



후쿠시마 원자력발전소 사고를 통한 국내 원자력발전소의 안전성 제고



박만홍
pmh@kepco-enc.com

한양대학교 기계공학과 학사/석사/박사
한국전력기술(주)전력개발연구소 책임연구원
한양대학교 겸임교수

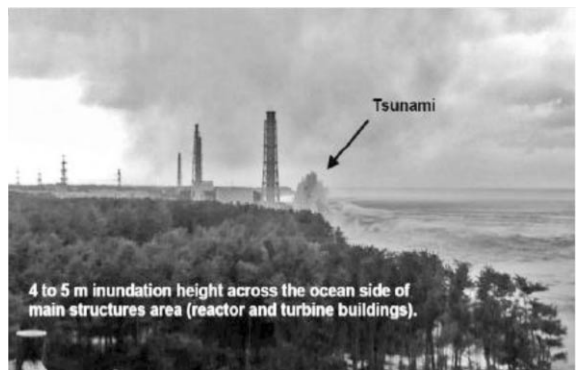
1. 후쿠시마 제1원자력발전소 사고

쓰나미란 바다에서 지진이 발생하면 지각변동에 의해 움직인 바닷물이 육지로 상륙하면서 높은 해일로 다가오는 것을 일컫는다. 태평양에 면해 있으면서 지진이 심한 일본에서 예로부터 겪어오며 붙여진 이름이 세계적으로 인정된 용어이다. 원자력발전소 설계에서 가장 중요하게 생각하는 사고의 조건 하나가 지진이다. 원자력발전소를 건설할 때는 그 부지에서 발생할 가능성이 있는 최고의 지진을 가정하여 설계한다. 물론 지진해일이 밀려올 것을 고려하여 충분한 높이에 원자로 건물물을 짓는다.

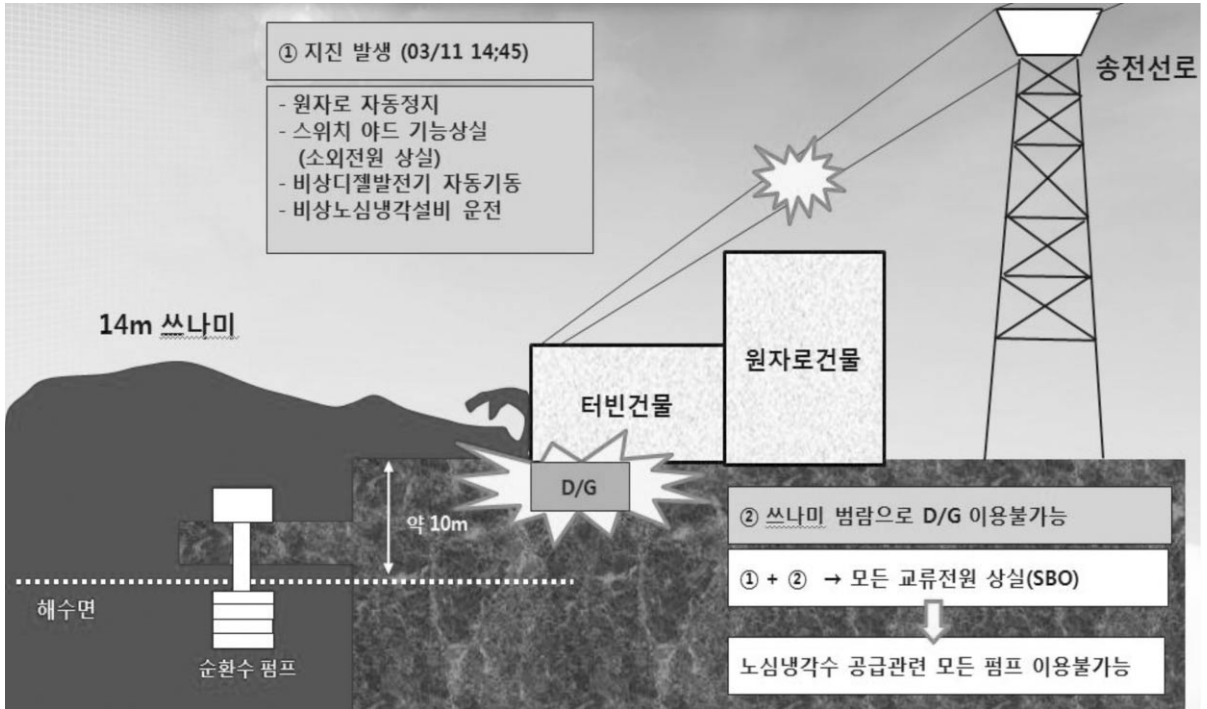
일본은 지진과 쓰나미에 매우 예민하여 이를 대처하는 내진 설계가 대단히 일찍부터 발달하였고, 후쿠시마 원자력발전소도 이런 자연현상을 충분히 고려하여 건설되었다. 하지만 금년 3월 11일 예상하였던 것 보다 월등히 큰 규모 9.0의 지진이 후쿠시마 원자력발전소 가까운 곳에서 발생하고 짧은 시간에 14 ~ 15 m 정도의 지진해일이 원자력발전소 부지를 덮쳤다. 주요 건물물이 2층 정도까지만 물에 잠겼으므로 지하에 있던 대부분의 기기와 전기 장치들이 가동 중지되고, 전원 또한 상실됨으로써 원자력발전소 설계에서 상상하지 못한 사태가 발생하게 된 것이다.

1.1 사고 개요

2011년 3월 11일, 도호쿠(東北) 지방 태평양 해저(동북지방 동쪽 200 km, 해저 24.4 km)에서 규모 9.0의 일본 최대 강진이 발생하여, 이 지진의 여파로 후쿠시마 원자력발전소 등 13기의 원자력발전소가 자동 정지되었으며, 지진의 여파로 발생한 쓰나미에 의해 후쿠시마 제1원전에서 일어난 방사능 누출사고이다. 후쿠시마 제1원전은 6개의 원자로와 6,375개의 폐연료봉을 보유하고 있었으며, 지진과 쓰나미로 발전소의 냉각계통이 고장이 나면서 문제가 야기되었다. 4월 12일, 일본 경제산업성 산하 원자력안전보안원은 후쿠시마 원자력발전소 사고의 등급을 최고 단계인 7등급(국제 원자력 사고등급)으로 상향하였으며,



[그림 1] 후쿠시마 원자력발전소의 쓰나미 현장 사진



[그림 2] 후쿠시마 원자력발전소 지진 및 쓰나미 사고 과정

현재까지도 사건이 진행 중에 있다. 도쿄전력의 발표에 따르면, 이번 지진으로 발생한 쓰나미에 의한 해일 높이는 그림 1과 같이 14 ~ 15 m 규모 정도로, 해발 10 m의 1 ~ 4호기 원자력발전소 부지에 지진해일의 흔적이 4 ~ 5 m 높이의 장소에 까지 남아 있었다. 후쿠시마 제1원전(1 ~ 4호기)은 해발 35 m의 구릉을 표고 10 m까지 깎아 건설한 뒤, 비상디젤발전기를 비롯해 냉각수 취수펌프 등 비상전원장치가 지하에 설치되어 있었으나 이번 쓰나미에 의한 침수로 사용 불능 상태가 되었다.

후쿠시마 원자력발전소에서의 개략적인 사고 경위는 다음과 같으며, 개념도를 그림 2에 나타내었다.

① 일본 동북지방 바다에서 대지진이 발생함에 따라 후쿠시마 제1원전의 모든 원자로가 자

동 정지되었다. 중력가속도는 설계치의 126%이었으며, 이로 인해 시설에 큰 피해가 발생하였고, 1, 2, 3호기가 정지되었다. 이 지진으로 송전탑 1기가 붕괴되어, 후쿠시마 제1원전은 전력을 상실하게 되었다. 발전소의 설비도 지진으로 손상되었다. 외부전원의 손실로 인해, 비상전원(비상디젤발전기, Diesel Generator, D/G) 공급이 시작되었다.

② 쓰나미는 지진으로 인한 첫 번째 해일 이후, 수 차례에 걸쳐 후쿠시마 원자력발전소를 덮쳤다. 지진해일은 낮은 방파제를 넘어 발전소 시설을 크게 파괴하고 지하실도 침수시켰다. 지하에 있던 2, 4호기의 비상전원은 물론 보조냉각계통 해수펌프와 연료 탱크도 유실되었다. 이에 발전소는 소외 및 소내 전원상실에 의한 발전소 완전정전(Station Black Out, SBO)으로 모든 전원을 잃고, 비상노심냉각



계통(Emergency Core Cooling System, ECCS) 및 냉각수순환계통을 작동할 수 없게 되었다.

- ③ 후쿠시마 제1원전 1호기는 사고 후, 정전이 되자 복수기가 작동하여 즉시 노심을 냉각하고, 2, 3호기는 증기터빈구동 살수계통에 의해 각각 약 3일과 1.5일 동안 원자로 노심에 물이 계속적으로 주입되었다. 그러나 발전소 정전 시간은 원자력발전소 최대 설계비상가동시간인 8시간을 초과하였다. 핵연료는 원자로 정지 후에도 계속적으로 붕괴되면서 열을 발생하기 때문에 장시간 냉각되지 않을 경우, 노심 잔열제거기능 상실로 원자로의 압력이 증가하게 되며, 핵연료 및 원자로가 녹는 사고로 연결되었다.
- ④ 원자로 냉각능력이 상실되어 연료봉의 과열, 원자로 수위저하, 연료 피복관의 용융, 원자로 건물 압력상승의 과정이 진행되었고, 핵연료가 손상되면서 수소가 대량 발생하게 되며, 폭발위험이 발생하게 되었다.
- ⑤ 후쿠시마 제1원전 1호기 원자로 건물 압력은

설계 강도의 1.5배 정도이었으나, 대량의 방사성 물질의 대기누출과 수소폭발 방지를 위해 주입되어 있는 질소의 누출 위험에도 불구하고, 원자로 건물 압력을 낮추기 위해 압력 밸브를 개방하여 원자로 건물 내부 공기를 대기로 긴급히 배출하게 되었다.

- ⑥ 핵연료의 용융사고에 의해 대량으로 발생한 수소가 원자로 건물 내부로 누출되어, 원자로 건물 내의 공기를 강제로 배출하는 비상수단을 시행하였으나, 초기 대응 지체와 부적절한 대책으로 후쿠시마 제1원전 1호기 및 3호기에서 수소폭발이 발생하였다. 2호기에서는 압력억제실 하부에서 폭발이 발생하였으며, 사고 발생 10일 경과 후 4호기에서도 냉각수가 고갈되어 사용후핵연료가 공기 중에 노출되어 사용후핵연료의 용융에 따른 냉각수와 핵연료 피복재의 반응으로 사용후연료저장조 내부에 수소가 발생하여 폭발사고가 발생하였다.

1.2 사고 결과

이번 원자력발전소 사고로 인해 대기, 토양, 고

피해사진				
호기명	1호기	2호기	3호기	4호기
노심/연료	손상	손상	손상	연료없음
격납용기	손상	손상	손상	건전
원자로 건물	심각한 손상 (상부 수소폭발)	손상 (하부 폭발음)	심각한 손상 (상부 수소폭발)	심각한 손상 (측면 수소폭발)
사용후 연료	확인 안됨 (담수 주입 중)	손상 확인 안됨 (담수 주입 중)	손상 가능 (담수 주입 중)	손상 가능 (담수 주입 중)

[그림 3] 후쿠시마 제 1 원전 1, 2, 3, 4 호기 피해 현황 (2011/05/09 기준)



인 물, 바다 및 지하수에 방사성 물질이 대량으로 누출되어 오염되었다. 이러한 오염은 일본 및 국외에 퍼지면서 전 세계적으로 원자력발전소의 안전 문제에 커다란 파장을 불러 일으켰다. 일본 원자력안전보안원은 4월 18일 1 ~ 3호기에 대한 핵연료 펠렛 피복관의 파괴(노심손상)와 함께, 핵연료 펠렛의 용융도 일어나고 있다고 처음으로 인정하였다. 그러나 동시에 용융이 발생한 연료는 압력용기의 바닥에 모여있는 상황에는 이르지 않고, 냉각을 위해 원자로에 담겨 있던 물 수면 부근에 굳어져 있으며, 핵 반응이 임계값에 도달할 가능성은 극히 낮다고 발표하였다. **그림 3**에는 후쿠시마 제 1 원전 1, 2, 3, 4호기 피해 현황을 나타내었다. 정기적인 정비 기간이어서 핵연료가 없던 4호기를 제외하고 1, 2 및 3호기의 핵연료는 모두 손상되었으며, 원자로 건물은 핵연료 용융에 의해 발생한 수소의 폭발에 의해 모두 손상된 상황이다. 사용후연료저장조의 손상으로 핵연료의 냉각을 위한 냉각수 수위가 급격하게 저하됨에

따라 외부에서 냉각수를 주입하여 저장조의 냉각수 온도를 저하시키기 위한 조치를 시행하게 되었다. **그림 4**에 수소폭발 후의 발전소 전경을 나타내었으며, 원자로 건물이 수소폭발로 인해 심각한 손상이 발생한 것을 알 수 있다.

대기에 방출된 방사성 물질의 양은 37경 벵크렐(Bq) (0.37 페타 벵크렐) 이상으로 추산되고, 4월 12일, 국제 원자력 사상 평가 척도에 대한 잠정적인 상태를 레벨 7로 평가하고 있다. 또한, 2호기에서 누출되는 고농도 오염수에 포함된 방사성 물질의 양은 도쿄전력 자료의 수량 및 농도에 근거하면 2011년 4월 19일 현재 330경 벵크렐(3.3 페타 벵크렐)이다. 후쿠시마 제1원전 4호기의 화재 이후 원자력발전소 정문에서 측정된 방사선량은 **그림 5**와 같이 급격하게 증가하였으며, 두 개 원자로 사이에서 측정한 방사선량은 최대 시간당 400 밀리시버트(mSV)를 나타내기도 하였다.

후쿠시마 원자력발전소의 사고 후 해수, 대기 및

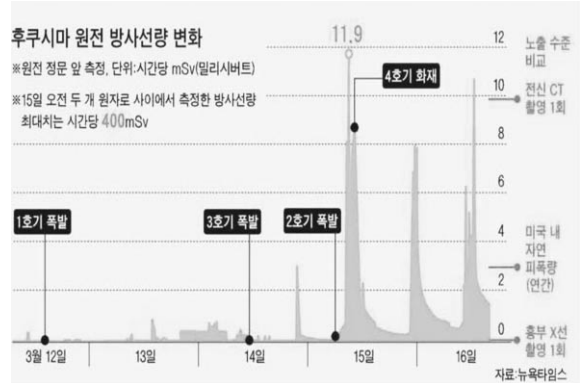


[그림 4] 후쿠시마 제1원전 1, 2, 3, 4호기 원자로 건물 피해 사진(우측부터 1, 2, 3, 4호기)



음식물 등에 오염된 방사능 현황은 표 1과 같으며, 해수는 배출관리 기준 제한치의 35배, 사고 현장에서 약 300 km 이상 떨어진 도쿄에서도 채소류는 섭취 제한치의 164배나 오염된 것으로 발표되었다. 일본정부는 3월 21일 후쿠시마 제1원전의 반경 20 km 내의 주민 21만 명에 대해 피난 지시를 하였으며, 3월 25일에는 반경 30 km 내의 주민 1만 명 이상에게도 자발적 대피 권고를 내려 주민을 피해 지역에서 격리시켰다. 후쿠시마 제1원전에서 방사성 물질이 대량으로 새어 나오는 사고가 일어난 지 6개월 정도 지났고, 도쿄전력은 지난 4월 17일에서 3개월 후인 7월 17일까지 1단계 작업을 달성하고, 내년 1월말까지 2단계 작업을 벌이겠다는 일정표를 제시하였다. 1단계 작업은 어느 정도 진전을 이뤘지만, 해결해야 될 과제도 산적하다는 지적을 받고 있다. 도쿄전력은 지난 4월 일정표를 발표할 때만 해도 원자로 건물에 물을 채워 압력용기를 식히는 이른바 ‘수관냉각방식’에 집착하였지만, 1호기에서 시험해 본 결과 원자로 건물에서 물이 새는 것으로 밝혀져 포기하였다. 이후 원자로 건물 주변에 고인 고농도 오염수를 정화한 뒤 이 물을 다시 원자로에 주입하는 ‘순환냉각방식’으로 전환하였다.

최대 난제는 12만 톤 이상으로 증가한 오염수 처리문제이다. 도쿄전력은 여러 가지 문제를 겪기는 하였지만 프랑스와 미국회사의 도움을 받아



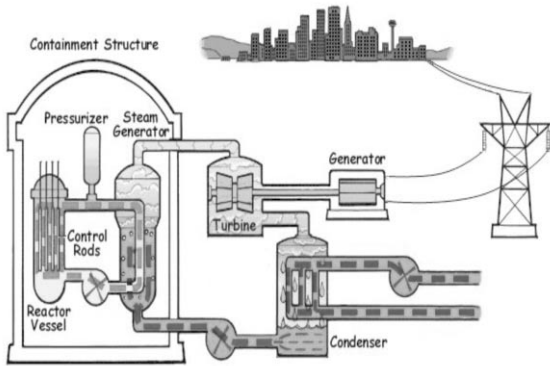
[그림 5] 후쿠시마 원자력발전소 사고 후의 방사선량의 변화

제작한 정화장치를 가동하기 시작하였고, 이후 오염수는 조금씩 줄어들기 시작하였다. 사용후핵연료저장조의 순환냉각은 2, 3호기에서 먼저 시작되었고, 1, 4호기가 나중에 가동되었다. 수소폭발을 막기 위하여 원자로 건물에 질소가스를 주입하는 작업도 1, 2, 3호기에서 시행되었다.

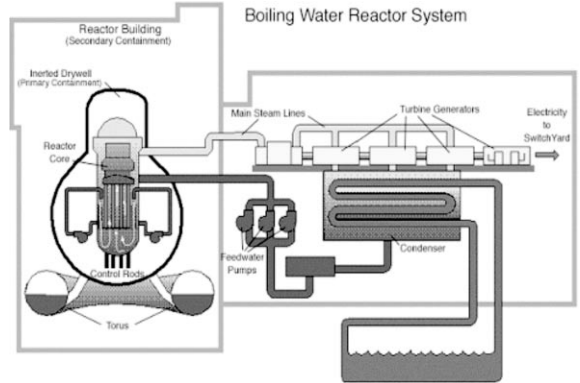
도쿄전력은 후쿠시마 제1원전에서 나온 방사성 물질이 지하수를 오염시키는 것을 막기 위해 지하 30 m 깊이의 벽으로 둘러싸는 지하 댐 설계에 착수하였으나, 정화장치가 자주 고장을 일으킨 탓에 가동률은 70%대에 불과하고, 방사성 물질이 새어 나오는 것을 막기 위한 원자로 덮개 설치공사를 벌여야 하는 등 남은 문제가 적지 않고, 아직

<표 1> 후쿠시마 원자력발전소 사고 후의 방사능 현황

항 목	위 치	일 자	현 황			비 고
			핵 종	농 도	단 위	
해 수	후쿠시마 원자력발전소 배수구 남쪽(300 m)	3.29	I-131	1,400	Bq/l	배출관리 기준제한치의 35배
공 기	후쿠시마 원자력발전소 정문	3.27	I-131	0.45	Bq/l	중사자 흡입 허용치의 1/2
			Cs-137	0.01	Bq/l	중사자 흡입 허용치의 1/300
토 양	수돗물	도쿄	I-131	9.8	Bq/kg	섭취제한치의 1/30
	시금치	도쿄	I-131	54,100	Bq/kg	섭취제한치의 27배
	채소류	도쿄	Cs-137	82,000	Bq/kg	섭취제한치의 164배



[그림 6] 가압형 경수로의 개략도



[그림 7] 비등형 경수로의 개략도

까지도 원자력발전소 사고 상황은 계속 진행 중에 있다.

2. 가압형 및 비등형 경수로의 비교

국내 원자력발전소는 후쿠시마 원자력발전소와는 발전소 유형이 다르다. 현재 국내에서 운영하고 있는 대부분의 발전소는 가압경수로형(Pressurized Water Reactor, PWR) 원자력발전소이고, 후쿠시마 원자력발전소는 GE사가 개발한 비등경수로형(Boiling Water Reactor, BWR) 원자력발전소이다. 그림 6 및 그림 7에 가압경수로형 및 비등경수로형 발전소에 대한 개략도를 나타내었다.

2.1 가압경수로 (Pressurized Water Reactor, PWR)

현재 세계 원자력발전소의 60% 정도를 차지하고 있는 원자로 형태이다. 냉각제와 감속제로 일반물인 경수(H_2O)를 사용하며, 핵연료로는 핵분열이 가능한 우라늄 235가 2~5% 들어 있는 저농축우라늄을 사용한다. 냉각제(물)에 높은 압력을 가해 고온(약 $300^{\circ}C$)에서도 액체상태를 유지하도록 하며, 이것이 열교환을 통해 2차 계통의 물을 증기로 만든다. 가압경수로는 원자로와 증기

발생기가 원자로 건물 안에 있으며, 원자로를 순환하는 1차 계통(방사성물질 포함), 증기발생기를 순환하는 2차 계통(방사성물질이 들어 있지 않은 물), 그리고 복수기를 순환하는 3차 계통(방사성물질이 들어 있지 않은 바닷물)으로 구성되어 있다. 원자로 속에 들어 있는 냉각제에 압력을 가해 운전 조건을 150기압, $300^{\circ}C$ 정도를 유지하고, 이 냉각제가 증기발생기 세관을 통과하면서 증기발생기 셸(shell)측의 물을 끓여 수증기를 만들어 터빈을 돌리게 되어 있다. 터빈을 돌리고 난 증기는 복수기를 통과하면서 다시 물이 되어 증기발생기로 보내진다.

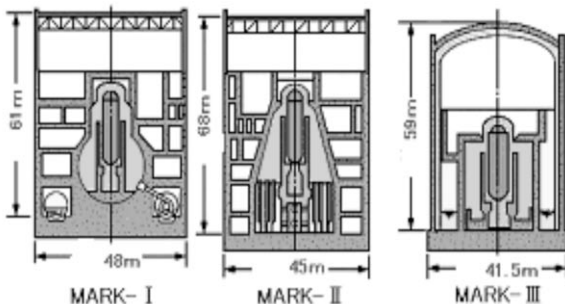
2.2 비등경수로 (Boiling Water Reactor, BWR)

가압경수로와 더불어 비교되는 것이 비등경수로이다. 전체 원자력발전소의 22% 정도를 차지하고 있으며, 일본 후쿠시마에서 사용된 원자력발전소 형태이다. 냉각제와 감속제로 경수(H_2O)를 사용하며, 연료로 우라늄 235가 2% 들어 있는 저농축우라늄을 사용하고 있는 점은 가압경수로와 유사하다. 그러나, 가압경수로는 증기발생기에서 열교환되어 터빈 및 발전기를 구동시켜 전기를 생산하는 반면, 비등경수로는 원자로에서 발생한 증기가 직접 터빈 및 발전기를 구동시켜 전기를 생산하는 구조라는 차이가 있다. 가압경수로는 원자



로에 물이 가득 차 있으므로 연료봉 온도가 천천히 상승하며, 제어봉이 원자로 위쪽에 설치되어 있어 전력 공급이 중단되어도 중력에 의해 작동하고, 원자로 건물이 크므로 만약의 경우 대처 시간이 충분하다는 안전상의 장점을 가지고 있다. 반면에 비등경수로의 가압경수로와 달리 냉각재가 직접 비등해 증기가 되므로 높은 압력을 유지할 필요가 없다는 장점이 있으나, 원자로계통과 터빈계통이 완전히 분리되지 않아서 방사선 차폐가 어렵다는 단점이 있다. 비등경수로의 원자로 건물은 그림 8과 같이 여러 가지 형태를 가지고 있다. 1979년 미국의 Three Mile Island (TMI) 원자력발전소 사고와 1986년 구소련의 체르노빌 원자력발전소 사고가 발생하였을 때, 다중으로 방호한다는 설계개념을 넘어서는 중대한 사고가 발생할 수 있음을 인식하고, 이후 원자로 건물의 초기 모델인 Mark I의 안전성에 대한 문제점이 제기되면서, Mark II 및 Mark III 형태로 그 유형이 개선되었다.

원자력발전소에서 주요 기기를 보호하는 구조물이 원자로 건물인데 가압경수로의 증기발생기가 추가적으로 포함되므로 원자로 건물이 비등경수로보다 월등히 크다. 따라서 경제성 관점에서는 가압경수로가 비등경수로보다 불리할 수 있지만, 원자로 건물 공간이 큰 만큼 사고에 대한 대처능력도 크다고 할 수 있다.



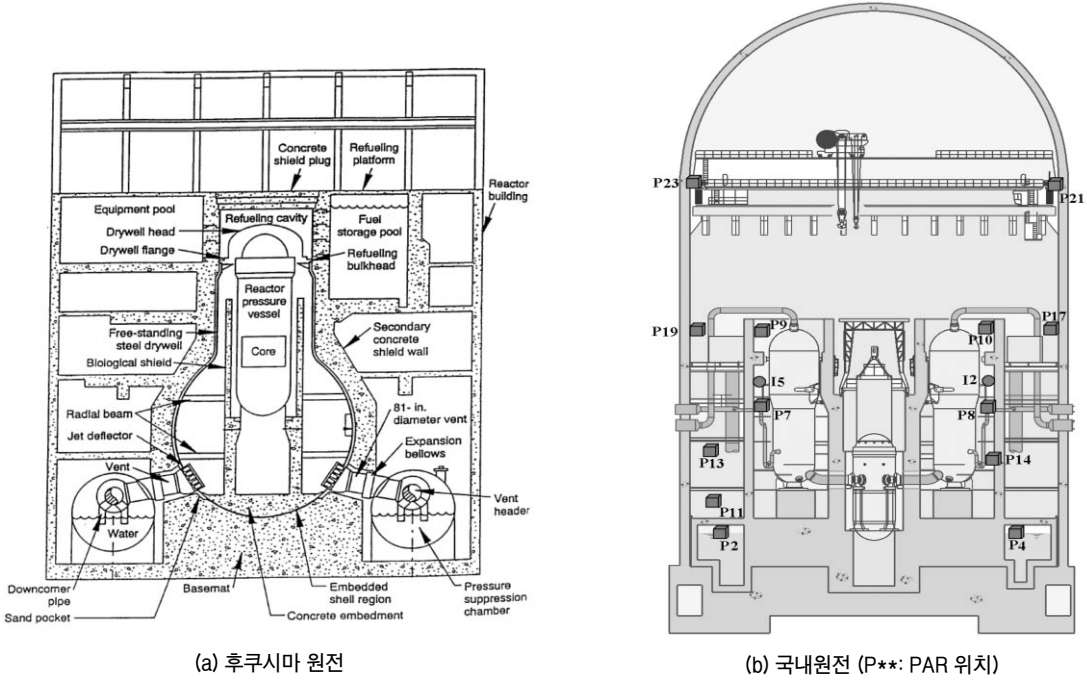
[그림 8] BWR의 Mark I, Mark II 및 Mark III

2.3 후쿠시마 원자력발전소의 원자로

후쿠시마 제1원전 1호기는 1971년 3월에 상업운전을 시작한 세계에서 가장 오래된 원자력발전소 중의 하나로 미국 GE사가 개발한 비등경수로 Mark I의 원자로로 건설된 원자력발전소이다. 미국 GE사가 개발한 비등경수로 Mark I은 스웨덴, 스위스 등 초기 원자력발전소 도입국들에서 건설되었다. 이번 후쿠시마 원자력발전소에서 발생한 중대사고 중에서 두드러진 사고는 수소발생에 의한 원자로 건물의 수소폭발사고다. 비등경수로인 후쿠시마 원자력발전소는 국내에서 채택하고 있는 가압경수로보다 상대적으로 약 1/10 정도의 작은 체적으로 설계되어 있다. 그러므로 이번 수소폭발과 같은 중대사고에 대한 대처능력이 국내 원자력발전소보다 현저히 떨어질 수 밖에 없다. 수소를 제거하기 위한 장치로는 국내 원자력발전소에서 채택하고 있는 피동촉매형 수소재결합기 (Passive Auto-catalytic Recombiner, PAR)가 아닌 동력이 필요한 수소재결합기만 설치되어 있어 사고로 인해 발생한 수소를 제거하기에는 부족한 면이 많았다. 후쿠시마 제1발전소 4호기에 발생한 사고는 핵연료를 저장하는 사용후연료저장조가 그림 9(a)와 같이 원자로 건물 내부에 설치되어 있어 발생한 사고이다. 국내 원자력발전소는 사용후연료저장조가 원자로 건물 외부에 설치되어 있는 반면에 후쿠시마 원자력발전소는 원자로 건물 내부에 설치되어 있어 중대사고가 발생한 경우, 원자로 건물 내의 방사선 준위가 높아져 작업자 접근 및 비상용수 공급 등에 제한을 받을 수 밖에 없는 원자로 형태이다. 그림 9에 후쿠시마 및 국내 원자력발전소의 원자로 건물을 비교하여 나타내었다.

3. 원자력발전소의 안전성

중대사고란 원자력발전소를 설계하기 위해 고려한 기준사고보다 더 심각한 사고로, 설계 안전성



[그림 9] 후쿠시마 및 국내 원자력발전소의 원자로 건물 비교

평가 시 가정된 모든 수단으로도 적절한 노심냉각이나 반응도의 제어가 불가능한 상태가 발생하여 노심의 심각한 손상을 초래함으로써 방사능 물질의 방출에 대비한 방법들의 건전성을 손상시킬 수 있는 사고라 정의할 수 있다.

원자력발전소는 중대사고에 대비하여 다음과 같은 안전성 개념을 도입한다.

- 1) 사고 시 핵연료 연쇄반응이 발생하지 않도록 다중성 및 다양성을 확보하여 안전정지 상태 유지.
- 2) 노심용융 방지를 위한 원자로 노심 잔열 제거 및 침침방호를 위한 비상 냉각계통 설치.
- 3) 사고가 발생하더라도 방사성 물질을 격리할 수 있는 견고하고 용량이 충분한 원자로 건물 설계.
- 4) 중대사고에 대비한 수소제어설비 설치 및 기 생존성 설계.

3.1 원자력발전소의 사고 대응 설계 및 완화계통

3.1.1 설계기준사고 완화계통

원자력발전소에서 설계기준사고와 같은 중대사고가 발생한 경우, 노심용융 방지를 위한 다양한 사고완화계통이 설계되어 있다.

- 안전주입계통으로 노심에 직접 냉각수를 주입하여 사고 후 비상노심냉각 수행.
- 보조급수계통으로 증기발생기에 급수를 주입하여 노심냉각 및 잔열제거 기능 수행.
- 정지냉각계통 및 원자로 건물 살수계통으로 노심 및 원자로 건물의 온도 및 압력을 낮추어 안전성 확보.

3.1.2 완전전원상실 시 대처 설비

사고에 대처하기 위한 다양한 사고완화계통에 대해서 이들 계통의 기능 확보를 위한 다중의 전



원공급원을 확보하도록 설계되어 있다.

- 외부전원상실 시에 7일 동안 연속운전이 가능한 2대의 비상디젤발전기가 사고완화계통에 전원공급.
- 배터리 전원을 이용하여 8시간 동안 원자로 제어 및 감시기능 수행.
- 비상디젤발전기가 모두 운전 불가능한 경우에도 추가적인 대체교류전원 (Alternate Alternating Current, AAC)으로 최소 8시간 동안 사고완화계통에 전원 공급.
- AAC 불능 시에도 터빈구동보조급수펌프로 노심냉각 및 전열제거 가능.
- 터빈구동 보조급수펌프 기동 실패 또는 배터리 방전 시 외부 수원을 통해 냉각 가능.
- 소방차를 이용하여 원자로 건물은 보조살수 노즐을 통해 원자로 건물을 냉각시킬 수 있고, 이차 측 보조건물은 보조급수펌프에 별도의 노즐을 통해 급수 공급 가능.

3.1.3 중대사고 대처 설계 현황

1) 대형 및 견고한 원자로 건물

- 발전소 정전(Station Black-Out, SBO)를 포함한 노심용융 중대사고 상황에서도 원자로 건물은 최소 24시간까지 건전성을 유지할 수 있도록 설계.
- 24시간 이후에는 외부 수원 및 소방차를 이용하여 원자로 건물을 비상 냉각시킬 수 있는 계통 설치(비상원자로 건물살수 보조계통).

2) 수소제어계통

- 피동형 수소재결합기(PAR)와 수소점화기를 설치하여 수소 제거.

3) 원자로공동 설계

- 원자로공동이 파손될 경우, 노심용융물을 원자로공동에서 냉각시킬 수 있도록 충분한 바닥면적 확보 및 원자로공동침수계통 설계.

- 고압 사고를 방지하기 위해 안전감압배기계통을 설치하고 감압 실패 시에도 노심용융물이 원자로 건물 대기로 직접 방출되지 않도록 구조물 설계.
- 원자로공동의 냉각수와 노심용융물 사이에 증기폭발이 발생하더라도 원자로 건물이 건전성을 유지할 수 있도록 설계.

4) 안전감압 및 배기계통

- 원자로용기 건전성을 유지하기 위하여 안전감압 보호 기능 제공.
- 중대사고 시 원자로 건물 직접가열(Direct Containment Heating, DCH)을 방지하기 위하여 원자로 파손 전 급속 감압.
- 완전급수상실(Total Loss of Feed Water, TLOFW) 시 주입 및 방출 운전 수행을 위한 방출유로 형성.

후쿠시마 원자력발전소의 사고와 대비하여 국내에서 새롭게 건설되고 있는 신형경수로 1400 (Advanced Power Reactor 1400, APR1400)에 대한 사고 진행 경위별 대응방안을 비교하여 표 2에 나타내었다. 표 2의 사고 진행별 대응방안 비교에서도 알 수 있듯이, 국내 원자력발전소는 후쿠시마 원자력발전소에 비해 중대사고에 대비해 사고 대응 설계 및 완화계통 설계가 잘 되어 있기 때문에 설계기준을 넘는 재해가 발생하여도 이에 대한 대처가 충분히 잘 이루어질 수 있다.

3.2 원자력발전소의 안전점검 및 후속조치 사항

3.2.1 국내 원자력발전소에 대한 안전점검 개요

일본 대지진에 따른 원자력발전소 사고 발생으로 국내 원자력발전소 시설의 안전성에 대한 국민 우려가 증대하고 있다. 이에 예상을 뛰어넘는 대형 지진과 해일로 인한 원자력발전소 중대사고 발생 시, 대처방안 확보를 위해 국내 원자력 시설



〈표 2〉 사고 진행 경위 별 일본 후쿠시마 원자력발전소 대비 APR1400 설비 및 대응방안 비교

번호	진행경위	후쿠시마	APR1400	비고
1	지진 발생 및 원자로정지 (3/11 14:45)	지진 발생 시 자동 정지	소외전원상실로 자동 정지	
2	비상디젤발전 기동 1시간 후 정지 (침수영향) (3/11 15:45)	비상디젤발전기(2대)	비상디젤발전기(2대)	국내 원자력발전소는 독립적인 2계열의 침수 방호설비 보유 각 부지 별 공용설비 AAC 1대 보유
		대체교류전원(미확인)	대체교류전원 (1대)	
3	배터리를 이용한 제어수행	배터리 용량 : 8시간 가용설비 • RCIC	배터리 용량 : 8시간 가용설비 • 안전주입밸브 • 전동기구동 POSRV • RCGVS	
4	배터리 용량 고갈(3/12 02:00)	8시간 이후 작동중지	8시간 이후 작동중지	
5	냉각기능 상실에 의한 원자로 용기 압력증가 (3/12 05:30)	일차 축 압력감소 설비 (ADS)	- 이차 축 냉각/감압 설비 • 터빈구동 AFW펌프(2대) • 주중기 방출밸브(20개) • 대기방출밸브(4개) - 일차 축 감압 설비 • POSRV	- 보조급수 주입유로 별도 보유 (소방차, 보조급수계통) - 이차 축을 통한 일차 축 냉각 가능 (일차 축 방사능 누출 가능성이 상대적으로 적음) - 배터리 방전 후 RCGVS는 사용 불가
6	원자로용기 압력증가 방지 (3/12 05:30)	1차 원자로 건물로 증기 및 수소 방출 (1차 원자로 건물 수소농도 증가)	- 터빈구동 AFW 펌프 및 ADV 를 사용하여 RCS 압력 증가 방지 - POSRV 자동 개방 가능	배터리 방전 시 POSRV 수동 개방은 불가능
7	증기 및 수소 방출로 인한 1차 원자로 건물 압력 증가 (3/12 06:40)	2차 원자로 건물로 증기 및 수소 방출	- POSRV는 IRWST로 방출 시 급속 냉각 - 2차 축은 대기로 증기 방출	원자로 건물이므로 압력 및 수소농도 증가 속도가 느림
8	노심 노출 발생 (3/12 09:00)	노심냉각재 수위 감소 (RCIC 정지 등)	터빈구동 AFW 펌프 및 ADV를 사용하여 RCS 온도 및 수위 유지 가능	RCS 냉각재 재고량이 크고 냉각재로 가득 차 노심노출이 지연됨
9	수소농도 증가 및 수소폭발 (3/12 15:36)	2차 원자로 건물 내 수소농도 조절설비 미비 (추정)	원자로 건물내 수소농도 조절 설비 보유 (PAR, Ignitor)	PAR는 전원 가용 여부에 상관없이 자동 기동되어 수소제거 기능 수행
10	해수를 원자로 건물에 주입 (3/12 20:20)	1차 원자로 건물을 충수하여 간접 적으로 냉각/감압	비상주입유로 별도 보유 (소방차, 보조살수/급수 계통)	
11	방사능 누출	원자로 건물 감압 시 방사능 누출 발생	원자로 건물 격리로 방사능 누출 방지	수소퍼지계통 사용시 방사능 누출 가능

AAC : Alternate Alternating Current(대체교류전원)
 ADS : Automatic Depressurization System(자동감압계통)
 ADV : Atmosphere Dump Valve(대기방출밸브)
 AFW : Auxiliary Feed Water(보조급수)
 IRWST : In-containment Refueling Water Storage Tank(원자로 건물 내 재장전수 탱크)
 PAR : Passive Auto-catalytic Recombiner (피동촉매형 수소재결합기)
 POSRV : Pilot Operated Safety and Relief Valve(파이롯트 구동안전방출밸브)
 RCIC : Reactor Core Isolation Cooling(원자로 격리냉각)
 RCGVS : Reactor Coolant Gas Vent System(원자로냉각재 배기계통)
 RCS : Reactor Coolant System(원자로냉각재계통)



에 대한 안전점검을 실시하였다. 안전점검의 원칙은 다음과 같다.

- 설계기준 지진과 해일에 대한 안전성 확인.
- 설계기준을 초과하는 자연재해 발생을 전제로 전력계통 침수에도 원자로 냉각능력 확보 방안.
- 원자로 냉각능력 상실을 가정한 중대사고 시 원자로 건물 건전성 확보 방안.
- 방사성 물질의 대규모 방출을 가정한 비상대응 능력 강화 방안.
- 고리 1호기에 대한 경년열화 및 불시정지관점의 정밀점검.

위와 같은 안전점검의 원칙에 따라 다음과 같이 안전점검 방향을 정하였다.

- 자연재해에 대비한 설계 및 설비의 적절성.
 - 지진 대비 설계 및 내진성능.
 - 해일 대비 설계 및 침수 방지 능력.
- 전력공급 및 냉각기능의 적절성.
 - 전력계통 및 비상전원 공급.
 - 정전 및 침수 발생 시 냉각 능력.
- 중대사고 대처능력 및 비상대응의 적절성.
 - 중대사고 대처 설비/절차/전략.
 - 다수 호기 비상대응.
 - 주민 및 작업자 보호를 위한 설비/제도/체계.

점검내용은 ‘지진 발생→대형 해일→전력 상실→대형 원자력발전소 사고’라는 최악의 시나리오를 가정하여 7개 분야에 대한 안전성을 확인하였다.

- 1분야 : 지진에 의한 구조물/기기의 안전성.
- 2분야 : 해일에 의한 구조물/기기의 안전성.
- 3분야 : 침수 발생 시 전력/냉각/화재방호 계통의 안전성.

- 4분야 : 중대사고 대응.
- 5분야 : 비상대응 체계.
- 6분야 : 장기 가동원전 및 신형원전.
- 7분야 : 연구로, 핵주기 시설 및 방사선 비상진료기관.

각 분야에 대한 점검 세부사항 목록 및 조치 계획을 표 3에 나타내었다.

3.2.2 미국원자력규제위원회 권고사항

미국 원자력규제위원회 (US Nuclear Regulatory Commission, USNRC)에서는 후쿠시마 원자력발전소 사고에 대한 특별전문위원회 (Task Force Team)를 만들어 다음과 같은 권고사항 (overarching recommendations)을 제시하였다.

- 1) 규제체계 명확화 (Clarifying the Regulatory Framework)
 - 심층방호와 위험도에 대한 고려가 적절히 균형을 이루는 적정 수준의 방호를 위한 논리적, 체계적이고 밀접한 규제 체계의 구축을 권고.
- 2) 재해에 대한 방호능력 확보 (Ensuring Protection)
 - NRC가 사업자에게 각 운영 중인 원자로의 구조물, 계통, 기기에 대한 설계기준 지진 및 침수(범람) 방호를 재평가 하고, 필요 시 개선할 것을 요구하도록 권고.
 - 지진/침수 위험도를 재평가하고 안전 중요설비의 설계기준 상향.
 - 주기적으로 지진 및 침수 위험도를 확인하도록 법제화 추진.
 - 외부사건 설계기준이 수립될 때까지 방수벽 및 방수문 적용.
 - 장기 검토과제의 일부로서 NRC가 지진으로 인한 화재 및 침수(범람)를 예방 또는 완



화하기 위해 가능한 강화방안을 강구할 것을 권고.

3) 사고 완화기능 강화(Enhancing Mitigation)

- NRC가 모든 운전 중 및 신규 원자로에 대해 설계기준 및 설계기준 초과 외부사건에 대한 발전소 정전사고 완화능력을 강화하도록 조치할 것을 권고.
 - SBO 완화시간을 8시간으로 강화, 최소 72시간 동안 원자로, 사용후연료저장조 냉각유지를 위한 관련 설비, 절차 및 훈련 방안 수립.
 - 10CFR 50.54(hh)(2) 요건을 충족하기 위한 설비의 보호와 다수 호기 사고에 대비한 설비 추가.
- Mark I 및 Mark II 원자로 건물을 설치한 비등경수로 원자로 설비의 신뢰성 있는 강화된 배기설비 설계를 요구할 것을 권고.
 - Mark I 및 Mark II 원자로 건물 배기설비 신뢰성 강화.
 - 후쿠시마 사고 평가에 따라 신뢰성 있는 배기설비 검토.
- NRC가 장기 검토과제의 일환으로 후쿠시마 제1원전 사고에 대한 지속적인 연구를 통해 밝혀질 추가적인 정보로서, 원자로 건물 또는 다른 건물에서의 수소제어 및 완화에 관한 중요 규제사항을 식별할 것을 권고.
- 사용후연료저장조에 대한 보충수 공급능력과 계측설비를 강화할 것을 권고.
 - 안전등급의 수위, 온도 및 방사선량 계측기 설치.
 - 안전등급의 교류전원 추가.
 - 기술지침서 개정 : 1계열의 비상전원 및 계측기 사용가능(조사연료 저장 시).
 - 내진등급의 추가 살수설비 및 수원 확보 (이동형 펌프, 펌프차 등).
- 비상운전 절차, 중대사고 관리지침 및 광범

위한 손상완화 지침 등 발전소 비상대응 능력의 강화 및 통합을 권고.

- 비상운전절차서(Emergency Operating Procedure, EOP) 기술지침 개정.
- EOP 기술지침 개정사항을 운영기술지침서 5장에 반영.

4) 비상대응 준비 강화(Strengthening Emergency Preparedness)

- NRC가 원자력 시설의 비상계획이 보다 장기화된 발전소 전원상실사고 및 다수 호기 사고에 대처하도록 요구할 것을 권고.
 - 다수 호기 사고 시 대응조직 및 인원 총원, 비상계획서에 다수 호기 선량평가 방안 포함, 다수 호기 사고 및 장기 전원상실사고가 고려된 설비 확보 및 통신수단 확보.
 - 다수 호기 사고감시를 위한 신뢰도자료계통 개선.
- 장기 검토과제의 일부로서, NRC가 다수 호기 사고 및 장기화된 전원상실사고에 대한 추가적인 비상대응 준비에 관한 연구를 추진할 것을 권고.
 - 후쿠시마 사고 경험에 근거한 비상대응 설비 요건 및 기준 분석.
 - 다수 호기 및 장기 SBO 대비 지휘계통 및 의사결정조직 평가.
 - 신뢰도자료계통 평가(운전원 조치 없이 수신가능, 위성통신 등의 대체수단).
- 장기검토과제의 일부로서, NRC가 의사 결정, 방사선 감시, 대중에 대한 교육과 관련된 비상대응준비 과제를 필히 추진할 것을 권고.
 - 비상계획(운송 및 대응 순위)이 적절하게 적용될 수 있는지 평가.
 - 정부 및 이해 관계자 간의 후쿠시마 회복 조치 평가 후 개선점 확인.



- 소내 및 비상계획구역 실시간 방사선 감시의 효율성 분석.
- 주변 유관기관과 방사선, 방사선 방호 및 방호약품 사용 훈련.

5) NRC 프로그램 효율성 제고(Improving the Efficiency of NRC Programs)

- NRC가 권고한 심층방어체제로 구성된 심층방어 요건에 더 많은 관심을 두고 사업자의 안전 활동(예: 원자로감시프로그램 등)에 대한 규제를 강화할 것을 권고.
- 원자로감시프로그램 평가/계획 개정의 범위를 심층방어 개념이 완전하게 포함되도록 확대 적용.
- 규제기관 및 현장 주재원의 중대사고 교육 강화.

4. 국내 원자력발전소의 안전점검 및 개선방안

국내 원자력발전소의 안전점검을 위해 표 3과 같이 7개 분야로 나누어 점검을 실시하였으며, 상세한 점검결과 및 개선방안은 다음과 같다.

4.1 지진에 의한 구조물/기기 안전성

가) 현황

- 국내 가동원전은 원자력발전소 부지를 중심으로 320 km 이내의 지질 및 지진 특성을 고려하여 최대 지진을 결정한 후, 이에 여유를 두어 0.2 g (지진 규모 6.5)로 설계되어 있으며 신규 원자력발전소는 보다 강화된 0.3 g (지진규모 7.0)로 설계되고 있음.
- 지진감시설비를 설치/운영하고 있으며, 운전기준 지진 이상의 지진 발생 시 비상운전

<표 3> 국내 원자력발전소의 안전성 점검 개선사항 목록 및 조치

관리번호	개선사항	조치*
1-1	지진 자동정지설비 설치	단 기
1-2	안전정지유지계통 내진성능 개선	중장기
1-3	원자력발전소 부지 최대 지진에 대한 조사·연구	중장기
1-4	주제어실 지진 발생 경보창 등의 내진성능 개선	중장기
1-5	월성원전 진입 교량의 내진성능 개선	단 기
2-1	고리원전 해안방벽 증축	단 기
2-2	방수문 및 방수형 배수펌프 설치	중장기
2-3	원자력발전소 부지 설계기준 해수위 조사·연구	중장기
2-4	냉각해수 취수능력 강화 및 해일 대비 시설 개선	중장기
3-1	이동형 발전차량 및 축전지 등 확보	중장기
3-2	대체비상디젤발전기 설계기준 개선	중장기
3-3	예비연압기 앵커볼트 체결 및 월성원전 비상전력공급계통의 연료주입구 설비 개선	단 기
3-4	스위치 야드 설비 관리 주체 개선	중장기
3-5	사용후핵연료저장조 냉각기능 상실 시 대책 확보	단 기
3-6	최종 열제거설비 침수방지 및 복구 대책 마련	중장기
3-7	옥외 설치 탱크 파손 대비책 마련	중장기

관리번호	개선사항	조치*
3-8	주증기안전밸브설 및 비상급수펌프실의 침수방지 대책 마련	중장기
3-9	소방계획서 개선 및 협력체계 강화	단 기
3-10	화재방호 설비 및 자체소방대 대응능력 개선	중장기
3-11	원자력발전소 성능위주 소방설계 도입	단 기
4-1	피동형수소제거 설비 설치	중장기
4-2	원자로 건물 배기 또는 감압설비 설치	중장기
4-3	원자로 비상냉각수 외부 주입 유로 설치	중장기
4-4	중대사고 교육·훈련 강화	단 기
4-5	사고관리전략 실효성 강화를 위한 중대 사고관리지침서의 개정	단 기
4-6	정지·저출력 운전 중 중대사고관리 지침서 개발	단 기
5-1	원자력발전소 인근 주민보호용 방사선 방호 장비 추가 확보	단 기
5-2	다수호기 동시 비상발령 등 방사선비상 계획서 개정	단 기
5-3	장기 비상발령 대비 비상장비 추가 확보	단 기
5-4	비상진료기관의 장비 추가 확충	중장기



관리번호	개선사항	조치*
5-5	방사선 비상훈련의 강화	단기
5-6	장기전원상실시 필수 정보의 확보방안 강구	중장기
5-7	보수작업자 방호대책 확보	단기
5-8	비상대응시설 개선	중장기
5-9	방사선 비상시 정보공개 절차 개정	단기
5-10	비상계획구역 밖의 주민보호조치	중장기
5-11	비상경보시설의 성능 강화	중장기
6-1	정기검사 등 안전검사 대폭 강화	단기
6-2	주요 기기 및 배관의 가동중검사 강화	단기
6-3	경년열화 관리계획 통합관리방안 수립·이행	단기

*단기 → 2012년 까지 완료 중장기 → 2013년 ~ 2015년 까지 완료

관리번호	개선사항	조치*
6-4	주요 능동기기 성능변수 관리 강화	단기
6-5	정량적 피로 관리 강화를 위한 피로감시시스템 설치	중장기
6-6	가압기 하부헤드의 피로 건전성 강화	단기
6-7	발전정지 유발기기의 신뢰도 증진	단기
6-8	운영 인력 적정성 평가	중장기
6-9	소내 전력공급계통 신뢰도 향상	중장기
6-10	구매 품질보증 체계 점검 강화	단기
7-1	구조물의 내진성능 평가 및 주제어실 개선	단기
7-2	하나로 및 부대시설 부지의 침수심 재평가	단기
7-3	복합적 방사선비상 상황을 반영하여 방사선비상계획서 개정	단기
총 계	50건	

절차서에 따라 발전소를 수동 정지하고, 구조물 및 기기의 건전성을 점검함.

나) 점검내용

- 내진 범주 1급 구조물 및 주요 기기의 내진 성능.
- 지진 감시설비의 정상 작동 여부.
- 지진 발생 시 조치사항의 적절성 및 실현성.

다) 점검결과

- 주요 구조물 및 기기는 주기적인 점검 및 보수 등을 통하여 건설 당시의 상태가 유지되도록 관리하고 있으며, 설계지진에 대한 건전성을 확보하고 있음.
- 설계기준을 초과하는 강진발생을 전제로, 추가적인 안전성 확보를 위해 총 5건의 개선사항 도출.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 지진 자동정지설비 설치.
 - 월성 원전 진입 교량의 내진성능 개선.
- 중장기 조치사항
 - 안전정지유지계통 내진성능 개선.

- 원자력발전소 부지 최대 지진에 대한 조사 연구.
- 주제어실 지진 발생 경보창 등의 내진성능 개선.

마) 개선목표

- 설계기준 초과 지진에도 원자로의 안전정지 유지 능력 확보.

4.2 해일에 의한 구조물/기기 안전성

가) 현황

- 국내 원자력발전소는 부지에 미칠 수 있는 최대 지진해일 및 폭풍 해일을 평가하여 설계기준 해수위 (가능 최고 해수위 및 가능 최저 해수위)를 선정하고 있음.
- 각 원자력발전소 부지별 가능 최고 해수위 및 여유높이는 표 4와 같음.

나) 점검내용

- 지진해일 및 폭풍해일 대비 설계의 적정성.

다) 점검결과

- 설계기준 가능 최고 해수위 조건에서 구조물의 침수 가능성은 없으며, 가능 최저 해수



〈표 4〉 원자력발전소 부지 별 가능 최고 해수위 및 여유 높이(m)

구분	예상 최고 해일		가능 최고 해수위	부지고*	여유 높이
	폭풍	지진			
고리원전	2.5	0.3	7.2	7.5(고리1, 2)	0.3
				9.5(고리3, 4)	2.3
월성 원전	2.0	0.5	7.2	12	4.8
영광 원전	2.3	-	8.4	10	1.6
울진 원전	0.9	3.0	5.7	10	4.3

*고리 1, 2호기 원저 : 부지고 5.8 m + 해안방벽 1.7 m

위 조건에서도 해수의 취수가 가능함.

- 원자력발전소 부지의 가능 최고 해수위는 만조위, 해일에 의한 최고 해수위, 파랑처요름의 높이를 조합하여 부수적으로 산정되었으며, 부지고(해안방벽 포함)보다 낮아 구조물에 대한 침수가능성은 없음.
- 원자력발전소 부지의 가능 최저 해수위도 저조위와 해일에 의한 최저 해수위를 조합하여 보수적으로 산정하였으며, 취수펌프의 취수 흡입구가 가능 최저 해수위보다 낮아 지진해일에 의한 최저 해수위 조건에서도 취수가 가능함.
- 설계기준을 초과하는 대형 해일 등을 전제로, 추가적인 안전성 확보를 위해 총 4건의 개선사항 도출.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 고리원전 해안방벽 증축.
- 중장기 조치사항
 - 방수문 및 방수형 배수펌프 설치.
 - 원자력발전소 부지 설계기준 해수위 조사/연구.
 - 냉각해수 취수능력 강화 및 해일 대비 시설 개선.

마) 개선목표

- 설계기준 초과 해일에도 주요 안전설비의 침수방지 능력 확보.
- 설계기준 초과 해일에도 최종 열제거원 확보.

4.3 침수 발생 시 전력/냉각/화재방호 계통의 건전성

4.3.1 전력계통

가) 현황

- 전원설비는 원자력 관계 법령에 따라 물리적, 전기적으로 독립된 2계통으로 설계되어 있음.
- 소외 전원상실사고에 대비해 전 원자력발전소에 대해 호기당 2대의 비상디젤발전기가 설치되어 있음.
- 소내정전사고에 대비하여 2개 혹은 4개 호기당 1대의 대체교류디젤발전기를 구비하고 있으며, 각 원자력발전소에 설치되어 있는 대체교류디젤발전기 설치 현황은 표 5와 같음.

나) 점검내용

- 설계기준 지진 및 해일에 대한 전력계통의 적절성.
- 설계기준 초과 지진 및 해일에 의한 전력계통의 기능 확보 방안.

다) 점검결과

- 전원설비는 설계기준 지진해일 및 홍수에는 침수 가능성 없음.
- 축전지는 설계기준사고 시, 접속된 전기부하에 충분한 전력을 공급할 수 있는 용량을 확보하고 있음을 확인함.
- 설계기준을 초과하는 대형 해일로 원자력발전소 부지가 침수되고 다수 호기에서 동시에 전력공급이 중단되는 최악의 상황을 가정하여 추가적인 안전성 확보를 위해 총



〈표 5〉 원자력발전소 별 대체교류디젤발전기 설치 현황

원자력발전소	대체교류디젤발전기	비고
고리 1 ~ 4호기	1대 (5,500 kW)	2006년 설치
영광 1 ~ 2호기	1대 (5,500 kW)	2010년 설치
영광 3 ~ 6호기	2대 (6,500 kW)	건설 당시 설치
울진 1 ~ 2호기	1대 (5,500 kW)	2010년 설치
울진 3 ~ 6호기	1대 (7,000 kW)	건설 당시 설치
월성 원전	2대 (2,000 kW)	건설 당시 설치
신고리 1 ~ 2호기	1대 (7,200 kW)	건설 당시 설치

4건의 개선사항 도출.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 예비변압기 앵커볼트 체결 설비 개선 및 월성 원전 비상전력공급시스템의 연료 주입구 설비 개선.
- 중장기 조치사항
 - 이동형 발전 차량 및 축전지 등 추가 확보.
 - 대체비상디젤발전기 설계기준 개선.
 - 스위치 야드 설비 관리 주체 개선.

마) 개선목표

- 설계기준 초과 자연재해와 소내정전사고 시에도 노심 상태를 확인하기 위한 필수 전원 확보.
- 2시간 이내에 대체전원 확보.

4.3.2 냉각계통

가) 현황

- 안전 관련 필수냉각설비는 원자력 관계 법령에 따라 다중 계열로 설계되어 있음.
- 사용후연료저장조는 냉각기능 상실에 대비하여 핵연료저장수탱크, 순수저장탱크 등 다수의 냉각수원을 확보하고 있음.

나) 점검내용

- 설계기준 지진 및 해일에 대한 냉각계통의 적절성.
- 설계기준 초과 지진 및 해일에 의한 냉각계통의 기능 확보 방안.

다) 점검결과

- 냉각설비는 정상운전 및 사고조건 시, 1개 유로 고장을 가정하여도 안전 기능을 유지할 수 있음. 또한 취수구의 이물질 막힘 등 비정상 상태에서도 기능 상실을 방지할 수 있는 설비가 마련되어 있음.
- 사용후핵연료저장 설비는 설계기준사고 상황에서 사용후핵연료의 붕괴열을 제거할 수 있는 능력을 유지하고 있음.
- 옥외에 설치된 연료재장전수탱크 및 복수 저장탱크는 내진 설계되어 있음. 또한 유해물질탱크(황산, 가성소다 에틸렌아민)의 손상에 대비하여 유출용액을 수집/처리하는 설비가 있음.
- 설계기준을 초과하는 대형 해일로 원자력발전소 부지가 침수되고 다수 호기에서 동시에 전력공급이 중단되는 최악의 상황을 가정하여 추가적인 안전성 확보를 위해 총 4건의 개선사항 도출.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 사용후핵연료저장조 냉각기능 상실 시 대책 확보.
- 중장기 조치사항
 - 최종 열제거 설비 침수방지 및 복구 대책 마련.
 - 옥외설치 탱크 파손 대책 마련.
 - 주증기 안전밸브실 및 비상급수펌프실의 침수방지 대책 마련.

마) 개선목표

- 설계기준 초과 자연재해 발생 시 사용후핵



연료 냉각기능은 4일 이내에, 필수해수냉각 기능은 2시간 이내에 복구.

4.3.3 화재방호계통

가) 현황

- 원자력관계법령에 따라 화재시, 안전정지 기능을 확인하는 화재위험도분석을 10년마다 수행하고 있음. 또한 화재 예방/진압 및 안전정지 기능 확보를 위한 화재방호 계획을 수립/이행하고 있음.
- 화재관계법령이 원자력관계법령과 소방관련법령으로 이원화되어 있음.

나) 점검내용

- 원자력발전소 화재방호 설비 및 비상대응 능력 적절성.

다) 점검결과

- 화재방호설비는 소방관련법령 및 원자력관계법령에 따라 설계 및 설치되어 있음.
- 설계기준을 초과하는 대형 해일로 원자력발전소 부지가 침수되고 다수 호기에서 동시에 전력공급이 중단되는 최악의 상황을 가정하여 추가적인 안전성 확보를 위해 개선사항 도출.
- 설계기준을 초과하는 대형 해일로 원자력발전소 부지가 침수되고 다수 호기에서 동시에 전력공급이 중단되는 최악의 상황을 가정하여 추가적인 안전성 확보를 위해 총 3건의 개선사항 도출.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 소방계획서 개선 및 협력체계 강화.
 - 원자력발전소 성능위주 소방설계 도입.
- 중장기 조치사항
 - 화재방호 설비 및 자체소방대 대응능력

개선.

마) 개선목표

- 자체 및 외부 소방대의 소방력 보강 및 협력 체계 강화.

4.4 중대사고 대응

가) 현황

- 중대사고 예방 및 완화 조치는 중대사고정책에 따라 이행하고 있음.
- 울진 3, 4호기 이후 건설된 원자력발전소 및 고리 1호기에 중대사고 시, 원자로 건물 내 생성되는 수소를 제거하기 위한 설비가 설치되어 있음. 울진 1, 2 및 월성 원전을 제외한 모든 원자력발전소에 실시간 수소농도 감시설비가 설치되어 있으며, 국내 원자력발전소 수소제어설비 설치현황은 표 6과 같음.

나) 점검내용

- 중대사고 예방 및 대처설비 타당성.
- 중대사고 전략 및 사고관리계획의 적절성.
- 소내정전사고시 원자로 냉각 방안의 적절성.

다) 점검결과

- 가동 원전에 대해 TMI (Three Miles Island) 후속조치, 중대사고 정책 및 계속 운전 기준에 따라 중대사고 대처설비를 지속적으로 보완하였고, 중대사고관리지침서 개발로 운전원의 중대사고 대응능력이 향상됨.
- 소내정전사고시, 원자로 냉각설비 및 관련

<표 6> 국내 원자력발전소 수소제어설비 설치 현황

고리 1	고리 2~4, 영광 1~4, 울진 1·2	월성 1	월성 2~4	영광 5·6, 울진 3~6
PAR 34대	열재결합기	PAR 21대	점화기 44개	열재결합기, 점화기 18~20개



완화 절차가 구비되어 있어 사고 후 일정 시간 동안 원자로 노심냉각이 가능함.

- 현행 국내의 중대사고관리지침서는 중대사고 시 원자로 냉각, 수소제어, 원자로 건물 살수 및 배기 등에 대한 전원공급이 가용함을 전제로 대응전략이 수립되어 있음.
- 모든 냉각기능이 상실되어 원자로의 핵연료가 용융되는 최악의 경우를 전제로, 추가적인 안전성 확보를 위해 6건의 개선사항 도출.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 중대사고 교육/훈련 강화.
 - 사고관리 전략 실효성 강화를 위한 중대사고관리지침서의 개정.
 - 정지/저출력 운전 중 중대사고관리지침서 개발.
- 중장기 조치사항
 - 피동형 수소제거 설비 설치.
 - 원자로 건물 배기 또는 감압설비 설치.
 - 원자로 비상냉각수 외부 주입유로 설치.

마) 개선목표

- 설계기준 초과 자연재해 발생 시 중대사고 예방.
- 원자로 냉각 및 감압 등 원자로 손상을 방지하기 위한 냉각기능 확보.
- 중대사고 발생 시, 주요 안전변수 감시 기능 확보.
- 수소폭발 방지 등 원자로 건물 건전성 유지

및 방사성물질 외부 방출 제어기능 확보.

4.5 비상대응 및 비상 진료 체계

가) 현황

- 원자력발전소의 방사선 비상대응은 ‘원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재대책법’에 의거 작성/승인되는 방사선 비상계획서에 따라 이행됨.
- 발전소 내/외의 비상대응설비 등은 적절하게 확보하고 있으며, 정기적으로 점검/관리하고 있음.
- 표 7에 나타난 것과 같이 방사선 비상계획서 및 수행절차서의 유효성 등을 점검하고, 비상대응능력 향상을 위해 발전소 별 매년 1회씩 전체훈련, 지자체 주관으로 4년마다 합동훈련, 중앙정부 주관으로 5년마다 연합훈련이 시행되고 있음.
- 원자력발전소 인근 주민보호용 요오드화 칼륨(KI) 및 방독면 보유현황.
 - 요오드화 칼륨 보유량 : 원자력발전소 주변(한수원/지자체) 약 12만 명분.
 - 방독면 보유량 : 원자력발전소 주변 지자체 약 61,700개.
- 방사능재난에 대비하여 원자력의학원을 중심으로 원자력발전소 주변 1차 기관과 시/도 단위 2차 기관 등 총 22개 기관, 400여 명의 비상진료요원이 지정되어 운영 중으로 국내 비상진료체계 관련 기관 현황을 표 8에 나타냄.

<표 7> 국내 비상대응 관련 훈련 현황

구분	연합훈련	합동훈련	전체훈련	부분훈련
주관	정부 (매 5년)	지자체 (부지 별 매 4년)	한수원 (발전소 별 매년)	한수원 (발전소 별 매 분기)
참여 범위	국가전체 방재조직	지역전체 방재조직	발전소전체 방재조직	발전소 실무반

<표 8> 국내 비상진료체계 관련 기관 현황

구분	기관수	역 할
1차 지정기관	9	초기의료대응 (상해자 분류 및 응급처치, 제염)
2차 지정기관	12	과 피폭, 화상, 중증외상 등 치료
원자력의학원	1	급성 방사선증후군 및 내부오염환자 치료



나) 점검내용

- 비상발령 기준, 절차 및 조직 등과 관련된 비상계획.
- 비상대응 시설 및 장비.
- 비상 시 주민 보호를 위한 시스템 운영 상태.
- 비상진료 시스템.
- 비상대응 능력의 확인을 위한 훈련.

다) 점검결과

- 방사선 비상계획서에는 비상대응에 필요한 비상발령 기준 및 절차, 비상요원 편성, 지휘/통제 체계 등의 확보, 비상대응 조직의 기능 및 임무와 발족 시점 등이 명확하게 기술되어 운영되고 있음.
- 비상 장기화에 대비하여 교대 근무조 편성 및 운영절차에 따라 타 원자력발전소 본부 지원, 교대근무 운영, 인력지원 계획 등은 적합하게 수립되어 있음.
- 비상대응 시설로 비상기술지원실과 비상운영지원실, 비상대책실 등을 확보하고 있으며, 비상 발생 시 신속히 발족하여 비상대응이 가능하도록 적합하게 관리되고 있음.
- 발전소 주요 운전변수들은 소내정전사고 시 축전지(2 ~ 10시간 용량)로부터 전력을 공급받는 필수기능감시계통과 안전정보표시계통 등을 통해 교육과학기술부 및 한국원자력안전기술원 등 유관 비상대응조직에 제공되고 있음.
- 원자력발전소 주변 2 km에 비상방송망을 적합하게 설치/운영하고 있으며, 소내/외 유관기관과의 비상통신을 위한 전용전화망 및 위성전화 등을 확보하고 있음.
- 방사선(능) 비정상 상태 및 긴급 작업 시 방사선안전관리절차서를 각 발전소에서 운영하고 있음.
- 방사선 비상 시 보수작업 협력업체인 한전 KPS(주) 직원의 활용과 관련된 계약규정

이 있음. 현재 방재요원으로 지정된 협력업체의 일부 직원에 대한 방재교육 및 방재훈련이 시행되고 있음.

- 원자력발전소 주변 해안가에 설치된 환경감시기에는 전원상실에 대비하여 약 4시간 용량의 축전지가 설치되어 있음.
- 원자력발전소를 중심으로 1, 2차 비상진료기관이 적절하게 구성되어 운영됨.

다수 호기 동시 비상발령 등 최악의 방사능 재난에도 효과적으로 대응할 수 있도록 총 11건의 개선사항을 도출하였다.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 원자력발전소 인근 주민보호용 방사선 방호 장비 추가확보.
 - 다수 호기 동시 비상발령 등 방사선 비상계획서 개정.
 - 장기 비상발령 대비 비상장비 추가확보.
 - 방사선 비상훈련의 강화.
 - 보수작업자 방호대책 확보.
 - 방사선 비상시 정보공개 절차 개정.
- 중장기 조치사항
 - 비상진료기관의 장비 추가 확충.
 - 장기 전원상실시 필수 정보의 확보 방안 강구.
 - 비상대응 시설 개선.
 - 비상계획 구역 밖의 주민보호조치 평가.
 - 비상 경보시설의 성능 강화.

마) 개선목표

- 설계기준 초과 자연재해 상황을 고려한 비상대응능력 확보.
- 다수 호기 동시 비상 시에도 주민보호를 위한 비상대응기능 유지.



4.6 고리 1호기 및 장기 가동원전

4.6.1 고리 1호기

가) 현황

- 국내 첫 번째 상업운전 원자로로서 1978년 상업운전을 개시한 이래 노후화된 주요 기기를 교체하여 2007년 12월부터 계속운전 중임.
- 복수기, 저압터빈 증기발생기, 주 변압기 및 원자로냉각재펌프 내장재 등의 교체, 대체 교류전원 디젤발전기 및 피동형수소재결합기 신설 등 총 26건의 주요설비 교체.
- 강제 원자로 건물, 원자로용기, 안전등급 배관 등 주요 구조물/기기에 대한 경년열화 관리계획과 수명평가가 관련 요건에 따라 이행되고 있음.

나) 점검내용

- 계속운전 평가항목에 대한 전반적인 재검토.
- 경년열화 관리계획 이행 적합성.
- 원자로 용기 건전성.
- 불시정지요인 평가, 인적요소 관리, 품질보증/관리 활동.
- 전출력 정상운전 중 소내전력 공급용 차단기와 외부전원 연결부위 소손 고장으로 인한 파급영향으로 발생한 원자로 자동정지 사건 원인.

다) 점검결과

- 계속운전의 주요 평가항목인 기기 및 배관의 피로수명평가, 비상디젤발전기 신뢰도 평가 등은 적절히 이루어짐.
- 강제 원자로 건물 및 관통부는 계속 운전기간 동안 피로 측면의 건전성을 유지할 수 있는 것으로 평가됨.
- 내진 적합성 평가 대상기기의 현장 유지관리 상태가 양호하며, 내진 보강 및 교체 시

공이 적절함을 확인함.

- 원자로 건물 내 접근 가능한 지역에 위치한 피동형수소재결합기를 점검한 결과, 상태가 양호하고 축매판의 수소제거 성능을 시험한 결과 성능기준(반응온도)을 만족하였음.
- 경년열화 관리계획은 교과부 고시 2009-37호 및 계속운전 평가지침서(KINS/GE-N8)에 따라 평가 대상별로 적절히 수립/이행되고 있음.
- 원자로용기 감시시험결과가 교과부 고시 2009-37호와 미국연방법령(10CFR50)의 허용기준을 만족하고 있어, 계속운전 기간 동안 원자로 용기는 건전할 것으로 평가됨.
- 원자로 용기 용접부 가동중검사는 교과부 고시 2009-37호와 전력산업기술기준(KEPIC)에 따라 적합하게 수행되었으며, 초음파탐상검사 결과는 균열 등이 없어 허용기준을 만족함.
- 화재방호 설비 관리는 교과부 고시 2010-27호, 2009-37호 및 전력산업기술기준에 따라 적합하게 수행되었으며, 10년 주기의 화재위험도 분석 재평가 및 주기적 안전성 평가를 통하여 화재 안전성 증진을 위한 개선조치사항을 도출/이행하고 있어 적절함.
- 원자로 불시정지요인 평가, 인적요소 관리, 품질보증/관리활동 확인함.
- 고리 1호기 원자로 불시정지는 차단기 단자 연결부 스프링의 인장력 부족으로 인한 과열로 발생하였으며, 스프링 관련 품질관리 미흡이 원인으로 조사됨.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 정기검사 등 안전검사 대폭 강화.
 - 주요기기 및 배관의 가동중검사 강화.
 - 경년열화 관리계획 통합관리방안 수립/이행.
 - 가압기 하부 헤드의 피로 건전성 강화.



- 발전정지 유발기기의 신뢰도 증진.
- 주요 능동기기 성능변수 관리 강화.
- 구매 품질보증 체계 점검 강화.
- 중장기 조치사항
 - 정량적 피로 관리 강화를 위한 피로감시 시스템 설치.
 - 운영 인력 적정성 평가.
 - 소내 전력공급계통 신뢰도 향상.

마) 개선목표

- 경년열화로 인한 안전여유도 저하 방지.
- 정비품질 강화를 통한 동일 유형의 불시정지 재발 방지.

4.6.2 장기 가동원전

가) 현황

- 장기 가동원전의 원자로 분해, 조립, 누설 및 이물질 감시는 적절한 절차에 따라 관리되고 있음.
- 원자로냉각재계통 등 주요 계통 배관에 대한 건전성 확인을 위해 장기 가동중 검사계획서가 수립/이행 되고 있음.
- 장기 가동원전의 주요 능동기기(펌프 및 밸브)에 대한 성능시험은 가동중시험계획서 및 운영기술지침서에 따라 수행되고 있음.
- 장기 가동원전(고리 1 ~ 4호기, 영광 1, 2호기, 울진 1, 2호기)은 수소제어기를 설치하여 수소폭발에 대비하고 있음.

나) 점검내용

- 장기 가동원전의 경년열화 관리 적합성.
- 장기 가동원전의 원자로용기, 증기발생기, 배관 및 지지대, 비상디젤발전기 등의 경년열화 감시.
- 장기 가동원전의 주요 능동기기(펌프 및 밸브 등) 관리의 적절성.
- 중대사고 대처설비의 설치 및 정상 가동 여부.

다) 점검결과

- 장기 가동원전의 경년열화는 원자력법 시행규칙(주기적 안전성 평가의 세부사항)에 따라 평가되고 있음.
- 장기 가동원전의 원자로용기의 중성자 조사취화를 감시하기 위한 감시시험이 교과부 고시 2009-37호에 따라 적합하게 수행되고 있으며, 원자로용기 용접부, 상부 헤드 관통부, 중수로 압력관, 원자로냉각재계통 등 주요 계통의 기기 및 배관에 대한 가동중검사가 교과부 고시 2009-37호에 따라 적절히 수행되고 있음.
- 장기 가동원전의 주요 능동기기(펌프 및 밸브 등)에 대한 성능시험은 교과부 고시 2009-37호에 의해 수립된 가동중시험계획서 및 운영기술지침서에 따라 적절히 수행되고 있으며, 정주기 시험을 통해 원자력발전소 가능성을 확인하고 있음.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 정기검사 등 안전검사 대폭 강화.
 - 주요기기 및 배관의 가동중검사 강화.
 - 경년열화 관리계획 통합관리방안 수립·이행.
 - 가압기 하부 헤드의 피로 건전성 강화.
 - 발전정지 유발기기의 신뢰도 증진.
 - 주요 능동기기 성능변수 관리 강화.
 - 구매 품질보증 체계 점검 강화.
- 중장기 조치사항
 - 정량적 피로 관리 강화를 위한 피로감시 시스템 설치.
 - 운영 인력 적정성 평가.
 - 소내 전력공급계통 신뢰도 향상.

마) 개선목표

- 경년열화로 인한 안전여유도 저하 방지.
- 장기 가동원전의 정비품질 강화를 통한 동



일 유형의 불시정지 재발 방지.

4.7 연구로/핵주기 시설

가) 현황

- 하나로 원자로 건물과 주 굴뚝이 0.2 g로 설계되어 있고, 방사선 비상계획서가 수립되어, 국내 발생 가능한 지진 및 비상대응에 대비하고 있음.
- 원자력발전소 연료가공시설의 방사선 비상계획은 사건 유형에 따라 방사선 비상발령 기준이 구분되어 작성됨.

나) 점검내용

- 지진/침수/화재 대비 적절성.
- 지진 대비 비상계획 및 관련 매뉴얼 적절성.

다) 점검결과

- 지진/침수/화재 대비 적절성을 확보하고 있음.
- 지진 대비 비상계획 및 관련 매뉴얼의 적절성을 확보하고 있음.
- 설계기준 초과 대형 집중호우 발생에 효과적으로 대응하기 위한 하나로/핵주기 시설에 대해 3건의 개선사항 도출.

라) 개선사항

- 단기 조치사항
 - 구조물의 내진성능 평가 및 주제어실 개선.
 - 하나로 및 부재시설 부지의 침수심을 재평가.
 - 복합적 방사선 비상 상황을 반영하여 방사선 비상계획서 개정.
- 증장기 조치사항
 - 없음.

마) 개선목표

- 자연재해 및 화재로 인한 방사능 누출사고 방지.

- 비상대응의 효과성 제고.

4.8 국내 원자력발전소 안전성 점검 결론

- 현재까지 조사/연구를 통해 예측된 최대 지진 및 해일에 대해서는 안전성을 확보하고 있는 것으로 확인함.
- 일본 원자력발전소 사고에서와 같이 설계 기준을 초과하는 자연재해 상황에서도 안전성을 확보할 수 있도록, 지진해일 및 중대 사고 등에 대해 50개 장/단기 개선사항을 도출하였음.
- 계속 원전 중인 고리 1호기 또한 안전에 문제가 없음을 재확인하였으며, 매년 실시되는 정기 안전검사 시 계속 운전 관련 점검항목(주요기기 수명감시 등)을 추가하고 점검기간도 연장하여 차별화된 철저한 안전검사 실시가 필요함.

5. 결론

후쿠시마 원자력발전소 사고는 설계에 고려한 재해의 정도를 넘어선 설계초과 사고인 자연재해 현상 때문에 발생하였다. 전 세계 원자력발전소 보유 국가들은 모두 다시 한번 자국 원자력발전소가 안전한지 점검하는 계기가 되었고, 더 심한 환경에서도 안전하게 원자력발전소를 운영할 수 있는 요건들을 검토하게 되었다.

우리나라도 일본 지진 사태가 발생한 직후, 정부, 한수원 등 관련 유관기관의 모든 원자력 종사자들이 비상대응체제를 가동하여 원자력발전소의 안전성을 점검하고 대책을 마련하고 있으며, 지진이외에도 또 다른 고려하지 못한 사고 상황이 있을 수 있는지 세밀하게 검토가 진행 중에 있다.

TMI와 체르노빌 원자력발전소 사고가 발생한 후 많은 설계 기준들이 보강되고 더욱 강화된 안전 규제를 통하여 더 안전한 원자력발전소가 건설되었던 것처럼, 이번 후쿠시마 원자력발전소 사



고도 더욱 안전한 원자력발전소를 건설하게 되는 교훈이 될 것이다.

원자력이 위험하니까 원자력발전소를 짓지 말자는 의견도 많다. 그러나 가장 안전한 것은 위험한 것을 아는 것이다. 위험하다는 것을 알고 이에 충분히 대처하고 관리하면 안전이 보장되지만, 안전하다고 무관심하게 대하면 반드시 위험한 상태에 빠지게 된다. 이번 후쿠시마 원자력발전소 사고로 우리는 또 한번 모든 원자력 사고가 얼마나 엄청난 피해를 가져올 수 있는지 알게 되었고, 이에 원자력 종사자들은 원자력발전소를 안전하게 통제할 수 있도록 설계/시공/운영에 있어서 원자력발전소의 안전성을 확보하려 최선의 노력을 다할 것이다.

참고문헌

1. 위키백과, “후쿠시마 제 1원자력발전소 사고”.
2. 한국원자력학회, “국내 원전 중대사고 관리전략 - 위크숍 (후쿠시마 원전사고에 대응하여)”, 05/2011.
3. 원자력문화재단, “원자력에너지-원자로의 종류”.
4. 한국원자력안전기술원, “국내원전 안전점검 결과보고서”, 05/2011.
5. Nuclear Industry and Safety Agency, www.nisa.meti.go.jp.
6. Japan Atomic Industrial Forum, jaif.or.jp.
7. Tokyo Electric Power Company, www.tepco.co.jp.
8. 원자력산업회의, “일본대진과 원자력발전소”, 03/2011.
9. 한수원, “일본 도호쿠 지진관련 후쿠시마 원전사고 및 국내원전 현황”, 03/ 2011.
10. KEPCO E&C Family, “후쿠시마 원전의 교훈- 위험한 것을 아는 것이 안전이다.”. (KIPEC)