 자연 재해, 즉 쓰나미로 인해 애초 미흡했던 다수의 안전 설비와 사고 관리 대책이 무력화되면서 초대형 사고로 진행된 것이다.

- 다수 호기에서 중대사고가 함께 발생하여 장기간 지속: 같은 부지에 있는 3개 호기의 원자로에서 핵연료가 대량으로 녹아내리고 원자로용기와 격납용기도 손상된 것으로 추정되며, 세 군데의 원자로건물에서는 수소가스 폭발이 발생하여 원자로 건물을 크게 손상시켰다. 또한, 사고 진행이 단기간에 종료되지 않고 수 개월간 지속되었으며, 손상된 원자로건물 외부

분에 위치한 사용후연료저장조의 안전 문제도 가시화되었다.

- 대량의 방사성물질 외부 방출로 광범위한 대기·토양·해양 오염: 후쿠시마 사고로 부터 방출된 방사성물질의 총량은 요드와 세슘 방출량을 기준으로 평가할 때 체르노빌 사고의 20% 수준일 것으로 추정된다. 다행히, 비상 대피가 비교적 신속하게 이루어져서 직접적인 방사선 피폭으로 인한 사망자는 발생하지 않았으나, 주변 지역의 토양 및 해양이 심각하게 오염되었고, 많은 수의 이재민과 국가·사회적 위기를 유발하였다.

후쿠시마 사고의 근본적인 원인으로 1960년대에 미국에서 설계된 원전을 일본에 도입하면서 지진과 쓰나미 등 일본 고유의 부지 특성을 충분하게 고려하지 못한 점을 들 수 있다. 지진에 대해서는 비교적 적극적인 설계기준 재평가와 이에 따른 설비 보강이 이루어졌지만, 쓰나미에 대한 설계 개선은 상대적으로 크게 미흡하였다. 또한, 원전에서 나타날 수 있는 중대 사고에 대한 인식이 부족하여 관련된 설비, 절차서, 교육훈련 등이 충실하지 못하였다. 이로 인해 다수 호기에서 동시에 발생한 사고를 수습하는 과정에서 커다란 혼란이 있었고, 사고 대응 과정에서 원전 상태에 대한 이해와 대내외 소통이 크게 부족하였다.

사고의 원인과 교훈은 5장에서 상세하게 논의한 바 있다. 사고가 발생한 후의 후쿠시마 제1원전은 여러모로 최악의 환경이었지만, 현장의 작업자들은 주어진 환경에서 사태의 제어를 위해 헌신적인 노력을 기울였고, 그 결과 악화일로로 걸던 사고 상황을 수 일 내에 전환시킬 수 있었던 것으로 평가된다. 따라서 후쿠시마 사고의 가장 핵심적인 교훈은 쓰나미 이후 대응과정의 문제보다는 적극적인 안전성 향상 조치 등 사전 대비가 크게 부족했던 것에서 찾아야 한다.

6.2 국내 원전의 안전성 향상을 위한 제안

우리나라는 후쿠시마 사고 이후 원자력 시설의 안전성 강화를 위하여 다양하고 실질적인 조치들을 신속하게 취해왔다. 그러나 이러한 초기 조치들만으로 원자력 발전의 안전이 충분히 확보되고 국민의 강력한 지지를 받을 것으로 기대하기는 어렵다. 특히 후쿠시마 사고의 교훈을 앞으로도 지속적으로 분석하여 반영해야 하며, 형식적이 아닌 안전성에 실질적으로 기여할 수 있는 조치들이 취해져야 한다. 현 시점에서 국내 원전의 안전성 향상을 위해 필요한 몇 가지 방안을 다음과 같이 제안하고자 한다.

첫째, 후쿠시마 사고 후 발표된 안전성 개선대책을 포함하여 가동원전의 안전성 향상을 적극적으로 추진해야 한다. 정부는 2011년 5월 가동 중 원자력시설에 대한 종합적인 안전 점검을 신속하게 실시하여 안전성을 확인하고, 자연재해 및 중대사고에 대한 안전 여유도를 더욱 높이기 위한 ‘가동원전 안전성 개선대책’을 발표한 바 있다. 이 대책은 후쿠시마 사고 이후 정부와 원자력산업계가 국민 앞에 내놓은 구체적인 약속이며, 이후 국제적으로 발표된 사고

교훈이나 후속 대책들을 통해서도 타당성이 확인되고 있다. 정부와 산업계는 수립된 개선 대책을 충실하게 이행하면서, 진행 상황을 국민에게 주기적으로 알려야 한다. 이행단계에서는 안전성에 미치는 효과에 대한 상세한 분석이 병행되어야 하며, 더 효과적인 방안이 있을 경우 적극적으로 반영하는 것이 바람직하다. 또한 후쿠시마 사고에 대한 이해가 증진되면서 추가로 도출되는 교훈을 포함하여 국내외 원전에서의 운전경험을 반영하면서 가동원전의 안전성을 지속적으로 향상시켜야 한다.

둘째, 2011년10월 새롭게 출범한 원자력안전위원회를 중심으로 안전규제의 독립성·전문성·효과성을 지속적으로 강화해야 한다. 원자력 안전규제 정책과 이행과정에 대한 국민의 신뢰는 무엇보다도 중요하다. 이를 위해서는 안전규제의 독립성과 실효성의 지속적인 제고가 필수적이며, 원자력안전위원회 사무처와 산하 전문기관이 적절한 규모와 세계 최고 수준의 전문성을 확보하여야 한다. 또한, 국내에서 개발된 상용 원전과 연구용 원자로를 외국으로 수출하는 국가로서, 안전규제기관이 국제적인 리더십을 구축하는 것은 매우 중요하다.

셋째, 국제기준과 조화를 이루면서도 독자성을 갖는 안전 철학·목표·원칙·기준을 발전시켜야 한다. 한국의 원자력 안전규제는 미국의 규제 철학과 기준을 기본으로 하면서 국제원자력기구 등의 요건을 반영하는 체계라 할 수 있다. 따라서 국민과 공감할 수 있는 고유한 안전 철학이나 목표가 명확하게 정립되어 있다고 말하기 어렵고, 선진국의 좋은 점만 선택하는 과정에서 일관성이나 효율성이 저해되기도 하였다. 세계 5위권의 원전 이용 국가일 뿐만 아니라 상용원전까지 수출하는 한국으로서는 독자적인 안전 철학·목표·원칙·기준 등을 종합적으로 재정립할 필요가 있다. 특히 미국과 유럽국가 간에 접근 방식의 차이가 큰 중대사고 대응과 관련하여 고유한 철학을 정립하는 것이 시급하며, 안전 목표에서 사회·경제적인 영향도 포함하고, 방사성물질의 대량 누출 가능성을 실질적으로 제거하는 방향이 바람직하다. 물론, 이 과정에서는 핵심 선진국 및 국제사회와의 협력과 조화가 필요할 것이다.

넷째, 원전 안전과 관련하여 운영기관인 한국수력원자력(주)이 더 주도적인 역할을 해야 한다. 원전 안전에 대한 가장 중요한 책임은 운영기관에 있다. 이러한 관점에서 한국수력원자력(주)이 최근 안전기술본부를 신설하고 중앙연구원을 확대 개편하는 등 안전 중심의 운영을 강화하는 것은 바람직하다. 한 번의 대형 사고가 모든 경제성 향상 노력을 물거품으로 만들 수 있으므로 안전성 향상에는 공격적인 자세가 필요하며, 원전 운영조직이 양적·질적으로 크게 보강되고 운전인력이 최상의 대우를 받아야 한다. 그리고 기관 전체를 아우르는 세계 최고 수준의 안전 전문가를 키우면서, 외부 전문가의 의견을 균형 있게 반영할 수 있는 체계도 구축될 필요가 있다.

다섯째, 후쿠시마 사고의 교훈과 최근의 연구 성과들을 반영하여 안전성을 더욱 향상시키는 신형 원전 개발 노력을 지속해야 한다. 지속 가능한 원자력 이용을 위해서는 안전성을 획기적으로 향상시키는 신형 원자로 개발이 필요하다. 특히, 피동 안전 계통의 확대 적용을 통

한 중대사고 가능성의 극소화, 중대사고를 고려한 계측계통 및 중대사고 완화 설비(수소가스 폭발 예방, 용융된 핵연료 냉각 등) 보강, 지진의 영향을 크게 줄여주는 면진 설비의 도입 등을 적극 고려할 필요가 있다. 또한, 원전의 안전 문제와 보안(Security) 또는 물리적 방호(Physical Protection) 문제를 효과적으로 연계하는 것이 바람직하다.

여섯째, 원자력 안전 연구를 강화하고 최상의 지식에 기반한 의사결정이 이루어져야 한다. 안전 연구는 새로운 안전 지식과 인프라 및 전문가를 확보할 수 있는 최상의 수단이므로 더욱 강화되어야 한다. 안전 연구의 결과가 규제와 산업에 효과적으로 활용되어 지식에 기반을 둔 의사 결정이 이루어져야 실질적인 안전성 확보가 가능하다. 이를 위해서는 사업과 규제의 독립성 문제와는 별개로 안전 연구 및 결과의 활용에 있어서는 연구기관, 규제기관, 산업체, 학계 간의 효과적인 협력과 소통이 필수적이다. 또한, 안전 연구의 효율적인 추진과 연구 성과의 체계적인 활용을 위해 국가 차원의 종합관리방안이 모색될 필요가 있다.

일곱째, 원자력 안전 문화가 모든 기관과 종사자에게 확고하게 자리 잡아야 한다. 안전문화는 심층방어 전략과 함께 원자력 안전의 가장 중요한 요소이다. 안전은 말이나 구호로 이루어지는 것이 아니라 구체적인 실천을 통해서만 달성될 수 있는데, 안전을 최우선으로 하는 조직 문화와 개인의 태도가 결집하지 않고서는 불가능한 일이다. 원자력과 관련한 모든 기관, 조직, 개인에 있어서 철저한 안전 문화가 정착될 수 있도록 더욱 노력해야 하고, 안전문화의 독립적인 측정 등 실질적인 확산 방안이 마련될 필요가 있다. 특히, 최근의 고리 전원상실사고 은폐 등으로 국내 원자력계 일각의 취약한 안전문화가 드러났음을 감안하면, 각 기관의 최고 경영층이 확고한 의지와 관심을 갖고 안전문화를 앞장서서 이끌어야 한다.

여덟째, 원전 개발 및 운영에 있어서 리스크 정보의 활용이 확대되어야 한다. 원자력 안전의 향상은 곧 리스크의 감소이며, 이는 사고의 가능성을 최소화하고, 사고가 발생하더라도 피해를 최소화하는 것을 의미한다. 새로운 원전 개발에서는 리스크 정보를 활용하여 설계를 최적화해야 하며, 운영 과정에서도 설계 특성, 기기 고장, 인적 실수 및 외부 요인을 종합적으로 고려하여 평가되는 리스크 정보가 최대한 활용되는 것이 바람직하다. 미국의 정비규정(Maintenance Rule)과 유사한 제도의 도입을 검토하고, 계획예방정비 기간의 부담을 줄이기 위하여 출력운전 중 검사의 확대를 고려할 필요가 있다. 이를 위해서는 리스크 평가에 사용되는 데이터의 신뢰성을 더욱 향상시켜야 한다.

마지막으로, 국제 협력을 더욱 강화하고 실효성을 높여야 한다. 원자력 안전 분야의 국제 협력은 IAEA나 OECD/NEA 등 국제기구를 통한 협력과 국가 간 또는 기관 간 협력이 있다. 국제협력은 안전 정보에 대한 소통이나 안전 현안 및 새로운 기술에 대한 공동 연구 등을 효과적으로 추진할 수 있는 효과적인 방법이다. 특히, 후쿠시마 사고와 관련하여 다양한 국제기구들을 통해 진행되는 협력 활동에 주도적으로 참여할 필요가 있다.

7. 참고 문헌

- [1] ANS(2012), Fukushima Daiichi: ANS Committee Report, The ANS Special Committee on Fukushima, 2012.3.
- [2] Carnegie(2012), Why Fukushima Was Preventable, Prepared by J.M. Acton & M. Hibbs, Carnegie Endowment for International Peace, 2012.3.
- [3] CNSC(2011), CNSC Fukushima Task Force Report, Canadian Nuclear Safety Commission, 2011.10.
- [4] GE(2006), ABWR Plant General Description, General Electric, 2006.12.
- [5] Greenpeace(2012), Lessons from Fukushima, Greenpeace International, 2012.2.
- [6] Hofmann K.(1999), Current Knowledge on Core Degradation Phenomena, A Review, Journal of Nuclear Materials, Vol. 270, pp. 194-211, 1999.4.
- [7] IAEA(2006), Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1.
- [8] ICANPS(2011), Interim Report, Investigation Committee on the Accident at Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company, 2011.12.26.
- [9] ICANPS(2012), Final Report, Investigation Committee on the Accident at Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company, 2012.7.23.
- [10] INPO(2011), Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005, Institute of Nuclear Power Operations, 2011.11.
- [11] INPO(2012), Lessons Learned from the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Addendum to INPO 11-005, Institute of Nuclear Power Operations, 2012.8.
- [12] IRSN(2012), Fukushima, One Year Later - Initial Analysis of the Accident and Its Consequences, IRSN/DG/2012-003, French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, 2012.3.
- [13] JAIF(2011), Information Update on Fukushima Nuclear Power Station, Website of the Japan Atomic Industrial Forum, <http://www.jaif.or.jp/english/index.php>
- [14] JANTI(2011), Review of Accident at Tokyo Electric Power Company Incorporated's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Proposed Countermeasures, Fukushima Daiichi NPS Accident Investigation & Review Committee, 2011.10.

- [15] KAERI(2011), 후쿠시마 원전 사고 중간 분석, 한국원자력연구원 후쿠시마원전사고분석반, 2011.3.27.
- [16] KAIST(2011), 일본 후쿠시마 원전 사고: 경과와 영향 그리고 교훈, KAIST 원자력및양자공학과, 2011.4.18.
- [17] KINS(2011), 후쿠시마 사고 사례를 통한 비상피폭선량 분석 및 방호기준 검토, 한국원자력안전기술원 보고서 KINS/ER-210, 2011.12..
- [18] KINS(2012), 후쿠시마 사고 이후 1년 - 후쿠시마 원전사고 1주년 방사선영향 평가보고서, 한국원자력안전기술원 보고서 KINS/ER-219, 2012.2.
- [19] Masui, H.(2011), Fukushima Daiichi Accident - Recovery Action, Organization, Environmental Impact, ICAPP 2011, NICE, France, 2011.5.
- [20] MEXT(2011a), Results of Airborne Monitoring by the Ministry Education, Culture, Sports, Science and Technology and the U.S. Department of Energy, 2011.5.6.
- [21] MEXT(2011b), Results of Airborne Monitoring by the Ministry Education, Culture, Sports, Science and Technology and the U.S. Department of Energy, 2011.6.16.
- [22] MEXT 웹사이트, Monitoring Information of Environmental Radioactivity Level, <http://radioactivity.mext.go.jp/en/>
- [23] MIT(2011), Technical Lessons Learned from the Fukushima-Daiichi Accident and Possible Corrective Actions for the Nuclear Industry: An Initial Evaluation, 2011.5.
- [24] Mori et al. (2005), Simulation of the Chilean and Nihon-kai Earthquakes Caused Tsunamis at NPP Sites in Japan, International Workshop on External Flooding Hazards at Nuclear Power Plant Sites, Organized by IAEA, Aug. 29 - Sept. 2, 2005, Kalpakkam, India.
- [25] Moriya K., Sato K.(2011), Fukushima Daiichi NPP Accident - Plant Design and Preliminary Observations, ICAPP 2011, NICE, France, 2011.5.
- [26] NAIIC(2012), The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, The National Diet of Japan, 2012.6.
- [27] NERHQ(2011a), Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations -, Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan, 2011.6.
- [28] NERHQ(2011b), Additional Report of the Japanese Government to the IAEA - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, Nuclear Emergency

- Response Headquarters, Government of Japan, 2011.9.
- [29] NISA/JNES(2011), The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the seismic damage to the NPPs, 2011.4.4.
 - [30] Omoto A.(2011), Fukushima Accident - An Overview, ICAPP 2011, NICE, France, 2011.5.
 - [31] RJIF(2012), Fukushima Report by the Independent Investigation Commission on the Fukushima Daiichi Nuclear Accident, Rebuild Japan Initiative Foundation, 2012.7.
 - [32] Ten Hoeve, J.E. & Jacobson, M.J. (2012), "Worldwide health effects of the Fukushima Daiichi nuclear accident", Energy & Environmental Science (DOI: 10.1039/c2ee22019a)
 - [33] TEPCO 웹사이트, <http://www.tepco.co.jp/>
 - [34] TEPCO(2011a), Roadmap towards Settlement of the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, 2011.4.17
 - [35] TEPCO(2011b), Fukushima Nuclear Accident Analysis Report (Interim Report), 2011.12.2.
 - [36] TEPCO(2011c), "Roadmap towards Settlement of the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, TEPCO" Step 2 Completion Report, 2011.12.16.
 - [37] TEPCO(2011d), Mid- and Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, TEPCO, 2011.12.21.
 - [38] TEPCO(2012a), Fukushima Nuclear Accident Analysis Report, TEPCO, 2012.6.
 - [39] TEPCO(2012b), The Great East Japan Earthquake and Current Status of Nuclear Power Stations, TEPCO Website (<http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/>), 2012.10.12.
 - [40] USNRC(XXXX), Boiling Water Reactor GE BWR/4 Technology Advanced Manual, Chapter 6, BWR Differences, Rev. 1195, U.S. NRC Technical Training Center.
 - [41] USNRC(1990), Severe Accident Risks: An Assessment of Five U.S. Nuclear Power Plants", NUREG-1150, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1990.12.
 - [42] USNRC(2011), Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21st Century, Near-Term Task Force, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2011.7.
 - [43] WHO(2013), Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, World Health Organization, 2012.3.

(부록 A) 사용된 약어

AC	Alternating Current (교류)
ADS	Automatic Depressurization System (자동감압계통)
AMG	Accident Management Guide (사고관리지침)
AOV	Air-operated Valve (공기구동밸브)
BWR	Boiling Water Reactor (비등경수로)
CS	Core Spray [System] (노심살수계통)
CST	Condensate Storage Tank (응축수저장탱크)
DBA	Design Basis Accident (원자력발전소 설계기준사고)
DC	Direct Current (직류)
DID	Defense in Depth (심층방어, 원자력발전소 설계개념의 하나)
DW, D/W	Dry-well (드라이웰; BWR 격납용기에서 원자로가 위치한 건조한 영역)
ECC	Emergency Control Center (비상지휘센터; 원전 운영자가 설치)
ECCS	Emergency Core Cooling System (비상노심냉각계통)
EDG	Emergency Diesel Generator (비상디젤발전기; 비상용디젤발전기)
EDMG	Extensive Damage Mitigation Guideline (극한재해완화지침서)
EOP	Emergency Operating Procedure (비상운전절차서)
ERC	Emergency Response Center (비상대응센터)
ERSS	Emergency Response Support System (비상대응지원시스템; 일본)
GE	General Electric (제너럴일렉트릭사; 미국의 BWR 공급회사)
HPCI	High Pressure Coolant/Core Injection [System] (고압냉각수주입계통); High Pressure Core Injection [System] (고압노심주입계통)
IAEA	International Atomic Energy Agency (국제원자력기구)
IC	Isolation Condenser (격리응축기; 비상용복수기)
ICRP	International Commission on Radiological Protection (국제방사선방호위원회)
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale (국제원자력사고·고장등급)
JAEA	Japan Atomic Energy Agency (일본원자력연구개발기구; JNC와 JAERI가 통합한 연구개발기관)
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institute ((구)일본원자력연구소)
JAIF	Japan Atomic Industrial Forum (일본원자력산업협회)
JMA	Japan Meteorological Agency (일본기상청)
JNC	Japan Nuclear Fuel Cycle Development Institute ((구)일본원전연료주기개발그룹)
JNES	Japan Nuclear Energy Safety Organization (원자력안전기반기구)
INPO	Institute of Nuclear Power Operations (원자력발전운전협회)

JST	Japan Standard Time (일본표준시간)
LADAS	Long-range Accident Dose Assessment System (한국원자력연구원에서 자체 개발한 대기확산모델)
LOCA	Loss of Coolant Accident (냉각재상실사고)
LPCI	Low Pressure Coolant/Cpre Injection [System] (저압냉각수주입계통)
MAAP	Modular Accident Analysis Programme (미국 FAI사에서 개발한 EPRI 중대사고 종합해석코드, 산업체용)
MCC	Motor Control Center (모터제어센터)
MCR	Main Control Room (발전소 주제어실)
MELCOR	Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases (미국 SNL에서 개발한 US NRC 중대사고 종합해석코드, 규제기관용)
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (경제산업성; 일본)
MEXT	Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (문부과학성; 일본)
MOV	Motor-driven Valve (모터구동밸브)
MSIV	Main Steam Isolation Valve (주증기격리밸브)
MUWC	Make-up Water Condensate (복수보충수)
NERHQ	Nuclear Emergency Response Headquarters (원자력재해대책본부; 일본)
NISA	Nuclear and Industrial Safety Agency (일본 원자력안전·보안원)
NCFC	Normal Close, Fail Close (해당 밸브가 정상 운전 중에 닫혀 있고, 전기 공급이 상실되는 경우에도 닫힌 상태를 유지하는 경우)
NOFO	Normal Open, Fail Open (밸브가 정상 운전 중에 열려 있고, 전기 공급이 상실되는 경우에도 열린 상태를 유지하는 경우)
NPS	Nuclear Power Station (원자력발전소)
NSC	Nuclear Safety Commission (원자력안전위원회; 일본)
OECD/NEA	OECD Nuclear Energy Agency (OECD 원자력기구)
OFC	Off-Site Center (현장 비상대응센터, 오프사이트센터)
PCV	Primary Containment Vessel (격납용기; 일차 격납용기)
PSA	Probabilistic Safety Assessment (확률론적 안전성 평가)
PWR	Pressurized Water Reactor (가압경수로)
RB, R/B	Reactor Building (원자로건물)
RCIC	Reactor Core Isolation Cooling [System] (노심격리냉각계통)
RHR	Residual Heat Removal [System] (잔열제거계통)
RPS	Reactor Protection System (원자로보호계통)
RPV	Reactor Pressure Vessel (원자로용기)
SAMG	Severe Accident Management Guidelines (중대사고관리지침서)
SBO	Station Blackout (완전전원상실)
SC, S/C	Suppression Chamber (압력억제실; 압력억제수조)

SFP	Spent Fuel Pool (사용후연료저장조)
SGTS	Standby gas treatment system (대비기체처리계통)
SLCS	Standby Liquid Control System (대기액체제어계통)
SPEEDI	System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (방사능 비상대응 시스템; 일본)
SRV	Safety Relief Valve (안전방출밸브)
TAF	Top of Active Fuel (유효핵연료 상단)
TB, T/B	Turbine Building (터빈건물)
TEPCO	Tokyo Electric Power Co. (동경전력(주))
TMI	Three Mile Island (드리마일아일랜드; 미국 TMI사고 진원지)
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (유엔방사선영향과학위원회)
USNRC	U.S. Nuclear Regulatory Commission (미국 원자력규제위원회)
WW, W/W	Wet-well (BWR에서 억제풀(냉각장치)가 위치한 DW 하부영역)
WHO	World Health Organization (세계보건기구)

(부록 B) 후쿠시마 사고 진행 상세시각표(Timeline)

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
2011. 3.11(금)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 14:46 지진발생(규모 9.0)에 의해 소외 송전망 상실, 기타 RSC 계통의 손상은 없는 것으로 알려져 있으나 확인되지 않았음. 소외전원 상실후 비상디젤발전기 기동 후 발전소 냉각 운전 수행 ◦ 15:06 비상재난대응본부(mergency Disaster Countermeasure Headquarter) 구성 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 14:46 지진발생(규모 9.0)에 의한 자동 운전 정지. ◦ 14:46 원자로 정지/소외전원상실/2대의 비상디젤발전기 자동기동 ◦ 14:47 MSIV 닫힘 ◦ 14:52 2대의 ICs 자동 기동 ◦ 15:03 IC 'B' 수동정지(RPV 냉각률: 55°C/h 이하 유지), RPV 압력 유지(IC 'A' 수동운전) - 이후 IC 'A' 수동운전 시간은 RPV 압력 변화 기록에 따라 가정된 것임 ◦ 15:05 S/C 냉각(CCS 'B' 이용) ◦ 15:11 S/C 냉각(CCS 'A' 이용) ◦ 15:17 IC 'A' 재기동 ◦ 15:19 IC 'A' 정지 ◦ 15:24 IC 'A' 재기동 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 14:46 지진발생 (규모 9.0)에 의한 자동 운전 정지 ◦ 14:47 원자로 정지/소외전원상실/2대의 비상디젤발전기 자동기동. MSIV 폐쇄(SRV를 이용 원자로 압력 조절) ◦ 14:50 RCIC 수동 기동 ◦ 14:51 Rx 고수위로 인한 RCIC 자동정지 ◦ 15:02 RCIC 수동기동 ◦ 15:04 RHR(A) 운전(S/P 냉각 모드) ◦ 15:07 Torus cooling 기동 ◦ 15:25 RHR(A) 운전 변경(S/P 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 14:46 지진발생(규모 9.0)에 의한 자동 운전 정지 ◦ 14:47 원자로 정지/소외전원상실/2대의 비상디젤발전기 자동기동 ◦ 14:51 운전원 복수기 진공 폐쇄 ◦ 15:05 RCIC 수동 기동 ◦ 15:25 RCIC 운전정지(Rx 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 14:46 정비중 (운전정지상태이며 모든 핵연료 SFP에 위치))

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 15:27 1차 해일 유입(7차례의 해일 유입) ◦ 15:35 2차 해일(14-15m) 유입, 취수구 이용불능(total loss of ultimate heat sink), 비상디젤 발전기를 포함한 소내 전원 계통(1-5호기)의 침수(15:41)로 대부분의 비상냉각시스템 기능이 불능, 일부 원전의 스팀-구동 펌프 시스템 기능은 단기간 유지 되었으나 장기냉각은 실패 ◦ 모든 AC/DC 전원상실로 인하여 원전 운전변수 정보 신뢰 할 수 없음 ◦ 15:42 TEPCO: 비상계획 돌입(Emergency plan due to the Loss of all AC power), 비상대응센터(Emergency Response Center) 설치 ◦ 16:36 노심 냉각 불능 판단, 비상 선포(16:45) 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 15:26 IC 'A' 정지 ◦ 15:27 1차 해일 발전소 도달 ◦ 15:32 IC 'A' 재기동 ◦ 15:34 IC 'A' 정지 ◦ 15:35 2차 해일 발전소 도달 ◦ 15:37 2차 해일로 인한 해수냉각펌프/전원공급 panel 침수/비상디젤발전기 정지(Total loss of heat sink & loss of AC/DC power) - S/C cooling stopped(CCS 'A' & 'B') ◦ 16:36 노심냉각 불능 판단, 비상 선포(16:45) - RPV 수위 확인을 위해 임시 축전지 및 배선 수집 	<ul style="list-style-type: none"> 냉각에서 S/C 살수 운전) ◦ 15:27 1차 해일 유입 ◦ 15:28 Rx 고수위로 인한 RCIC 자동정지 ◦ 15:35 2차 해일 유입 ◦ 15:39 RCIC 수동기동 ◦ 15:41 EDG & 전 교류 전원해수냉각펌프, 전력공급 배전반, 비상 전력선 기능 점진적 상실. 모든 AC/DC 전원상실로 인하여 원전 운전변수 정보 신뢰 할 수 없음, 전원공급차량 동원실패(진입도로 파괴됨) ◦ 16:36 노심냉각 불능 판단, 비상 선포(16:45) - RPV 수위 확인을 위해 임시 축전지 및 배선 수집 	<ul style="list-style-type: none"> high level) ◦ 15:38 해수냉각펌프/전원공급 panel 침수/비상디젤발전기 정지(Total loss of heat sink, 전력공급 배전반 & Station blackout) ◦ 16:03 RCIC 수동기동/HPCI 기동 준비 ◦ 16:36 비상 선포 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 15:38 해수냉각펌프/전원공급 panel 침수/비상디젤발전기 정지(쓰나미) Total loss of heat sink, 전력공급 배전반 & Station blackout으로 SFP 냉각 상실(모든 복구 조치 3호기에 집중)

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<p>◦ 19:03 간 나오토 총리 원전 비상사태 선언</p>	<p>후 1,2호기 MCR으로 운반</p> <ul style="list-style-type: none"> - ERC 사고관리 절차 시작/vent 위한 절차 착수 ◦ 16:45 운전원 원자로 수위 확인 불가 및 정부 기관 통보(16:55) ◦ 17:12 부지 소장(Site superintendent) 대체 냉각수 주입 준비(FP, Fire engine) 지시 - 운전원 AMG 상의 대체 냉각수 주입원 검토(FP - CSS - RPV, 2호기와 동일한 내용) ◦ 17:30 DDFP 운전(PCV 고압으로 주입 안 됨, 100psi 이하에서 주입 가능) ◦ 18:18 DC 부분 복구, IC MO-3A & 2A 계기 작동(Close 상태), 다시 개방(IC in-service 시킴) ◦ 18:25 MO-3A Close (IC out-of-service) ◦ 20:07 운전원 현장계기로 원자로 압력 점검(6.9 MPa) ◦ 20:49 소형 이동식 발전기 이용 원전 1, 2호기 일부 조명 복구 ◦ 20:50 RPV 냉각수 	<p>후 1,2호기 MCR으로 운반</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 17:12 소방 설비/소방차를 이용한 냉각수 주입 방법 검토, AMG 절차를 통한 확인 후 주입 경로 확보 (FP - CSS - RPV) ◦ 20:49 소형 이동식 발전기 이용 원전 1, 2호기 일부 조명 복구 		

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 20:50 대피령 하달, 반경 2km이내 소개 ◦ 21:23 대피령 하달, 반경 3km이내 소개, 10km 이내 옥내 대피 ◦ 23:00 원자로건물 북쪽문 방사선(1,200 μSv/hr), 남쪽문 방사선(5200 μSv/hr) 지시, 23:40 정부 보고 	<ul style="list-style-type: none"> 주입(DDFP) -RPV 고압으로 주입 안 된 것으로 판단 ◦ 21:19 주제어실 임시 전원 복구하여 원자로수위계기 복구(TAF+200mm 지시, 확신할 수 없는 것으로 판단), ◦ 21:30 IC 'A' 3A밸브 개방 증기생성 확인. -16 May 2011:7. 운전원 기록에 있으나, 정전사고 이후 기능상실된 것으로 판단 ◦ 21:51 고방사선으로 인한 원자로 출입 제한 ◦ 22:00 원자로 수위 지시(TAF+550mm) ◦ 23:50 임시 발전기 연결(MCR 조명, D/W 압력 계측-87 psi 지시) - 11일 밤 및 12 일 새벽 발전차 부지에 도착 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 21:50 계기용 전원 복구 후 원자로 수위 확인 (TAF+3400 mm) ◦ 22:00 원자로수위(TAF +2,300mm) 안정적으로 판단(RCIC 운전 성공 추정)/PCV 압력 6MPa gage. ◦ 23:25 원자로 압력 6.3 MPa, 격납용기 압력 0.14 MPa 파악 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 21:58 소형 이동식 발전기 이용 원전 3, 4호기 일부 조명 복구 	
3.12(토)	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 00:30 일본 정부 대피령 하달, 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 00:06 부지 소장 PCV 배기(vent) 지시(D/W 압력 87psi(0.6 MPa) 이상 지시) - MCR 운전원 방법 논의 			

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	반경 3km이내 소개 ◦ 01:45 일본 정부 반경 3km이내 소개 재확인	◦ 00:49 TEPCO D/W 압력 87 psi 이상으로 추정 ◦ 01:25 운전원 DDFP 정지 확인 ◦ 01:30 TEPCO PCV 배기 필요성 정부 보고(03:30 정부 배기 허가) ◦ 01:48 DDFP 정지/연료유 및 축전지 교체했으나 운전불능(소방차를 이용한 주입 운전 고려) - 소방 배관 손상 및 누수로 소방차 냉각수 이용 불능, 누수 방지를 위하여 격리 - 1대의 소방차만 운전 가능, 지진 및 해일로 인한 부유물 및 장애물을 제거하고 1호기에 도착 - 냉각수 주입을 위한 화재방호 line 및 자위대 소방차 고려 검토 ◦ 02:24 PCV 배기를 위한 준비(고 방사능으로 인한 운전원 작업시간 제한(17분) 및 호흡 장비 필요) ◦ 02:30 PCV 압력 122psia로 증가(02:47 정부 보고) ◦ 02:45 PCV 압력 116psi 로	◦ 01:30 TEPCO PCV 배기 필요성 정부 보고(03:30 정부 배기 허가) ◦ 02:00 RCIC 운전여부 확인 작업 수행, RCIC 펌프 배출 압력(고압) 확인 후 RCIC 기동 확인		

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 04:23 정문 앞 방사선량 증가 0.069 $\mu\text{Sv/hr}$(04:00)에서 0.59 $\mu\text{Sv/hr}$(04:23), 04:55 정부 보고 ◦ 04:30 ERC MCR 및 현장 운전원에게 지진 해일 경고 ◦ 04:50 부지 근처 방사선 1 $\mu\text{Sv/hr}$ 측정 	<p>감소</p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ 02:55 2호기 현장 운전원 보고(RCIC 운전중), 1호기 배기 작업 최우선 과제 ◦ 03:06 1호기 배기 공지를 위한 기자 회견 ◦ 03:45 운전원 원자로 건물 진입 시도(현장 검사 목적, 증기 목격 후 문 닫음) - MCR 운전원 CTMT 배기를 위한 준비(밸브 운전 절차, 밸브 위치 확인, 장비 등 준비) ◦ 04:00 RPV 담수 주입(소방수 펌프 이용, 1300리터) ◦ 04:01 PCV 배기에 따른 피폭 효과 정부에 보고 ◦ 04:19 PCV 압력(113 psi) 이상(unexpectedly) 감소 및 안정화 ◦ 04:30 여진 발생으로 복구 작업 중지 ◦ 04:50 현장운전원 탄소필터 부착 전면 마스크 및 방호복 착용 지시 ◦ 05:00 운전원 탄소필터 부착 전면 마스크 착용 및 방호복 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 02:55 RCIC 운전성공 확인 후 대체냉각원 준비. 복구 우선순위는 1호기 격납용기 배기로 전환 ◦ 04:20-05:00 RCIC 수원변경(CST로부터 S/C로) ◦ 05:00 운전원 탄소필터 부착 전면 마스크 착용 및 방호복 		

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 05:44 총리 주민 소개 지역을 10km확대 ◦ 07:11 총리 발전소 방문 ◦ 08:27 TEPCO Ookuma-machi 지역 대피 완료 안 됨을 확인 ◦ 09:03 TEPCO Ookuma-machi 지역 대피 완료 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 착용 지시. MCR 방사선량 증가로 2호기 쪽으로 이동 ◦ 05:14 D/W 압력 저하와 방사선량 증가로 D/W의 누설로 판단하고 정부 보고 ◦ 05:46 소방차를 이용한 냉각수 주입(core spray system) ◦ 05:52 264 gal 주입 ◦ 06:30 528 gal 주입 ◦ 06:50 1/2호기 배기 지시(METI) ◦ 07:55 1057 gal 주입(FP) ◦ 08:03 부지 소장 배기 지시(09:00 시도 시작) ◦ 08:15 793 gal 주입(FP) ◦ 08:27 Ookuma-machi 대피 미완료 확인 ◦ 08:30 1321 gal 주입(FP) ◦ 08:37 주민 대피후 Vent 결정 ◦ 09:03 주민 대피 확인 ◦ 09:04 1차 PCV vent 텀 투입(CTMT MOV 개방) ◦ 09:15 1585 gal 주입 ◦ 09:15분경 CTMT MOV 약 25% 개방 ◦ 09:24 S/C 배기 밸브 개방텀 투입(고 방사능으로 실패) 	<ul style="list-style-type: none"> 착용 지시. MCR 방사선량 증가로 2호기 쪽으로 이동 ◦ 06:50 1/2호기 배기 지시(METI) ◦ 08:04 배전반(Power Cabinet)으로 케이블 이동(수작업으로 진행) 		

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 10:58 2호기 압력을 낮추기 위해 증기를 외부로 배출하도록 승인 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 09:40 5548 gal 주입(FP) - MCR 운전원 Vent 포기, ERC Small AOV 개방 지시 ◦ 10:17 S/C vent AOV 3차례 개방 시도(MCR) - S/C Small Valve (AOV) 개방여부 확인 안 됨 ◦ 10:40 정문 및 주요 위치 방사능 준위 증가(1호기 S/C 배기 밸브 개방된 것으로 판단) ◦ 11:15 방사능 준위 감소(배기가 효과적이지 않음으로 판단) PCV 압력 약 109 psia ◦ 12:05 Reactor 수위 59inches below TAF ◦ 14:00 임시 공기압축기 설치 ◦ 14:30 운전원 large S/C 배기 밸브 개방(CTMT 압력 감소로 확인) ◦ 14:50 격납건물 압력 감소(84 psia 이하) ◦ 14:53 총 80,000 liters 담수 주입 ◦ 14:54 해수주입 지시(담수 고갈) 		<ul style="list-style-type: none"> ◦ 11:13 DDFP 자동기동 ◦ 11:36 RCIC trip 및 재기동 불가 ◦ 12:06 S/C spray 기동(DDFP이용). ◦ 12:35 HPCI 자동기동(low Rx level). 노심 수위 회복 시작. 16:35까지 원자로 수위가 TAF +400mm에서 TAF +4570mm까지 회복 	

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 15:30 반경 3km이내 소개 및 10km 이내 옥내 거주민 대피 시작 ◦ 15:36 1호기 원자로 건물 상부에서 수소 폭발 ◦ 18:25 주민 소개 범위를 20km 반경으로 확대 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 15:03 PCV 압력 증가(대용량 S/C 배기 밸브 닫힌 것으로 판단) ◦ 15:18 SLC 주입준비(15:36 발전차를 이용한 전력 복구 완료, 주입 준비) ◦ 15:36 원자로 건물 상부에서 수소 폭발 (5명의 부상, 임시 케이블 및 대형 후대용 발전기 손상, SLC 주입을 위한 전원 및 배관 파손) ◦ 16:27 방사선량 1015 $\mu\text{Sv/hr}$ 지시 ◦ 17:20 수소폭발후 피해 확인(소방차, 건물 및 기타 시설) ◦ 18:30 폭발로 인한 비산물 산재, SLCS를 위한 전원 및 배관 파손으로 이용불능 확인 ◦ 19:04 원자로에 해수주입 시작(소방차 이용) ◦ 20:45 주입 해수에 봉산수 첨가 ◦ 21:45 소방수 펌프(FP) 정지 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 15:30 임시케이블 이용 이동식 전원 연결. 15시 36분 원전 1호기 폭발로 인해 케이블과 전원공급차량 손실, 발전 중단 ◦ 17:30 부지 소장 격납용기 배기 준비 지시. RCIC 주입 계속됨. 격납용기 압력 200~300 kPa 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 17:00 원자로 압력 2.9 MPa 지시하며 감소 ◦ 17:30 부지 소장 격납용기 배기 준비 지시, HPCI 주입은 지속됨 ◦ 20:36 발전소 축전지 모두 소모. D/W 압력, S/C 압력 및 수위, 원자로 수위 사용 불가 ◦ 21:00 운전원 배기절차 검토 	

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
		◦ 23:50 해수 주입(FP 기동)		시작	
3.13(일)	◦ Japan Atomic Energy Agency는 1호기의 상황을 INES Level 4로 등급 설정		◦ 06:50 TEPCO PCV 배기 결정	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 02:42 HPCI 자동정지, 이로 인해 모든 냉각수 주입원 상실, 축전지 소진으로 인해 HPCI 기동불능 ◦ 03:05 원자로 압력이 소화펌프 배출압력 (0.61 MPa) 이상으로 빠르게 상승 (4 MPa), SRV 원격개방 실패 (축전지 소진) ◦ 03:37 및 05:08 RCIC 재기동 불가 확인 ◦ 05:00 원자로 압력 증가(1070 psi, 7.38 MPa 이상), 원자로 수위 TAF - 2000mm ◦ 05:08 S/C spray 기동(DDFP) (S/C 살수 배관 이용) ◦ 05:15 부지 소장 격납용기 배기를 위한 배열 지시 ◦ 05:23 임시 압축공기 도구를 이용 S/C 배기밸브 개방 ◦ 07:00 해수주입을 위한 주입배관 완성 ◦ 07:39 CTMT 살수 시작(소방차) - S/C 살수 배관 주입에서 D/W 살수배관으로 대체 기동(DDFP) ◦ 07:43 대체 살수 정지(DDFP) 	

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
			<ul style="list-style-type: none"> ◦ 08:10 모터구동 격납용기 배기밸브(MO-271) 개방 (격납용기 압력 0.35 MPa) ◦ 08:55 격납용기 압력 0.365 MPa 도달후 감소 시작 ◦ 10:15 부지 소장 격납용기 배기 지시 ◦ 10:35 D/W 압력 0.010 MPa 	<ul style="list-style-type: none"> 이용 S/C 살수). ◦ 07:44 SRV를 열기 위한 차량용 축전지 연결 ◦ 08:35 CTMT 배기 밸브 15% 개방 ◦ 08:40-09:10 D/W 살수 주입 정지. - D/W 살수 정지(08:55), 원자로 고압으로 냉각수 주입 안 된 것으로 판단됨 ◦ 08:41 대형공기구동 S/C 배기밸브 개방으로 파열판을 제외한 배기라인 배열 완성 ◦ 08:56 방사선량 882 $\mu\text{Sv/hr}$로 조사 (09:01에 보고됨) ◦ 09:08 PCV 배기수행(자동차 축전지 이용 SRV 개방) ◦ 09:20 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 개방, PCV 압력 저하 확인(09:20) ◦ 09:25 RPV에 담수주입 시작(소방차 이용)- 12:20 담수 고갈로 정지 ◦ 09:28 S/C 배기밸브에 공기 주입을 위한 공기 실린더에 누설 발견 및 조치 ◦ 10:30 부지 소장 해수 주입 준비 지시 	

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 14:15 방사선량 905 $\mu\text{Sv/hr}$로 조사 (14:23에 보고됨) ◦ 14:31 원자로건물 북쪽에서 방사선량 300 mSv/hr로 조사, 흰 연기 포착됨 		<ul style="list-style-type: none"> ◦ 11:00 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 개방 시도. - D/W 압력이 낮아 파열판 설정압력보다 낮아 배기는 실패한 것으로 판단됨. ◦ 12:05 부지 소장 원자로 해수 주입 준비 지시 ◦ 13:00 수위가 낮아지나 노심 상태는 비교적 안정적으로 예상 - 원자로 수위 RCIC에 의해 지속적으로 유지. 소방펌프를 이용한 냉각수 주입 준비. 화재방호계통을 이용한 노심 해수주입 준비 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 11:17 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 닫힘(구동용 공기 상실). ◦ 12:00 RPV 압력 증가(제어반 표시등 점멸). ◦ 12:04 RPV 감압(SRV 개방). ◦ 12:20 담수 소진으로 인한 냉각수주입 중단, 해수 주입 준비 ◦ 12:30 공기구동 Torus 배기밸브 개방 (Air bottle 교체) ◦ 13:00 원자로 압력 감소(28 psi), 노심수위(TAF-2,000mm) 지시 ◦ 13:12 해수주입 시작(소방차 및 화재방호 계통) ◦ 14:30 D/W 압력 증가 ◦ 15:00 원자로 압력 상승(11.6 psia \rightarrow 13 psia) ◦ 15:28 3호기 주제어실 방사선량 12 mSv/hr로 조사, 4호기로 운전원들 대피 ◦ 17:52 임시 공기 압축기 설치(S/C 배기밸브 구동)-이후 5일간 공기/전원 	

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
				상실로 폐쇄 반복 ◦ 19:00 임시공기 압축기 연결(배기 밸브 개방을 위한). ◦ 20:10 비상대응센터(ERC) S/C 대용량 배기 밸브 개방 확인(D/W 압력 확인) ◦ 22:15 DDFP 정지(연료 부족)	
3.14(월)	◦ French Nuclear Safety Authority는 이번 사고의 등급을 Level 5 혹은 6으로 설정 ◦ 02:20 방사선량 751 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 조사 (04:24에 보고됨) ◦ 02:40 방사선량 650 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 조사 (05:37에 보고됨) ◦ 04:00 방사선량 820 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 조사 (08:00에 보고됨) ◦ 09:12 방사선량 518.7 $\mu\text{Sv/hr}$ 로 조사 (09:34에 보고됨)	◦ 01:10 냉각수 주입 정지(low level in main condenser backwash valve pit)		◦ 00:50 D/W 압력 증가. - 13일 21:20에 시작된 배기 운전 이 시점에서 정지로 판단. ◦ 01:10 해수 고갈, 냉각수 주입 정지 ◦ 03:10 원자로 수위(TAF - 2300mm) 지시 ◦ 03:20 해수 주입 재개 ◦ 03:40 S/C 소용량 배기밸브 개방, 격납용기 압력 47.3 psia에서 증가 ◦ 05:20 PCV 배기(소용량 배기 밸브) 수행, 05:30 격납용기 압력 56.6 psia 도달 ◦ 06:10 S/C 소용량 배기밸브 개방(개방 유지 실패-전원 상실) ◦ 09:20 소방차 2대 추가 해수원 추가 ◦ 10:53 자위대 급수 차량 도착	

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 11:01 3호기 폭발 		<ul style="list-style-type: none"> ◦ 11:01 3호기 폭발로 인한 대체 냉각원 운전가용성 검토후 냉각원 변경. 운전원(MCR) 대피, S/C 배기 밸브 폐쇄, 현장작업 중단 ◦ 11:30 원자로 수위 안정적으로 판단 (450~460 kPa) ◦ 12:30 Suppression chamber 온도 149.3C, 압력 486 kPa ◦ 12:50 S/C 배기 밸브(AOV) 닫힘(3호기 폭발) ◦ 13:05 해수 주입을 위한 소방펌프와 호스를 이용하기 위한 준비 시작 ◦ 13:18 원자로 수위 감소 시작 (TAF +2400mm). ◦ 13:25 RCIC 재기동 노력 실패 판단 (13:38에 보고됨) ◦ 13:25 RPV 수위감소 확인 (RCIC 운전불능 공식 확인) ◦ 14:43 소방시스템에 소방차 연결 ◦ 15:28 원자로 수위가 16:30경에 TAF에 도달될 것으로 보고됨 ◦ 15:30 소방차 이용 원자로 해수 주입 ◦ 16:00 현장작업 재개, 원자로 수위 TAF +300mm 	<ul style="list-style-type: none"> 담수 공급 시작 ◦ 11:01 건물 상부에서 대형 수소 폭발 발생, 해수 주입기능 상실 ◦ 11:55 D/W 압력 증가 ◦ 15:30 소방차 이용 원자로 해수 주입 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 11:01 3호기 폭발로 인해 사용후 핵연료 저장수조 상부가 손상된 것으로 추정(헬기 및 살수차를 이용하여 SFP에 냉각수 공급 시도)

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
			<ul style="list-style-type: none"> ◦ 16:20 임시 공기 컴프레서 축압실 배기밸브 개방을 위한 공기압 제공하지 못함을 인지, 원자로 수위 TAF에 도달 ◦ 16:34 SRV 개방 및 대체 냉각수 주입(RCIC 정지). 원자로 압력은 6.998 MPa. ◦ 16:34 RPV 감압운전 시작(1 SRV 개방) ◦ 17:17 원자로 수위 TAF 이하로 감소 (17:25에 보고됨) ◦ 18:00 SRV 개방을 위한 충분한 전원 확보 및 SRV 개방. 원자로 압력은 18:03에 6.075 MPa로 감소 ◦ 18:02 RPV 감압운전을 위한 SRV 개방. ◦ 18:22 원자로 수위 TAF 보다 3.7 m 낮게 감소 (노심 완전 노출, 19:32에 보고됨) ◦ 19:03 원자로 압력이 소방펌프 토출 압력보다 낮은 0.63 MPa 도달 ◦ 19:20 소방펌프 연료 고갈 확인 ◦ 19:54 소방펌프에 연료를 주입하고 재가동하여 해수 주입 시작 -19:54 두 대의 소방차 이용 해수 주입 시도(19:54 and 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 16:30 D/W 압력 증가 - 16:30 새로운 주입 라인 구성 및 해수주입 재개 ◦ 19:20 소방펌프 연료 고갈 확인 ◦ 19:54 소방펌프에 연료를 주입하고 재가동하여 해수 주입 시작 -19:54 두 대의 소방차 이용 해수 주입 시도(19:54 and 	

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 21:35 방사선량 760 μSv/hr로 조사 (22:35에 보고됨) 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 20:00 소방펌프를 이용한 해수 주입 재기동 	19:57) <ul style="list-style-type: none"> ◦ 19:57 두 번째 소방펌프 기동하여 해수 주입 시작. 원자로 수위는 여전히 수위 지시계 하단 위치. ◦ 21:00 소형 공기구동 S/C 배기밸브 (AO-206) 개방. PCV 압력은 427 kPa로 파단판 파단압력보다 약간 낮음 ◦ 21:20 두 번째 SRV 개방을 통한 원자로 감압 시도. 40분후 원자로 수위 TAF-1.6m ◦ 21:30 원자로 수위 TAF-3m ◦ 22:00 원자로 수위 TAF-1.6m, 서서히 증가 ◦ 22:40 원자로 압력 급상승. 0.54 MPa에서 22:50에 1.823 MPa로 급격히 증가. 23:30 원자로 압력 상승 중단. 23:44에 최대치(0.75 MPa) 기록 ◦ 23:00 RPV 압력 감소 ◦ 23:25 RPV 압력 증가(1 SRV 개방). ◦ 23:35 S/C 소용량 배기 밸브(AOV) 닫힘 확인. 	19:57) <ul style="list-style-type: none"> ◦ 20:40 D/W 압력 증가 ◦ 21:14 해수주입 정지(2호기 주입량 늘리기 위하여) ◦ 22:30 격납용기 압력 (from 52.2 psia) 및 PV 압력(from 26.1 psia) 증가 시작 	
3.15(화)	◦ 부지 내 방사능 준위가 400		◦ 00:01 D/W 배기 실패(D/W		

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
	<p>mSv/h까지 상승</p> <p>◦ 06:50 방사선량 583.7 $\mu\text{Sv/hr}$로 조사 (07:00에 보고됨)</p> <p>◦ 07:00 핵심인력 70명을 제외한 650명을 Fukushima Daini로 대피시킴</p> <p>◦ 08:11 방사선량 807 $\mu\text{Sv/hr}$로 조사 (08:36에 보고됨)</p> <p>◦ 11:00 주민 소개 범위를 30km 반경으로 확대</p> <p>◦ 16:00 방사선량 531.6 $\mu\text{Sv/hr}$로 조사 (06:22에 보고됨)</p> <p>◦ 23:05 방사선량 4548 $\mu\text{Sv/hr}$로 조사 (23:20에 보고됨)</p>		<p>& S/C 연결 실패)</p> <p>◦ 01:10 One SRV 개방</p> <p>◦ 02:22 RPV 압력 증가로 SRV 개방 시작.</p> <p>◦ 06:14 S/C 폭발음, S/C 압력 0MPa abs 지시 (기기 고장일 확률이 큼), D/W 압력은 0.73 MPa, 원자로 수위는 TAF-2.8m 지시</p> <p>◦ 07:20 D/W 압력 감소. - D/W 누설 된 것으로 판단됨</p> <p>◦ 08:25 원자로건물 5층에서 연기발생 목격 (09:18에 보고)</p> <p>◦ 11:25 D/W 압력 저하 (원인불명), 격납용기의 부분적인 파손 징후로 판단</p>	<p>◦ 02:30 해주주입 재개.</p> <p>◦ 07:55 백색증기 발생(upper part of reactor building)</p> <p>◦ 16:00 S/C 대용량 및 소용량 배기 밸브(AOV) 닫힘(Solenoid 전원 공급 small generator 고장).</p> <p>◦ 16:05 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 개방 시도.</p>	<p>◦ 06:14 원자로건물 수소폭발 발생 (외벽에 2개 구멍 생김)</p>
3.16(수)	<p>◦ 부지 내 방사능 준위가 1000 mSv/h까지 상승</p> <p>◦ TEPCO는 고방사능으로 인해 작업자들의 작업을 일시적으로 중단</p>			<p>◦ 01:55 S/C 소용량 배기 밸브(AOV) 개방 시도.</p>	<p>◦ 05:45 원자로건물내 화재발생</p> <p>◦ 06:15 화재소화</p>
3.17(목)				<p>◦ 21:00 S/C 대용량 배기</p>	

일자	전체상황	1호기	2호기	3호기	4호기
				밸브(AOV) 닫힘 확인. ◦ 21:30 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 개방 시도.	
3.18(금)				◦ 05:30 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 닫힘 확인 - 05:30 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 개방 시도.	
3.19(토)		◦ 전원 Cable 부지에 연결		◦ 05:30 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 닫힘 확인	
3.20(일)		◦ 15:46 480V MCC(2C) 수전(Tohoku 원전으로부터)		◦ 05:30 S/C 대용량 배기 밸브(AOV) 개방 시도	
3.21(월)					
3.22(화)					
3.23(수)		◦ 냉각수 공급 유로(feed water line) 변경(CS line 염분으로 인한 막힘)			
3.24(목)		◦ 11:30 1/2호기 MCR 조명 복구			
3.25(금)		◦ 15:37 주입냉각수 담수로 변경			

(부록 C) 후쿠시마위원회 구성

총괄 위원장		백원필(KAERI)
총괄 간사		나만균(조선대), 안광일(KAERI)
사고분석 분과	분과장/간사	양준언(KAERI) / 박진희(KAERI)
	위 원	송진호(KAERI), 김경두(KAERI), 최인길(KAERI), 구양현(KAERI), 박수용(KAERI), 조용진(KINS), 김도삼(KINS), 방영석(KINS), 김한곤(한수원), 김형택(한수원), 김명기(한수원), 이광원(한전기술), 성호제(전 한전기술), 이상중(KEPCO-NF), 정재준(부산대), 박현선(포항공대), 김 신(제주대), 박종운(동국대), 윤병조(부산대)
환경영향 분과	분과장/간사	황태원(한수원) / 서경석(KAERI)
	위 원	금동권(KAERI), 황원태(KAERI), 최왕규(KAERI), 윤주용(KINS), 손순환(한수원), 이갑복(한수원), 정미선(한수원), 진영우(원자력의학원), 김은희(서울대), 이상훈(경북대), 김경옥(해양연)
비상대응 분과	분과장/간사	이세열(KINS) / 김완주(KINS)
	위 원	이동명(KINS), 이관엽(KAERI), 한문희(KAERI), 이희환(한수원), 최승진(한수원), 이승숙(원자력의학원), 이경진(조선대)
정책제도 분과	분과장/간사	박광현(경희대) / 허균영(경희대)
	위 원	장창희(KAIST), 김용균(한양대), 송종순(조선대), 정범진(제주대), 조성경(명지대), 원병출(KAERI), 이기복(KAERI), 최광식(KINS), 김균태(KINS), 권맹섭(한수원), 백 훈(한수원)

[보고서 감수]

- 총괄 감수: 장순흥(KAIST; 전 한국원자력학회 회장)
- 환경영향분야 감수: 김인규(한국원자력연구원 원자력환경안전연구부장)