



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 8월

석사학위 논문

EU Stress Test와 국내 원전 안전점검 결과의 비교를 통한 안전성 개선 항목의 적절성 평가

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 화 성

EU Stress Test와 국내 원전 안전점검 결과의 비교를 통한 안전성 개선 항목의 적절성 평가

Adequacy Evaluation of Safety Improvement Items by
Comparing the Results of Domestic NPP Safety Reviews
and EU Stress Test

2016년 8월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 화 성

EU Stress Test와 국내 원전 안전점검 결과의 비교를 통한 안전성 개선 항목의 적절성 평가

지도교수 김 진 원

이 논문을 원자력공학 석사학위 신청 논문으로 제출함

2016년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

강 화 성

강화성의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위 원 조선대학교 교수 송종순 (인)

위 원 조선대학교 교수 김진원 (인)

2016년 5월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 후쿠시마 원전사고 후 국내 및 EU후속조치 비교	2
제 1 절 후쿠시마 원전사고 개요	2
제 2 절 국내 원전 안전점검	2
1. 안전점검 당시의 국내원전 현황	2
2. 국내 원전 안전점검 수행과정	2
3. 국내원전 안전점검 기준	3
4. 점검 결과	5
제 3 절 유럽연합(EU) Stress Test	23
1. 루마니아 체르나보다 원전 현황	23
2. EU Stress Test 수행 과정	24
3. EU Stress Test Specification(점검기준)	24
4. 루마니아 체르나보다 원전 Stress Test 국가보고서	36
제 4 절 국내원전 안전점검과 EU Stress Test 비교	75
1. 수행과정 비교	75
2. 점검기준 비교	75
3. 점검결과 비교	77
제 3 장 결론	83
참고문헌	85

표 목 차

표 2.1	주요 점검항목	4
표 2.2	원전부지별 가능최고해수위 및 여유고	7
표 2.3	대체교류디젤발전기 설치 현황	8
표 2.4	국내 원전 주요 전기기기 설치 위치	9
표 2.5	국내 원전 안전관련 축전지 용량	10
표 2.6	국내 원전 수소제어설비 설치 현황	12
표 2.7	방사선비상훈련별 주기, 주관 및 참여범위	14
표 2.8	방사능재난대비 기관 및 역할	14
표 2.9	일반개입 수준에 따른 보호조치	68
표 2.10	방사능 구름으로부터 외부 선량률에 기반한 보호조치	68
표 2.11	침적으로부터 외부선량률 측정에 기반한 보호조치	68
표 2.12	I-131 대기중 농도 측정에 기반한 보호조치	68
표 2.13	중대사고 예방 강화를 위한 설계변경	73
표 2.14	중대사고결과 완화 및 노외 노심손상 상태로의 진전 방지를 위한 설계변경 ...	74
표 2.15	체르나보다 원전 기타 개선사항	74
표 2.16	수행과정 비교	75
표 2.17	국내원전 및 체르나보다 원전 개선사항 비교	78

그림 목차

그림 2.1	설계기준 해일대비 주요 전기기기 설치 위치	9
그림 2.2	칼란드리아 볼트 내부 칼란드리아 용기 위치	62

ABSTRACT

Adequacy Evaluation of Safety Improvement Items by Comparing the Results of Domestic NPP Safety Reviews and EU Stress Test

By Kang Hwa Sung
Advisor : Prof. Kim Jin Won, Ph.D.
Department of Nuclear Engineering,
Graduate School of Chosun University

This paper is to confirm an necessity of introduction EU stress test for domestic continued operation nuclear plant, evaluate adequacy of safety improvement items and derive additional improvement items, as comparing the performing process, check criteria and inspection results about the domestic nuclear plant safety check and Eu stress test performed After the Fukushima nuclear accident. EU stress test was more systematic process and had detailed criteria, but the inspection results(of Cernavoda NPP) is not more powerful and appropriate for enhancement safety of NPP than domestic safety check. It is focusing in prevention of accident beyond design basis, but the national safety check includes the prevention and respond. therefore, the national safety check is thought as more spacious range and excellence.

Nevertheless, the government performed again the EU stress test for the continued operation of domestic NPP, because the regulatory agencies did not give the technical confidence to the public and did not enjoy the confidence of people by applying the acceptability of public to national regulation. If this situation is persisted, the domestic nuclear power business is expected to be more difficult because of the people's distrust about nuclear safety and the regulation being strengthened in various field(safety, physical protection, cyber security. etc.).

To prepare for the difficult situation that the domestic water can not be provided to plant due to the future severe drought or earthquake, Domestic NPPs need to be reviewed to dig a deep well within site and purchase a small mobile generator truck to supply electric power to water pump of the well

Keyword : stress test, safety check, inspeciton, continued operation

제1장 서론

2011년3월11일 일본 후쿠시마 원전사고 이후 5일만에 우리나라 원전사업자는 국내 예상 최대지진 및 쓰나미 발생의 설계기준 사고시 원전 안전성과 초대형 쓰나미(10m이상)로 인해 발전소부지가 침수되는 것을 가정하여 설계사 및 민간인 전문가로 점검단을 구성하여 긴급 안전점검을 시행하였다.

정부는 사업자 점검결과를 참고하여 후쿠시마 원전사고 후 12일만에 규제기관과 산학연 전문가들로 점검단을 구성하여 운영중인 국내원전에 대해 6개분야 27개 중점 착안사항을 점검기준으로 안전점검을 수행하였다. 이를 통해 50개의 개선사항을 도출하여 추진하고 있다. 일부 개선사항에 대해서는 연구와 개선을 동시에 추진하도록 하는 비효율적인 개선사항도 있었다. 그러나 점검결과 도출된 사항은 광범위한 개선사항으로 일본 원전사고와 같은 설계기준을 초과하는 자연재해 상황에서도 안전성을 확보할 수 있을 정도의 강도 높은 내용이다.

EU를 비롯한 많은 원전 선진국들은 세심한 분석을 통한 후쿠시마 원전사고와 같은 유사한 사고 재발 방지를 위한 조치근거 및 기준을 마련하고 후쿠시마 사고 이후 수개월 후부터 그 기준에 부합하는지 점검하고 이에 따라 조치를 수행하고 있다.

이와 관련하여 본 논문에서 후쿠시마 원전사고 이후 유사 사고 재발 방지조치 준비과정, 기준마련, 점검과정 및 점검결과 조치사항(체르나보다 원전 점검결과 위주)에 대해 국내 원전 안전점검과 EU Stress Test를 비교 분석하여 상호 적절성 여부를 평가하고 개선사항을 도출하고자 한다.

본 내용은 스트레스 테스트 상호점검이 아닌 루마니아 체르나보다 원전에 대한 국가보고서를 근거로 작성하였으며 국내안전점검 사항은 점검당시 발전소 명칭 및 정부조직을 그대로 사용하였다.

제2장 후쿠시마 원전사고후 국내 및 EU 후속조치 비교

제1절 후쿠시마 원전사고 개요

2011년3월11일 일본의 도호쿠지방 동쪽 부근 해저에서 규모 9.0의 지진이 발생하여 진앙지로부터 인접해 있는 14기의 원전 중 11기(후쿠시마 제1원전1,2,3호기, 후쿠시마 제2원전 1,2,3,4호기, 오나가와원전 1,2,3호기, 도카이원전 2호기)가 자동정지하였다(후쿠시마 제1원전 4,5,6호기는 정기검사).

그 후 동경전력 소속의 후쿠시마 제1원전 1,2,3,4호기는 쓰나미로 인해 비상 디젤발전기까지 정지하여 장기간의 소내정전사고(SBO)를 겪게 되었다. 정전으로 인하여 원자로 냉각이 실패함에 따라 원자로 노심이 과열되어 용융되었고, 원자로용기 손상이 발생한 것으로 평가되었다.

이 과정에서 격납용기 압력이 상승하였고, 격납용기 배기 과정에서 핵연료봉-물반응으로 발생한 수소가 원자로건물 내에 모여 후쿠시마 제1원전 1,3,2,4호기 순으로 원자로건물 내에서 수소폭발이 발생하였다.

이로 인해 원자로건물 외벽이 파손되고 소외로 방사성물질이 대량으로 누출되어 일본뿐만 아니라 한국 등 주변국까지 방사성물질이 환경에 영향을 주었다.

제2절 국내 원전 안전점검

1. 안전점검 당시의 국내원전 현황

후쿠시마 원전사고가 발생했을 당시 국내는 21개 원전(PWR 17 Units, PHWR 4 Units)이 운영중에 있었고, 5개호기(PWR)가 건설중에 있었다. 고리1호기(PWR)는 계속 운전중에 있었고, 월성1호기는 계속운전을 준비하고 있었다. 국내 모든 원전은 해변에 위치하여 냉각수를 바다로부터 얻는다.

2. 국내 원전 안전점검 수행과정

사업자는 후쿠시마 원전사고 직후(정부 안전점검 수행 이전)인 3월16일~3월18일에

후쿠시마 원전 사고와 같은 위험성이 국내 원전에 있는지를 확인하고 선제적 대응을 위하여 자체점검을 시행하였다. 최대설계 지진 및 해일시, 침수에 의한 소내 정전사고 발생, 원자로냉각기능 상실, 격납건물 건전성 상실 가능성을 집중 점검하였다.

점검결과, 설계기준 지진 및 해일조건에서 국내 원전은 건전성을 유지하는 것으로 평가되었으나, 후쿠시마 사고와 같은 초대형 자연재해에 대해서는 향후 보강이 필요한 것으로 평가하였다.

사업자 자체점검 이후 정부에서는 일본 대지진에 따른 후쿠시마 원전사고의 발생으로 국내 원자력시설의 안전성에 대한 국민우려가 증대되어 원자력안전위원회를 개최('11.3.21)하고 국내 원자력시설에 대한 종합적인 안전점검을 실시하기로 결정하였다. 이에 따라 후쿠시마와 같이 예상을 뛰어넘는 대형지진과 해일로 인한 원전 중대사고 발생시 대처능력을 확인하여 개선사항을 도출하고자 2011.3.23~4.30까지 규제기관과 민간(산·학·연) 전문가로 구성된 점검단에 의해 『국내원전 안전점검』을 수행하였다. 점검 대상은 가동중 원전과 연구로, 핵주기시설 및 비상진료기관까지를 포함하였다.

국내 원전 안전점검에서는 사업자 자체 점검결과를 포함하여 대형 자연재해로 발생할 수 있는 최악의 원전사고 시나리오를 가정, 자연재해 대비, 중대사고 예방 및 완화를 위한 원자력 설비의 설계가 적절히 구비되어 있는가를 확인하고, 중대사고시 비상대응 체계가 적절히 구축되어 있는가를 중점적으로 확인하였다.

정부(규제기관)는 점검결과 도출된 개선사항에 대해 사업자에게 조치기한을 지정 2015년까지 모두 완료하도록 요구하였다. 아울러 정부는 개선항목별 조치 기한내 완료된 사항에 대해 완료시 정부의 검토 및 승인을 받고 최종 종결 처리하도록 하였다.

3. 국내원전 안전점검 기준

「지진발생→대형해일→전력상실→대형 원전사고」의 최악의 상황을 가정하여 안전성을 확인하기 위해 아래와 같이 6개분야 주요 점검항목에 따라 점검을 수행하였다.

표 2.1 - 주요 점검항목

분 야		주요 점검항목
제1분야 지진·해일에 의한 구조물 안전성		<ul style="list-style-type: none"> • 자연재해(지진, 지진해일, 슈퍼태풍 등) 재평가 • 주요 구조물(격납건물, 격납용기, 비상전원시설, 핵연료 저장시설 등)의 내진성능 재평가 • 지진에 의한 전원상실시 복구방안 수립 및 적절성 • 지진감시설비 및 경보장치의 정상작동 여부 등 • 해일(지진, 태풍 등 여타 자연재해도 고려) 대비 설계치의 적정성과 상향여부 검토 • 주요 구조물의 위치, 방파제 높이 및 해일에 대한 저항의 적절성 • 해일 후퇴시(저 수위시) 취수문제 발생여부
제2분야 침수 발생시 전력, 화재, 냉각계통의 취약성		<ul style="list-style-type: none"> • 비상전원의 연계성 및 침수시 복구대책 • 침수에 취약한 전원 연결부위 위치의 적절성 • 발전소 내 배수시설의 용량 및 범면소실 방지책의 적절성
제3분야 중대사고 발생시 대응절차 적절성		<ul style="list-style-type: none"> • 중대사고 시나리오 점검 및 재평가 • 중대사고 대처설비 구성의 적절성 • 냉각수 고갈시 대처방안과 그 적절성(사용후연료 저장조 포함) • 중대사고 관리계획의 적절성
제4분야 비상대응체계의 적절성		<ul style="list-style-type: none"> • 비상시 의사결정 체계의 적절성 • 방사선 비상발령 및 보고절차의 적절성 • 비상대응 관계자의 교육훈련 및 역할 숙지 여부 • 방재장비, 비상방송통신 설비의 가용성
제5 분 야	장기 가동원전	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 구조물(격납건물 및 터빈건물 등)의 건전성 유지여부 • 주요기기(펌프, 밸브, 배관 등) 관리의 적정성 • 중대사고 대처설비(수소제거설비 등) 설치 및 정상가동 여부 • 주요기기의 노화감시 여부
	신형원전	<ul style="list-style-type: none"> • 운전절차서의 적절성 및 설계변경사항 반영여부
제6 분야	연구로, 핵주기시설	<ul style="list-style-type: none"> • 집중호우시 침수 및 화재대비 대책의 적절성 • 방사성물질 배출관리의 적절성
	방사선비상 진료기관	<ul style="list-style-type: none"> • 비상대응 매뉴얼의 적절성 및 관계자의 역할 숙지 • 비상진료 장비 구비 및 방사성 의약품 비축의 적정성

4. 점검 결과

원자력시설 안전점검 결과 현재까지 조사 및 연구를 통해 예측된 최대 지진과 해일에 대해서는 국내 원전이 안전하게 설계 및 운영되고 있음이 확인되었다. 그러나 일본 원전사고와 같이 설계기준을 초과하는 최악의 자연재해가 발생하더라도 원전이 안전하게 운영될 수 있도록 지진·해일 및 중대사고 등에 대해 총 50개의 장단기 개선사항을 도출하였고, 계속운전중인 고리1호기 또한 안전에 문제가 없음을 재확인하였다. 그러나 다른 원전과 달리 매년 실시되는 안전검사시 계속운전 관련 점검항목(주요기기 수명감시 등)을 추가하고 점검기간도 연장하여 차별화된 철저한 안전검사가 필요하다. 국내원전 안전점검 관련 세부 내용은 다음과 같다.

가. 지진에 의한 구조물·기기 안전성

1) 현황

국내 가동원전은 원전 부지를 중심으로 320km 이내의 지질 및 지진특성을 고려하여 최대 지진을 결정한 후 이에 여유를 두어 0.2g로 설계되어 있다. 각 원전에는 지진감시설비를 설치·운영하고 있으며, 운전기준지진 이상의 지진 발생시 비정상절차서에 따라 발전소를 수동 정지하고 구조물 및 기기의 건전성을 점검하였다.

2) 점검결과

주요 구조물 및 기기는 주기적인 점검, 보수 등을 통하여 건설 당시의 상태가 유지되도록 관리하고 있으므로 설계지진에 대하여 건전성을 확보하고 있다. 설계 변경 또는 추가 설치된 시설은 지진 발생시 기존 시설의 안전성에 영향을 미치지 않도록 설계되어 있다. 주요 기기의 정착부에 대한 열화관리는 관련 운영절차서에 따라 적절히 이루어지고 있으며, 주요 기기와 인접설비는 서로 간섭이 일어나지 않도록 충분한 이격거리를 유지하고 있다. 지진 감시설비는 1개월 주기의 채널점검, 6개월 주기의 기능시험, 계획예방정비시의 교정을 통하여 적절히 관리되고 있으며 경보장치 및 무정전 전원 공급장치도 관련 요건을 만족하였고, 지진발생시 원자로 정지 판단근거인 운전기준지진은 설계지진의 50%로서 관련 요건을 만족하였으며, 지진 발생시 발전소 정지 및 지진응답

분석 등 필요한 조치는 관련 비정상절차서에 따라 적절히 이행 가능하다.

설계기준을 초과하는 강진발생을 전제로, 추가적인 안전성 확보를 위해 다음과 같이 총 5건의 개선사항 도출하였다.

3) 개선사항

① 지진 자동정지설비 설치

전원전에 대해 일정 규모(0.18g) 이상의 지진이 감지될 경우 원자로가 자동 정지되도록설비 개선

② 안전정지유지계통 내진성능 개선

전원전에 대해 설계기준 초과 지진에 대비하여 안전정지유지계통의 내진성능을 신형원전 설계지진(0.3g) 수준으로 보강

③ 원전부지 최대 지진에 대한 조사·연구

전원전에 대해 국내 발생 가능한 최대지진에 대한 전면 재검토 연구수행

④ 주제어실 지진발생 경보창 등의 내진성능 개선

전원전에 대해 주제어실 지진발생 경보창의 내진성능을 개선하고, 고리 1,2,3,4호기에 대해서는 주제어실 운전원의 보호를 위해 주제어실 천정 및 조명설비의 낙하방지조치와 주제어실 사무집기를 고정

⑤ 월성원전 진입 교량의 내진성능 개선

월성1,2,3,4호기에 접근을 위한 교량(후문 앞)의 내진성능을 개선

나. 해일에 의한 구조물·기기 안전성

1) 현황

국내 원전은 부지에 미칠 수 있는 최대 지진해일 및 폭풍해일을 평가하여 설계기준 해수위(가능최고해수위 및 가능최저해수위)를 산정하고 있다. 가능 최고 해수위는 만조위, 해일에 의한 최고 해수위(지진해일과 폭풍해일에 의한 해수위 중 높은 해수위 값 사용), 파랑 처오름의 높이를 조합하여 결정한다. 가능 최저 해수위는 저조위와 해일에 의한 최저 해수위(지진해일과 폭풍해일에 의한 해수위 중 낮은 해수위 값 사용)를 조합하여 결정한다.

2) 점검결과

설계기준 가능 최고 해수위 조건에서 구조물의 침수가능성은 없으며 가능

최저 해수위 조건에서도 취수가 가능하다. 원전 부지의 가능 최고 해수위는 만조위, 해일에 의한 최고 해수위, 파랑 처오름의 높이를 조합하여 보수적으로 산정되었으며, 부지고(해안방벽 포함) 보다 낮아 구조물에 대한 침수 가능성은 없다. 원전 부지의 가능 최저 해수위도 저조위와 해일에 의한 최저 해수위를 조합하여 보수적으로 산정되었으며, 취수펌프의 취수 흡입구가 가능최저 해수위보다 낮아 지진해일에 의한 최저해수위 조건에서도 취수가 가능하다.

표 2.2 - 원전부지별 가능최고해수위 및 여유고(m)

구분	예상 최고 해일		가능 최고해수위	부지고*	여유고
	폭풍	지진			
고리 원전	2.5	0.3	7.2	7.5 (고리 1·2)	0.3
				9.5 (고리 3·4)	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 : 부지고 5.8m + 해안방벽 1.7m

설계기준을 초과하는 대형해일 등을 전제로, 추가적인 안전성 확보를 위해 다음과 같이 총 4건의 개선사항 도출하였다.

3) 개선사항

① 고리원전 해안방벽 증축

고리원전에 대해 해일에 대한 안전 여유고가 상대적으로 낮은 고리원전의 해안방벽을 타 원전의 부지높이 수준(10m)으로 증축

② 방수문 및 방수형 배수펌프 설치

전원전에 대해 비상전력계통 및 주요 안전설비의 침수가능성에 대비하여 구조물에 내진설계된 방수문 및 방수형 배수펌프를 설치(환기구 등 관통부의 침수방호조치 포함)

③ 원전부지 설계기준 해수위 조사 연구

전원전에 대해 기존 설계기준 해수위 평가시 사용된 입력자료에 충분한 보수성(지진공백역의 동시 거동, 슈퍼 태풍 등)을 고려하여 설계기준 해수위 조사 연구 수행

④ 냉각해수 취수능력 강화 및 해일 대비 시설 개선

전원전에 대해 원전부지 설계기준 해수위 조사 연구 결과(상기③ 항)에

따라 기기냉각해수 취수펌프의 취수능력 강화(취수펌프 취수 흡입구의 위치 조정, 수중보 설치를 통한 최저수위 유지 등), 고리1,2호기에 대해 대형 해일시 예비품 및 교체품 자재창고의 파손 가능성에 대비하여 해안에 위치한 자재창고를 침수에 안전한 위치로 이설

다. 침수 발생시 전력 냉각 화재방호 계통의 건전성

1) 현황

전력계통에서 전원설비는 원자력 관계법령에 따라 물리적, 전기적으로 독립된 2계열로 설계되어 있고, 소외전원상실사고에 대비해 전 원전에 대해 호기당 2대의 비상디젤발전기가 설치되어 있으며, 2개 혹은 4개 호기당 1대의 대체교류 디젤발전기를 구비하고 있다.

표2.3 - 대체교류디젤발전기 설치 현황

원전	대체교류디젤발전기	비 고
고리 1~4호기	1대(5,500kW)	2006년 설치
영광 1~2호기	1대(5,500kW)	2010년 설치
영광 3~6호기	2대(6,500kW)	건설당시 설치
울진 1~2호기	1대(5,500kW)	2010년 설치
울진 3~6호기	1대(7,000kW)	건설당시 설치
월성원전1~4	4대(2,000kW/각각)	건설당시 설치
신고리 1~2호기	1대(7,200kW)	건설당시 설치

냉각계통의 안전관련 필수냉각설비는 원자력 관계법령에 따라 다중계열로 설계되어 있어 한 계열의 고장 시에도 건전한 나머지 계열을 이용하여 냉각을 수행할 수 있다.

사용후핵연료저장조는 냉각기능 상실에 대비하여 핵연료저장수탱크, 순수저장탱크 등 다수의 냉각수원을 확보하고 있다.

화재방호와 관련하여 원자력 관계법령에 따라 화재시 안전정지 기능을 확인하는 화재위험도분석을 10년마다 수행하고 있으며, 화재의 예방·진압 및 안전정지 기능 확보를 위한 화재방호계획을 수립·이행하고 있다. 아울러 화재관계법령이 원자력 관계법령과 소방 관련법령으로 이원화되어 있다.

2) 점검결과

전력계통의 전원설비는 설계기준 지진해일이나 홍수에는 침수 가능성이 없으며, 소외전원상실사고시 비상전원설비로 7일 동안, 소내정전사고시 대체비상디젤발전기로 8시간 동안 대응 가능하다.



그림 2.1 - 설계기준 해일대비 주요 전기기기 설치 위치

표 2.4 - 국내 원전 주요 전기기기 설치 위치*

구 분	W형 원전	CANDU형 원전	KSNP형 원전	APR 원전
지표면	100ft	100ft	99ft	100ft
SWYD	100ft	120ft	100ft	100ft
변압기	100ft	100ft	100ft	100ft
EDG 본체	EDG건물100ft	SDG건물100ft	EDG건물100ft	EDG건물100ft
-연료이송펌프	EDG건물80ft	EDG건물95ft	EDG건물67ft	EDG건물67ft
-일일저장탱크	EDG건물119ft	SDG건물100ft	EDG건물125ft	EDG건물120ft
-연료저장탱크	지하80ft	지하95ft	지하67ft	지하67ft
AAC DG	AAC건물100ft	EPS건물100ft	AAC건물100ft	AAC건물100ft
보조급수펌프	보조건물100ft	보조건물89ft	보조건물77ft	복합건물58ft
축전지	제어건물80ft	터빈건물120ft	보조건물124ft	복합건물80ft
HPSI 펌프	보조건물74ft	보조건물93ft	보조건물47ft	복합건물47ft
고압배전반	제어건물80ft	터빈건물100ft	보조건물100ft	복합건물80ft

* 상기 수치는 개략적인 값이며 발전소마다 다를 수 있다.

축전지는 설계기준 사고시 접속된 전기부하에 충분한 전력을 공급할 수 있는 용량을 확보하고 있다.

표 2.5 - 국내 원전 안전관련 축전지 용량

발전소	축전지 용량	사고시 운전시간	비 고
고리 1호기	1700AH	2 시간	
고리 2호기	1500AH	2 시간	
월성 1,2,3,4호기	1550AH	1 시간	2호기 250V 기준
고리 3,4호기	2415AH	2.2 시간	
영광 1,2호기	2415AH	2.2 시간	
KSNP형 원전	2800AH	4 시간	
신고리 3,4호기	2800AH	4 시간	

냉각계통의 냉각설비는 정상운전 및 사고조건 시 1개 유로 고장을 가정하여도 안전기능을 유지할 수 있다. 또한, 취수구의 이물질 막힘 등 비정상 상태에서 기능상실을 방지할 수 있는 설비가 마련되어 있다.

사용후핵연료저장 설비는 설계기준사고 상황에서도 사용후핵연료의 붕괴열을 제거할 수 있는 능력을 유지하고 있고, 사용후핵연료저장조의 장기간 냉각 기능 상실에 대비하여 연료교환수저장탱크, 순수저장탱크 등 다양한 냉각수원이 확보되어 있다. 옥외에 설치된 연료재장전수탱크 및 복수저장탱크는 내진 설계되어 있으며, 또한 유해물질탱크(황산, 가성소다, 에틸렌아민)의 손상에 대비하여 유출 용액을 수집·처리하는 설비가 있다.

화재방호와 관련하여 화재방호설비는 소방 관련법령 및 원자력 관계법령에 따라 설계 및 설치되어 있고, 소방 관련법령에 따른 종합정밀점검을 통해 화재진압을 위한 성능이 유지되고 있으며, 발전소 화재발생에 대비하여 초동소방대와 본부 자체소방대가 운영되고 있어 초동진압 체계는 적절하다.

전력·냉각·화재방호계통은 설계기준을 초과하는 대형해일로 원전부지가 침수되고 다수 호기에서 동시에 전력공급이 중단되는 최악의 상황을 가정하여 추가적인 안전성 확보를 위해 다음과 같이 총 11건의 개선사항을 도출하였다.

3) 개선사항

① 이동형 발전차량 및 축전지 등 확보

전원전에 대해 비상·예비전원의 침수와 장기 소내정전사고에 대비하여, 차량장착 이동형비상발전기 및 축전지(충전기, 케이블 포함) 등을 침수에 안전한 위치에 부지별로 1대씩 구비하고, 임시전원 연결지점을 확보

② 대체비상디젤발전기 설계기준 개선

전원전에 대해 대체비상디젤발전기의 설계기준(용량, 냉각방식 다양화, 연료공급용량 최소 1일 확보 등)을 개선

- ③ 예비변압기 앵커볼트 체결 및 월성원전 비상전력공급계통의 연료주입구 설비 개선

전원전에 대해 대형 지진이나 해일시 예비변압기의 손상 또는 표류를 방지하기 위해 예비변압기를 앵커볼트로 고정하고, 월성원전에 대해 지표면보다 낮게 설치된 비상전력공급계통(EPS)의 연료저장탱크 연료주입구를 지표면보다 높게 설치

- ④ 스위치야드 설비 관리 주체 개선

전원전에 대해 지진 또는 해일에 의한 소외전원상실시 신속한 복구를 위해 스위치야드 설비 주체를 한전과 협의하여 전원복구절차를 마련하는 등 안전에 문제가 없도록 명확화

- ⑤ 사용후핵연료저장조 냉각기능 상실시 대책 확보

전원전에 대해 사용후핵연료저장조 냉각계통의 펌프 및 열교환기의 기능 상실 시 대체 열제거 기능 확보를 위해, 소방차 등을 이용한 냉각수 보충 방안을 마련하고 연결부위를 설치

- ⑥ 최종 열제거설비 침수방지 및 복구 대책 마련

전원전에 대해 대형 폭풍 및 지진해일에 대비하여 기기냉각해수계통 펌프의 전동기와 전력함 등 전기설비에 대하여 방수 조치하고 전동기 예비품 확보 및 기능상실시 복구절차 수립

- ⑦ 옥외 설치 탱크 파손 대비책 마련

전원전에 대해 지진 및 해일로부터 옥외에 설치된 냉각수원 탱크와 화학물질 탱크의 파손에 대비하기 위한 방법을 설치

- ⑧ 주증기안전밸브실 및 비상급수펌프실의 침수방지 대책 마련

지표면에 설치된 월성 2~4호기의 주증기안전밸브실 및 월성 1~4호기의 비상급수펌프실에 대해 지진해일에 의한 침수 및 손상 방지 대책을 마련

- ⑨ 소방계획서 개선 및 협력체계 강화

전원전에 대해 외부소방대 지원요청 절차 간소화, 출입절차 개선, 출동시 효과적인 협조체계, 대형화재에 대한 조치계획 등 소방계획서를 개선하

고, 원전 내·외부 소방서간 협력체계를 강화하며, 원전 인근 119 안전센터/지역대의 소방력 보강

⑩ 화재방호 설비 및 자체소방대 대응능력 개선

전원전에 대해 대형해일 등으로 원전에서 소화수원이 이용 불가능할 경우에 대비하여, 소방차와 연계한 대체수원을 확보하고, 원전의 자체소방대에서 확보하고 있는 화학소방차를 운영하기 위한 최소한의 전문인력을 확보·유지

⑪ 원전 성능위주 소방설계 도입

전원전에 대해 발생 빈도 및 영향을 고려한 화재진압 최적화를 위해, 원전의 특성을 고려하여 원전이 성능위주 소방설계 적용대상 시설로 관리되도록 개선 조치

라. 중대사고 대응

1) 현황

중대사고 예방 및 완화 조치는 중대사고 예방 및 대처 능력평가, 중대사고 관리지침 개발, 확률론적안전성평가(PSA) 등의 중대사고정책(2001년 8월)에 따라 이행되고 있다.

울진 3·4호기 이후 건설된 원전 및 고리 1호기에 중대사고시 격납건물내 생성되는 수소를 제거하기 위한 설비가 설치되어 있으며, 울진 1·2 및 월성 원전을 제외한 모든 원전에 실시간 수소농도 감시 설비가 설치되어 있다.

표 2.6 - 국내 원전 수소제어설비 설치 현황

고리1	고리 2~4, 영광1~4, 울진1 2	월성1	월성2~4	영광5,6 울진3~6
피동형수소재결합기 34대	열재결합기	없음	정화기44개	열재결합기, 정화기18~20개

※ 피동형수소재결합기는 전원 불필요, 열재결합기와 정화기는 전원 필요

2) 점검 결과

가동 원전에 대해 TMI 후속조치, 중대사고정책(2001년 8월) 및 계속운전기준에 따라 중대사고 대처 설비를 지속적으로 보완하였고 중대사고관리지침서 개발로 운전원의 중대사고 대응능력이 향상되었다.

소내정전사고시 원자로 냉각 설비 및 관련 완화 절차가 구비되어 있어 사고 후 일정 시간동안 원자로 노심냉각이 가능하다. 터빈구동 보조급수펌프 등을 활용하여 원자로 냉각을 수행하는 절차가 마련되어 있으며, 중대사고 대처에 필요한 기기 및 계기의 전원 공급은 2시간 이상 가능하다.

현행 우리나라의 중대사고관리지침서는 중대사고시 원자로 냉각, 수소제어, 격납건물 살수 및 배기 등에 대하여 전원공급이 가용함을 전제로 대응 전략이 수립되어 있다.

모든 냉각기능이 상실되어 원자로의 핵연료가 용융되는 최악의 경우를 전제로, 추가적인 안전성 확보를 위해 다음과 같이 6건의 개선사항을 도출하였다.

3) 개선사항

① 피동형수소제거 설비 설치

기 설치된 고리1호기를 제외한 전원전에 전원 공급 없이 작동 가능한 피동형수소제거 설비를 설치하고, 울진1,2호기, 월성1,2,3,4호기에 격납건물내의 수소농도를 실시간 감시할 수 있는 수소감시설비 설치

② 격납건물 배기 또는 감압설비 설치

전원전에 대해 중대사고 대비 격납건물내 과도한 압력상승 예방을 위한 여과배기 또는 감압 설비 설치

③ 원자로 비상냉각수 외부 주입 유로 설치

전원전에 원자로냉각기능 장기상실에 대비한 1, 2차측 비상냉각수 외부주입 유로를 설치

④ 중대사고 교육 훈련 강화

전원전 운전원에 대해 중대사고관리지침서 교육이 다양한 중대사고 시나리오 및 중대사고진행 모의장치 등을 활용한 훈련을 실시하고, 교육시간을 2년간 8시간에서 연간 10시간으로 확대 시행

⑤ 사고관리전략 실효성 강화를 위한 중대사고관리지침서의 개정

전원전에 대해 현행 원자로공동 냉각수 충수 전략에 대해 충수 유로 가용성 및 냉각성능의 타당성을 평가하고 중대사고관리지침서에 반영하고, 중대사고 대처용 필수 기기와 계측설비에 대해 장기 소외전원상실 등을 고려하여 생존성을 평가하고, 전원복구 우선 순위에 근거한 전원 공급절차를 마련

⑥ 정지·저출력 운전중 중대사고관리지침서 개발

전원전 정지·저출력 운전중 중대사고를 평가하여 중대사고관리지침서를 개발

라. 비상대응 및 비상진료 체계

1) 현황

원전의 방사선 비상대응은 「원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책」에 의거 작성·승인되는 방사선비상계획서에 따라 이행된다. 발전소내·외의 비상대응설비 등은 적합하게 확보하고 있으며 정기적으로 점검 관리하고 있다. 방사선비상계획서 및 수행절차서의 유효성 등을 점검하고, 비상대응능력을 위해 발전소별 매년 1회씩 전체훈련, 지자체 주관으로 4년마다 합동훈련, 중앙정부 주관으로 5년마다 연합훈련이 시행되고 있다.

표 2.7 - 방사선비상훈련별 주기, 주관 및 참여범위

구 분	연합훈련	합동훈련	전체훈련	부분훈련
주 관	정부(매5년)	지자체 (부지별 매4년)	한수원 (발전소별 매년)	한수원 (발전소별 매분기)
참여 범위	국가전체 방재조직	지역전체 방재조직	발전소전체 방재조직	발전소 실무반

방사능재난에 대비하여 원자력의학원을 중심으로 원전 주변 1차 기관과 시도 단위 2차 기관 등 총 22개 기관, 400여명의 비상진료요원이 지정되어 운영 중에 있다.

표 2.8 - 방사능재난대비 기관 및 역할

구 분	기관수	역 할
1차 지정기관	9	초기의료대응(상해자분류 및 응급처치·제염)
2차 지정기관	12	과피폭, 화상, 중증외상 등 치료
원자력의학원	1	급성방사선증후군 및 내부오염환자 치료

원전 인근 주민보호용 요오드화칼륨(KI) 및 방독면 보유현황에 대해 살펴보면, 요오드화칼륨 보유량은 원전주변(한수원·지자체) 약 12만명분이고 방독면 보유량은 원전주변 지자체가 약 61,700개를 보유하고 있다.

2) 점검결과

방사선비상계획서에는 비상대응에 필요한 비상발령 기준 및 절차, 비상요원 편성, 지휘·통제 체계 등의 확보, 비상대응조직의 기능 및 임무와 발족시점 등이 명확하게 기술되어 운영되어 있고, 주민보호조치 및 발전소내 인원의 대피 및 소개, 갑상선보호조치, 비상시 출입통제, 음식물 등의 섭취제한, 방사선비상진료 지정병원 협약 등의 내용이 관련기준을 만족하고 있다.

비상 장기화에 대비하여 교대근무조 편성 및 운영절차에 따라 타 원전본부 지원, 교대근무 운영, 인력지원 계획 등은 적합하게 수립되어 있다.

비상대응시설로 비상기술지원실(TSC)과 비상운영지원실(OSC), 비상대책실(EOF) 등을 확보하고 있으며 비상발생시 신속히 발족되어 비상대응이 가능하도록 적합하게 관리되고 있으며, 각 비상대응시설(EOF 등)에는 비상대응활동에 필요한 방사능방재 장비 등을 확보하여 주기적(월간 등)으로 점검 관리하고 있다.

발전소 주요 운전변수들은 소내정전사고시 축전지(2~10시간 용량)로부터 전력을 공급받는 필수기능감시계통(CFMS)과 안전정보표시계통(SPDS)을 통해 교육과학기술부 및 한국원자력안전기술원 등 유관 비상대응조직에 제공되고 있고, 원전주변 2km에 비상방송망을 적합하게 설치운영하고 있으며, 소내·외 유관 기관과의 비상 통신을 위한 전용전화망 및 위성전화 등을 확보하고 있다.

방사선(능) 비정상 상태 및 긴급작업시 방사선안전관리 절차서를 각 발전소에서 운영하고 있고, 방사선 비상시 보수작업 협력업체인 한전KPS(주) 직원의 활용과 관련된 계약규정이 있으며, 현재 방재요원으로 지정된 협력업체의 일부 직원에 대한 방재교육 및 방재훈련이 시행되고 있다.

원전 주변 해안가에 설치된 환경감시기에는 전원상실에 대비하여 약 4시간 용량의 축전지가 설치되어 있다.

원전을 중심으로 1·2차 비상진료기관이 적절하게 구성되어 운영되고 있고, 원전주변 지자체, 원자력의학원 및 비상진료기관에서 방사능 오염환자 치료에 필요한 시설과 방호약품을 보유하고 있으며, 권역별 비상진료기관을 중심으로 매년 비상의료 대응훈련을 수행하여, 상시 적절한 의료대응을 수행할 수 있다.

다수호기 동시 비상발령 등 최악의 방사능 재난에도 효과적으로 대응할 수 있도록 다음과 같이 총 11건의 개선사항 도출하였다.

3) 개선사항

- ① 원전인근 주민보호용 방사선방호 장비 추가 확보
 전원전에 대해 대형사고에 대비하여 원전 인근 주민 보호용 요오드화칼륨은 12만명분에서 50만명분으로, 방독면은 6만개에서 48만개로 추가확보
 ※ (확보 기준) 원전주변 10km 인구수 → 원전주변 16km 인구수
- ② 다수호기 동시 비상발령 등 방사선비상계획서 개정
 전원전에 대해 자연재해 등에 의한 다수호기의 동시 비상상황에 적용 가능한 비상대응조직의 구성 및 운영방안, 해일의 규모를 반영한 비상발령 기준, 비상대응조직 발족 시점 등을 방사선비상계획서에 반영
- ③ 장기 비상발령 대비 비상장비 추가 확보
 전원전에 대해 방호복, 방독면 필터 등의 방호용품 및 방사선측정기를 현행보다 200%이상 추가 확보하여 침수되지 않는 곳에 보관
- ④ 비상진료기관의 장비 추가 확충
 원자력의학원은 방사능 재난시 신속한 초기의료대응을 위해 비상진료 시설·의료장비 확충 및 비상진료기관 추가 지정
- ⑤ 방사선 비상훈련의 강화
 전원전에 대해 지진과 해일 등 자연재해에 대한 실질적인 시나리오를 개발하여 방재훈련에 활용하고, 불시훈련을 통한 비상대응 능력을 향상
- ⑥ 장기전원상실시 필수 정보의 확보방안 강구
 전원전은 주민 보호조치에 필요한 발전소의 필수안전변수를 비상대응조직에 지속적으로 제공할 수 있도록 필수기능감시계통(CFMS)과 안전정보표시계통(SPDS)의 전원설비를 보강하고, 원전 주변의 환경감시기에 대해 대형해일시 침수 방지 대책을 마련하며, 장기간 전원상실에 대비하여 비상전원을 추가 확보
- ⑦ 보수작업자 방호대책 확보
 전원전에서 한수원 비상조직에 협력업체의 보수작업자들을 포함시키고, 이들에 대해 방재교육 및 훈련을 실시할 수 있도록 방사선비상계획서를 개정하고, 방사선비상상황 발생시 긴급작업자 방호에 혼선이 없도록 표준화된 절차(긴급작업 결정, 승인절차 등)를 마련

⑧ 비상대응시설 개선

고리원전에 대해 부지고 초과 해일 및 지진에 대비하여 비상기술지원실(TSC)과 비상운영지원실(OSC)의 내진성능 개선하고, 고리원전 및 영광1,2호기는 침수 방지 능력을 개선하며 고리원전, 울진1,2호기, 월성원전은 비상기술지원실 및 비상운영지원실의 적정 면적을 확보하고 전원전은 이러한 실들에 비상전원을 확보

⑨ 방사선 비상시 정보공개 절차 개정

전원전은 방사선비상계획서 또는 관련 매뉴얼(위기대응매뉴얼 등)에 언론, 국민, 지역민에게 제공되어야 할 구체적 정보(실시간 정보공개 목록, 방사능 오염정보, 지역민 방호 안내 등) 및 정보공개 주기 등이 포함되도록 개정

⑩ 비상계획구역 밖의 주민보호조치 평가

전원전에서 동일부지 다수호기 동시사고를 고려하여 현행 비상계획구역 밖의 주민보호조치 평가

⑪ 비상 경보시설의 성능 강화

전원전에 대해 설계기준 초과 자연재해로 인한 전원상실에 대비하여, 발전소 내부와 원전 반경 2km이내에 직원 및 주민보호를 위해 설치된 경보시설의 비상전원을 확보

마. 고리 1호기 및 장기 가동원전

1) 현황

고리 1호기는 국내 첫 번째 상업운전 원자로로서 1978년 상업운전을 개시한 이래 노후화된 주요 기기를 교체하여 2007년 12월부터 계속운전 중이다. 계속운전을 위해 복수기 교체('88년), 저압터빈 교체('97년), 증기발생기 교체('98년), 주변압기 교체('02년), 원자로냉각재펌프 내장품 교체('05년), 대체교류전원 디젤발전기 신설('06년), 피동형수소재결합기 신설('10년) 등 총 26건의 주요설비를 교체하였고, 강재 격납건물, 원자로용기, 안전등급배관 등 주요 구조물·기기에 대한 경년열화 관리계획과 수명평가가 관련 요건에 따라 이행되고 있다.

장기 가동원전의 원자로 분해, 조립, 누설 및 이물질 감시는 적절한 절차에 따라 관리되고 있다. 원자로용기의 중성자 조사취화를 확인하기 위한 감시시험

은 교과부고시 2009-37호(과기.원자로.014)에 따라 수행되고 있으며, 원자로용기 용접부, 상·하부헤드 관통부, 중수로 압력관에 대한 건전성 확인을 위해 장기 가동중검사계획서가 마련되어 있다.

원자로냉각재계통 등 주요 계통 배관에 대한 건전성 확인을 위해 장기 가동중 검사계획서가 수립·이행되고 있으며, 증기발생기 세관에 대한 검사결과에 따라 허용기준을 초과하는 지시가 확인된 경우 관막음 등의 경년열화관리가 이루어지고 있다.

장기 가동원전의 주요 능동기기(펌프 및 밸브)에 대한 성능시험은 가동중시험계획서 및 운영기술지침서에 따라 수행되고, 안전관련 능동기기인 펌프 및 밸브에 대한 정주기 시험을 통해 운전가능성을 확인하고 있다.

장기 가동원전(고리 1~4, 영광 1·2, 울진 1·2)은 수소제어기를 설치하여 수소폭발에 대비하고 있다.

2) 점검결과

고리 1호기에 대해 계속운전의 주요 평가항목인 기기 및 배관의 피로수명 평가, 비상디젤발전기 신뢰도평가 등은 적절히 이루어지고 있다. 안전 1등급 기기와 배관의 피로수명 평가는 피로감시 시스템을 이용하며, 누적피로계수는 전력산업기술기준의 허용기준을 만족하고 있다. 계속운전 이후 잔여 검증수명이 10년 미만인 전기기기(891개)는 전량교체('07년)되었고, 케이블 789회선은 '07년 수립된 계획대로 교체되고 있다. 비상디젤발전기 설계용량은 2,920 kW이나, 현재 필요한 전기부하는 2,763kW로서 약 6%의 여유도를 가지며, 운전신뢰도는 0.99 이상으로서 목표치 0.975를 만족한다.

강제 격납건물 및 관통부는 계속운전기간 동안 피로 측면의 건전성을 유지할 수 있는 것으로 평가되었다. 강제 격납건물의 경우 대기압과 운전압력 사이의 반복횟수, 정상운전 중 압력 변동, 기동 및 정지에 따른 온도 차이, 압력을 제외한 모든 기계적 하중 변동 등이 전력산업기술기준(KEPIC)의 요건을 만족함을 확인하였으며, 온도 및 압력변화에 가장 취약한 배관 관통부인 주증기 및 주급수 배관 관통부의 경우 과도상태(가열 및 냉각) 예상 횟수가 설계에서 고려한 횟수 보다 적음을 확인하였다.

내진 적합성 평가대상기기의 현장 유지관리 상태가 양호하며 내진보강 및 교

체 시공이 적절함을 확인하였다.

격납건물 내 접근 가능한 지역에 위치한 피동형수소재결합기(PAR)를 점검한 결과 상태가 양호하였고, 촉매판의 수소제거 성능을 시험한 결과 성능기준(반응 온도)을 만족하였다.

경년열화 관리계획은 교과부고시 2009-37호(과기.원자로.035) 및 계속운전 평가지침서(KINS/GE-N8)에 따라 평가대상별로 적절히 수립 이행되고 있다.

원자로용기 감시시험 결과가 교과부고시 2009-37호(과기.원자로.014)와 미국 연방법령(10CFR50)의 허용기준을 만족하고 있어 계속운전 기간동안 원자로 용기는 건전할 것으로 평가되었다. 최대흡수 에너지가 낮은 것에 대해서는 파괴시험 및 해석을 통해 안전여유도를 확인하였고, 또한 노심대 용접부에 대한 100% 체적 비파괴검사를 통해 균열이 없음을 확인하였다. 가압열충격에 대해서는 ASME Code 절차(Master Curve 방법)에 따라 정밀한 파괴시험방법을 활용하여 평가한 결과, 가압열충격 기준온도(127℃)가 허용기준(149℃ 이하)을 만족하는 것을 확인하였다(본 방법은 10CFR50과 IAEA TECDOC-1631 등에 규정되어 있다). 압력-온도 제한곡선은 국내법령과 KEPIC 및 ASME Code에 제시된 방법에 따라 적절하게 작성되었으며, 충분한 안전운전영역을 확보하고 있다. 원자로용기 건전성평가의 객관성 확보를 위하여, 외부 전문가가 최대흡수 에너지, 가압열충격, 압력-온도 제한곡선에 대해 독립적인 검증해석을 수행한 결과, 관련 요건이 만족됨을 재확인하였다.

원자로용기 용접부 가동중검사는 교과부고시 2009-37호(과기.원자로.016)와 KEPIC에 따라 적합하게 수행되었으며, 초음파탐상검사 결과는 균열 등이 없어 허용기준을 만족하고, 검사대상 선정, 검사방법, 검사 내용 및 결과는 국내·외 전문가에 의한 재평가를 통해 적절함을 확인하였다.

화재방호 설비 관리는 교과부고시 2010-27호(과기.원자로.031), 2009-37호(과기.원자로.032) 및 전력산업기술기준(KEPIC)에 따라 적합하게 수행되었으며, 10년 주기의 화재위험도분석 재평가 및 주기적안전성평가를 통하여 화재안전성 증진을 위한 개선조치사항을 도출·이행하고 있어 적절하다.

원자로 불시정지요인 평가, 인적요소관리, 품질보증 관리활동에 대해, 원자로 불시정지요인을 특별 관리하는 발전정지유발기기 관리체계와 불시 정지방지 대책을 추적 관리하는 운영개선프로그램 등을 2007년부터 운영중 이고, 설비개

선을 통한 불시정지 방지 노력을 지속 추진하고 있음을 확인하였다. 주제어실 및 원격정지반 인간-기계연계설비에 대해 수행된 최근 10년간의 설계변경 및 보수내용은 표준기행절차서 및 인간공학 지침에 따라 인적요소가 적절히 고려되었음을 확인하였고, 기기 교체품에 대한 품질보증을 위하여 단종기기에 대한 일반 규격품 품질 검증 프로그램이 전사 표준기행절차서로 수립되어 있고, 정비 품질 보증을 위한 상주협력업체 종사자 교육훈련이 실시되고 있다.

고리 1호기 원자로 불시정지(4.12)는 차단기 단자 연결부 스프링의 인장력 부족으로 인한 과열로 발생하였으며, 스프링 관련 품질 관리 미흡이 원인으로 조사되었다. 비안전등급 차단기의 문제로 인해 안전관련 계통의 전원공급을 위한 외부 전원이 차단되는 취약성이 있어 이의 개선이 필요하며, 공급품목의 설치후 설비개선사항이 적기에 반영될 수 있는 방안 마련이 요구된다.

장기 가동원전의 경년열화는 원자력법 시행규칙(주기적안전성평가의 세부사항)에 따라 평가되고 있다.

장기 가동원전의 원자로용기의 중성자 조사취화를 감시하기 위한 감시시험이 교과부고시 2009-37호(과기.원자로.014)에 따라 적합하게 수행되고 있으며, 원자로용기 용접부, 상부헤드 관통부, 중수로 압력관, 원자로냉각재계통등 주요 계통의 기기 및 배관에 대한 가동중검사가 교과부고시 2009-37호(과기.원자로.016)에 따라 적절히 수행되고 있다.

장기 가동원전의 주요 능동기기(펌프 및 밸브)에 대한 성능시험은 교과부고시 2009-37호(과기.원자로.033)에 의해 수립된 가동중 시험계획서 및 운영기술 지침서에 따라 적절히 수행되고 있으며, 정주기 시험을 통해 운전가능성을 확인하고 있다.

종합 확인결과 고리 1호기를 포함한 장기 가동원전의 안전성 강화를 위해 8건의 개선사항을 도출하였고, 고리 1호기 자동정지('11.4.12) 유사사례 재발방지를 위해 2건의 개선사항을 도출하였으며 그 내용은 다음과 같다.

3) 개선사항

① 정기검사 등 안전검사 대폭 강화

고리 1~4, 영광 1·2, 울진 1·2, 월성1호기에 대해 경년열화 완화대책 및 관리계획을 수립하여 이행하고 적합성을 정기검사에서 입증, 고리1호기

- 에 대해 기존 정기검사 항목에 주요기기 수명감시 등 계속운전 관련 항목을 추가하고 필요시 점검기간도 연장
- ② 주요 기기 및 배관의 가동중검사 강화
고리1호기에 대해 원자로용기 노심대 용접부 검사 주기 단축(10년→5년), 안전 1등급 배관 가동중검사 범위를 확대(25%→50%)
 - ③ 경년열화 관리계획 통합관리방안 수립·이행
고리1호기는 경년열화관리계획 수립, 개정 및 이행 등을 종합적으로 관리하는 경년열화관리계획 통합관리방안을 수립·이행하고, 경년열화관리계획을 통합 관리하는 전담조직 설치·운영
 - ④ 주요 능동기기 성능변수 관리 강화
고리 1·2, 울진 1·2, 영광 1·2, 월성 1~4호기 안전관련 펌프 및 밸브의 성능변수에 대한 경향분석을 수행하고 관리를 강화
 - ⑤ 정량적 피로 관리 강화를 위한 피로 감시시스템 설치
고리 2·3·4, 영광 1·2, 울진 1·2호기와 같은 장기 가동원전에 피로감시시스템을 설치하여 정량적 피로 관리 강화
 - ⑥ 가압기 하부헤드의 피로 건전성 강화
고리 2·3·4, 영광 1·2, 울진 1·2호기에 대해 원자로냉각재 유출입에 따른 가압기 하부헤드 피로 건전성 강화
 - ⑦ 발전정지 유발기기의 신뢰도 증진
전원전에서는 발전정지 유발기기의 신뢰도 증진을 위해 과거 고장사례 및 고장 근본원인 분석결과를 예방정비프로그램에 반영하고, 협력·용역업체의 인적오류 예방 및 정비용역 품질을 확보할 수 있도록 종사자에 대한 교육·훈련 강화
 - ⑧ 운영 인력 적정성 평가
2007년 고리 1·2호기 운영인력 정원 대비 약 15% 감소된 현원에 대하여 조직 변경, 하도급 등을 반영한 직무분석을 수행하여 인력 적정성을 평가하고, 그 결과에 따라 총원 등을 조치
 - ⑨ 소내 전력공급계통 신뢰도 향상
고리1호기는 금번 차단기 손상이 다른 외부전력에서 공급받는 설비에 영향

을 미친 점을 고려하여, 비안전모선 고장이 안전모선에 영향을 미치지 않게 소내전력계통의 신뢰도를 향상시킬 수 있도록 비안전모선과 안전모선을 분리하는 설계개선 검토

⑩ 구매 품질보증 체계 점검 강화

전원전에서는 원자로 정지를 유발할 수 있는 기기에 대해 결함부품의 사용을 방지할 수 있도록 구매시방서 품질요건을 강화하고, 기기 제조사의 설계변경 사항이 피드백 될 수 있도록 기기공급계약서 등에 명시

바. 연구로 · 핵주기시설

1) 현황

하나로는 원자로건물과 주굴뚝이 0.2g로 설계되어 있고 방사선비상계획서가 수립되어, 국내 발생 가능한 지진 및 비상대응에 대비하고 있다.

원전연료가공시설의 방사선비상계획은 사건 유형에 따라 방사선비상 발령기준이 구분되어 작성되어 있다.

2) 점검결과

지진 침수 화재 대비 적절성에 대해, 설계지진(0.2g)을 토대로 하나로의 원자로건물과 주굴뚝(Stack)이 내진설계되어 있으며, 설계지진에 대해서는 건전성을 확보하고 있다. 하나로 원자로건물, 조사재시험시설건물, 조사후시험시설건물, 폐기물처리 시설건물은 정기점검 및 일상점검 등을 통해 적합하게 유지 관리되고 있다. 하나로 원자로수조, 작업수조 및 사용후 핵연료저장조에서 누설이 없는 것을 확인하였다. 지진으로 인한 소화수 공급계통의 기능상실시 화재진압 및 화재 대응체계는 적절함을 확인하였다.

지진 대비 비상계획 및 관련 매뉴얼 적절성에 대해, 자연재해(지진 등) 발생 시 하나로 시설에 대한 백색 비상발령 기준이 수립되어 있고, 비상대응조직을 점검한 결과, 평소 방재조직은 4명이나, 방사선 비상시에 대비하여 200여명을 방재요원으로 지정해 놓고 있으므로 방사선비상에 대비한 비상조직과 비상요원의 편성은 적절하다.

설계기준 초과 대형 집중호우 발생에 효과적으로 대응하기 위해 하나로·핵주기시설에 대해 다음과 같이 3건의 개선사항을 도출하였다.

3) 개선사항

① 구조물의 내진성능 평가 및 주제어실 개선

설계기준 초과 지진에 대해 하나로 원자로건물 및 주굴뚝의 내진성능을 평가하고, 지진 발생시 원자로제어실 운전원 보호를 위해 천정 및 조명시설 낙하방지 조치 및 사무집기 고정

② 하나로 및 부대시설 부지의 침수심 재평가

최근 기후변화에 따른 강우강도 변화를 고려하여 가능 최대강수량을 산정하고 하나의 부지 침수심을 재평가(필요시 설비 개선)

③ 복합적 방사선비상 상황을 반영하여 방사선비상계획서 개정

하나로, 원전연료가공시설에 대해 복합적 방사선비상 상황(다수 시설의 동시다발적 사고, 다양한 방사성물질 방출 등)을 평가하고, 그 결과를 방사선비상계획서에 반영

제3절 유럽연합(EU) Stress Test

본 절에서는 공통사항인 EU Stress Test 수행과정, 점검기준에 대해 설명하고 점검결과에 대해서는 특정 원전의 실제 점검이 어떻게 이루어 졌고 어떤 개선사항이 도출되었는지를 확인하기 위해 계속운전 준비중인 월성1호기와 유사한 가압중수로형(PHWR) 원전인 루마니아 체르나보다 원전의 점검결과에 대해 설명하고자 한다.

1. 루마니아 체르나보다 원전 현황

루마니아는 가압중수로형인 체르나보다 1,2호기(각각 706.5MWe 발전기 출력)를 운영중에 있었다. 1호기는 1996년 12월2일에, 2호기는 2007년 11월1일에 상업운전을 시작했다. 이 두 개호기는 루마니아 총 에너지 생산의 19%까지 담당하고 있었다. 체르나보다 원전은 다뉴브강에 인접해 있으며 이 강으로부터 냉각수를 얻는다.

2. EU Stress Test 수행 과정

일본 후쿠시마 원전사고 발생후 서유럽 원자력규제자협회(WENRA¹⁾)는 Task Force를 구성하여 안전성 평가 범위 및 방법을 수립하기 시작(2011.3.22)하였고 이어 유럽이사회(European Council)²⁾는 모든 유럽원전에 대하여 포괄적이고 투명한 위험도 평가에 근거한 안전성평가(Stress Test Specification)를 수행해야 한다고 선언(2011.3.24~3.25)하였다.

이후 WENRA는 “Stress Test Specifications” 제안서를 유럽 원자력안전규제자 그룹(ENSREG³⁾)에 제출하였다. 이를 근거로 ENSREG와 유럽이사회는 EU Stress Test 수행범위 및 방법에 대하여 합의(2011.5.13)하였다. 그 내용으로 중대사고 관리가 요구되는 다중 안전기능 상실을 유발하는 지진, 침수 등 설계기준 초과 발단사건 및 기타 초기사건을 평가하고 안보 위협에 대한 위험도를 평가하는 『Stress Test는 유럽연합 내 각 국가의 독립적인 권한으로 수행되며, 결과에 대한 유럽연합 국가들의 상호 검토가 이루어지고, 일반 대중에게 공개되는 것을 원칙』으로 한다는 것이다.

이에 따라 각국 사업자는 EU Stress Test를 수행(2011.6.1부터)하고 최종보고서를 해당국 규제기관에 제출(2011.10.31)하였으며, 각국 규제기관은 Stress Test 수행결과를 검토하고 국가보고서를 발행(2011.12.31)하였다. 이후 ENSREG는 주제별 및 국가간 상호 검토를 통해 권고사항 10건과 우수사례 5건이 도출된 최종보고서를 유럽이사회에 제출하여 이행토록 하였다.

이후 국가별 이행계획 제출 및 이행계획에 대한 상호검토를 거쳐 개선대책 이행사항에 대한 보고서를 발행하게 되었다.

3. EU Stress Test Specification(점검기준)

가. Stress Test 정의

1) WENRA : Western European Nuclear Regulators Association

2) (European Council) : EU 회원국 정부 정상들과 유럽위원회(European Commission : EU 27개 회원국별 1인의 위원으로 구성된 독립기구) 위원장의 모임

3) ENSREG : European Nuclear Safety Regulatory Group(27개 유럽연합국 규제기관의 대표자, 유럽위원회 수석대표자, 유럽이사회 위원 등으로 구성)

Stress Test는 극한 자연재해로 발전소 안전기능 상실 및 중대사고에 이르는 사고로 이어진 후쿠시마에서 발생한 사건에 초점을 맞춰 원자력발전소의 안전마진의 재평가로 정의하고 있다. 재평가는 기술적인 범위에서 예상된 극한상황에 직면할 때 발전소의 대응 평가와 심층방호 측면(초기사건, 이어진 안전기능의 상실, 중대사고관리)에서 선정된 예방 및 완화 조치의 검증으로 구성되어 있다.

재평가는 극한상황에 대한 예방조치의 효과와 발전소 대응, 어떤 잠재적 취약점과 벼랑끝(cliff-edge) 효과를 담고 있다. 벼랑끝 효과는 물이 보호 다이크를 넘은후 발전소지역의 심각한 범람의 시작점이나 또는 발전소 정전(SBO)시 배터리 용량의 고갈이 시작되는 지점을 초과하게 될 수 있다. 이러한 평가는 심층방어의 견고성과 발생 사고관리 조치의 적절성을 평가하고 안전성을 개선(절차, 인적자원, 비상대응조직 또는 외부자원의 이용과 같은 기술적 및 조직적 측면)하기 위한 잠재성을 평가하는 것이다. 스트레스 테스트는 설계에서 고려된 사고를 막기위해 설치된 안전계통의 가정된 상실후에 취해질수 있는 조치에 중점을 두게 될 것이다. 이러한 계통들의 적절한 성능이 인허가와 연관되어 재평가 된다. 노심이나 사용후연료 건전성을 보호하고 또는 격납건물 건전성을 보호하기 위해 취해진 모든 조치들이 심층방어의 중요한 일부로서 인식된다.

나. 스트레스테스트 이행 과정과 전파

재평가는 사업자가, 독립적인 검토는 규제기관이 한다. 최종국가보고서는 상호검토과정을 거친다. 사업자 평가를 지원하는 몇가지 연구가 현 설계에 반영되지 않는 시나리오로 인해 이용할 수 없을때 엔지니어링 판단을 이용한다.

1) 상호검토과정

과정의 신뢰성과 책임성을 강화하기 위해 유럽연합 위원회는 국가 보고서에 대해 상호검토과정을 거치도록 요구했다. 국가보고서의 주목적은 합의된 방법론을 이용한 사업자 평가로 부터 결론을 이끌어 낼 것이다.

팀은 7명으로구성되며 그중 한명은 위원장이고 다른 한명은 보고자이다. 각 팀의 두명은 전반적인 일관성 보장을 위한 영구멤버이다. 위원회(commission)는 팀의 일원이 될 것이다. 해당국가의 보고서 검토시 해당국 멤버는 검토에서 제외된다.

방법론에 있어서는 동료평가의 엄격성 및 객관성 보장을 위해 국가 규제자는 모든 필요정보에 대한 접근권을 제한된 기간 부여한다.

최종국가보고서가 이용가능하게 될 때 즉시 검토를 시작한다. 상호점검은 2012년4월말까지 완료되어야 한다.

2) 투명성

국가 규제당국은 개방과 투명성원칙을 따라야 한다. 보고서들은 국내법과 국제법에 따라 보안에 저촉되지 않는 한도내에서 대중에게 제공되어야한다. 검토자는 각각의 국가보고서의 결론과 합의된 방법론 준수 여부를 검토할 것이다. 검토결과들은 비원자력분야, 비정부기구 등 이해관계자들을 초청하는 국가 및 유럽 공개 세미나 등 다에서 토의되어야 한다. 투명성 뿐만 아니라 대중참여 기회 또한 EU Stress Test가 유럽 시민들에 의해 인식되도록 하는데 기여할 것이다.

다. 스트레스 테스트의 기술적 범위

스트레스 테스트의 기술적 범위는 초기사건과 실패의 조합을 포함하여 후쿠시마 사고와 관련된 문제들을 고려하여 정의되었으며, 다음 문제들에 중점을 두고 있다.

1) 초기사건(지진, 홍수)

2) 발전소에서 발생하는 초기사건으로 부터 안전기능 상실의 결과 소내정전(SBO)를 포함한 전력상실, 최종열제거원(UHS) 상실, 둘의 조합

3) 중대사고관리 문제

노심냉각기능 상실을 막고 관리하기 위한 수단들, 사용후 연료저장조에서 냉각기능의 상실을 막고 관리하기 위한 수단들, 격납건물 건전성 상실을 막고 관리하기 위한 수단들

2)와 3)은 후쿠시마와 같은 쓰나미와 지진에 국한되지 않고 홍수와 나쁜 날씨조건을 포함한다. 게다가 안전기능 상실의 재평가는 AC 전력분배시스템 또는 산림화재, 비행기충돌영향에 의한 간접적인 초기사고와 관련 있다.

중대사고관리 문제 검토는 사업자 규정에 초점을 두지만 또한 발전소 안전기능 유지를 위해 계획된 관련된 소외(off-site) 지원을 포함 할 수도 있다. 비록 후쿠시마 사고 경험 피드백이 대중보호를 위한 관련된 소외 서비스에 의해

관리된 비상대응조치를 포함할 수도 있다 할지라도 이러한 주제는 스트레스 테스트의 범위밖에 있다.

라. 일반측면

여기에서는 사업자로부터 요구된 일반정보, 각각 고려된 극한상황에 대한 사업자에 의해 고려된 문제들이 설정되어있다.

1) 보고서 형식

사업자는 하나의 부지에 다수호기가 있다할 지라도 각 부지당 하나의 서류를 제출해야한다.

모든 발전소들이 확실히 정지되었거나 사용후 연료저장조가 아직까지 운전 중인 부지들은 다음 사항들이 고려되어야 한다.

첫번째 부분에서, 부지특성(바다나 강과 같은 위치, 호기수, 면허소지자)들이 간단히 설명되어야 한다. 특히 각 호기의 주요특성(원자로 형태, 열출력, 초임계일, 사용후연료저장조의 존재 또는 공유된 저장조)들이 반영되어야 한다. 호기사이의 중요한 안전성 차이점을 강조해야 한다. 확률론적안전성평가 범위와 주요 결과들이 제공되어야 한다.

두번째 부분에서, 각각의 극한 상황은 아래 주어진 내용에 따라 평가되어야 한다.

2) 가설

기존 발전소에 대해서 재평가는 2011.6.30 현재 건설되어 운전중인 발전소를 참조해야 한다. 건설중인 발전소에 대해서 재평가는 허가된 설계를 참고해야 한다. 극한시나리오를 분석할때 보호조치들이 순차적으로 상실된 것으로 가정된 진보적 접근법을 따르는 결정론적 접근법이어야 한다.

발전소 상태들은 운전제한조건과 같은 허용된 기술적인 특성의 가장 바람직하지 않는 상태를 제시해야 한다. 모든 운전상태가 고려되어야 한다. 7개의 사고시나리오들에 대해 분류되지 않는 장비뿐 아니라 현실적인 평가의 고려는 가능하다.

모든 원자로 및 사용후연료저장조는 동시에 영향을 받는 것으로 가정해야 한다. 부지 주변지역의 줄지 못한 상황의 가능성이 고려되어야 한다. 자동조치, 비상운전 절차서에 명시된 운전원 조치사항, 사고의 예방, 회복 및 완화의 어떤 다른 계획된 조치들을 고려해야 한다.

3) 포함되어야 하는 정보

다음 3가지의 주요사항이 보고되어야 한다.

첫째, 발전소 설계기준에 반영된 규정과 설계요건에 대한 적합성이 평가되어야 한다.

둘째, 설계기준 초과사고에 대한 발전소의 견고성, 이러한 목적으로 안전관련계통, 구조물 및 기기의 견고성(이용가능한 설계 여유, 다양성, 다중성, 구조적 보호, 물리적 격리 등)과 심층방호 개념의 효율성이 평가되어야 한다. 설치 및 조치의 견고성에 관해서는 이어진 사건(벼랑끝 효과⁴⁾)의 단계적 변화를 확인하는데 검토 초점이 있다. 만약 필요하다면 이러한 상황을 피하기 위한 조치의 고려에 초점을 둔다.

셋째, 다른 방어수준과의 독립성을 강화하거나 기기의 저항성을 개선하는 관점에서 고려된 심층방어 수준을 개선하기 위한 수정 가능성

뿐만아니라 사업자는 스트레스 테스트를 위한 내용을 제공하기 위하여 스트레스 테스트에서 예상된 극한 시나리오를 피하려는 보호조치를 설명할 수 있다. 분석이 필요한 경우 발전소 현장점검 결과에 의해 보완되어야 한다. 이러한 목적을 위해 사업자는 다음 사항을 확인해야 한다.

첫째, 초기사건과 발전소 허가를 위한 안전 입증에 이롭지 못한 어떤 수단들로 인해 발생 가능한 손상을 고려하여 3개의 기본안전기능(반응도관리, 연료냉각, 방사능 차폐)과 지원기능(전력공급, 최종열제거원을 통한 냉각) 유지하기 위한 수단들

둘째, 이동용 외부수단의 가능성과 그들의 이용 조건들

셋째, 하나의 원자로로부터 또 다른 원자로를 지원하기 위한 수단을 이용하기 위한 어떤 기존 절차, 같은 부지에 있는 다른 원자로의 기능에 대해 하나의 원자로의 의존관계

중대사고관리로서 사업자는 다음의 관계를 확인해야 한다.

첫째, 연료손상이 피할수 없게 되기 전 시간. PWR과 BWR에 대해, 만약 노심이 원자로용기 속에 있다면 냉각수가 노심의 상부에 이르기 전 시간과 연료손상전 시간(수소 생성과 함께 급속한 피복재 산화),

4) : 발전소 정전(station black out)시 배터리 용량의 고갈

둘째, 만약 연료가 사용후연료 저장조에 있다면 저장조가 끓기 전시간, 방사선 차폐가 적절하게 유지될때까지의 시간, 냉각수가 연료집합체 상부에 이르기 전 시간, 연료손상이 시작되기 전 시간

4) 지원문서

사업자에 의해 참고된 문서들은 허가과정에서 검증되고, 허가과정에서 검증되지 않았지만 사업자 품질보증 프로그램을 통해 검증되거나 이 둘중의 하나가 아닌 특성이 있다.

마. 지진

1) 설계기준

가) 발전소 설계기준 지진

- ① 최고 지반 가속도로 표현된 설계기준 지진(DBE) 수준. 만약 다르다면 원래 허가기준을 고려한 DBE를 표현한다.
- ② DBE 평가 방법론(재발기간, 선택의 이유와 고려된 과거사건, 추가된 여유도...)
- ③ 설계기준의 적절성에 대한 결론

나) DBE에 대한 발전소 보호 수단

- ① 안전정지 상태에 이르게 하는 데 필요하고 지진후 이용가능하게 남아 있는 것으로 여겨지는 주요 구조물, 계통 및 기기들(SSCs)의 확인
- ② 지진후 원자로 노심 또는 사용후 연료 손상을 막기위한 주 운전규정들 (비상운전절차, 이용장비 등을 포함)
- ③ 다음 사항을 포함하여 고려된 지진의 간접효과
 - ㉠ DBE를 견디도록 설계되지 않고, SSCs의 건전성 상실에서 가용 필요가 있는 SSCs의 결과적 손상(예를 들면, 홍수의 근원과 그들의 잠재적 결과로서 건물 또는 부지의 비내진 배관의 누설 또는 파열)을 발생할 수 있는 SSCs의 상실
 - ㉡ 외부전원 공급 상실
 - ㉢ 부지에 직원 및 장비의 접근 지연 또는 방지하는 것을 포함한 발전소 외부 상황

다) 발전소의 현재 허가기준 준수

- ① 허가 기준 준수를 보증하기 위한 사업자의 일반적인 과정(예를들면, 주기적 유지보수, 점검, 시험)
- ② 비상절차서에 고려된 소외 이동용 장비/용품들이 이용가능 하거나 임무를 위해 적합한 상태로 있는 것을 보증하기 위한 사업자 과정
- ③ 어떤 알려진 편차와 안전측면에서 이들편차의 결과들; 개선조치 계획들
- ④ 후쿠시마 원전사고 이후 사업자에 의해 이미 시작된 특별 점검

2) 여유도 평가

가) 지진 PSA, 지진 여유도 평가 또는 공학적 판단을 지원하기 위한 다른 지진 엔지니어링 연구를 포함할 수 있는 이용 가능한 정보를 기반으로, 기본적인 안전기능 상실 또는 심각한 연료(원자로 또는 연료 저장조 내에서)손상이 피할 수 없게 되는 그 이상의 지진 심각도 평가

- ① 취약지점을 표시하고 어떤 베타값 효과를 설명
- ② 어떤 규정들이 베타값 효과를 예방하고 발전소의 견고성(하드웨어 변경, 절차서의 개정, 조직의 규정들...)을 증가시키기 위한 것인지를 표시

나) 지진 PSA, 지진 여유도 평가 또는 공학적 판단을 지원하기 위한 다른 지진 엔지니어링 연구를 포함할 수 있는 이용 가능한 정보를 기반으로, 발전소가 밀폐 건전성 상실 없이 견딜 수 있는 지진 심각도가 어떤지 평가

다) DBE 초과 지진과 DBF 초과 홍수

- ① 발전소 위치 및 설계를 고려하여 이러한 상황은 물리적으로 가능성이 있을 수 있다는 것을 보여준다. 특히 발전소 내부 또는 외부에 있는 구조물(댐들, 다이크, 발전소 건물 및 구조물과 같은)의 심각한 손상이 발전소 안전에 영향이 있을 수 있는지를 확인하는 것이다.
- ② 불안정한 발전소 조건을 만드는 취약지점과 상실 모드들이 있고 베타값 효과를 설명하는 것을 표시. 영향을 받게될 건물과 기기 확인
- ③ 어떤 규정이 이들 베타값 효과를 예방하고 발전소의 견고성(하드웨어 변경, 절차서의 개정, 조직의 규정들...)을 증가시킬 수 있을 것인지 표시

바. 홍수

1) 설계기준

가) 현 발전소 설계에 대한 홍수

- ① 설계기준 홍수(DBF) 수준과 선택의 이유. 또한 만약 차이가 있다면 원래 허가기준에서 고려된 DBF를 설명
- ② DBF평가 방법론(반복 주기, 고려된 과거 사건과 선택이유, 추가된 여유도..). 홍수의 원천(쓰나미, 조수, 폭풍 해일, 댐 붕괴..), 시간 데이터의 유효성
- ③ 설계기준의 적절성에 대한 결론

나) DBF에 대한 발전소 보호설비

- ① 냉각수 취수 기능 유지 설비와 비상전원 공급 설비를 포함하여 안전정지에 필요하고 홍수 후 이용 가능할 것으로 여겨지는 주요 SSCs의 확인
- ② 홍수로 부터 부지를 보호하기 위한 주요 설계반영 설비(플랫폼 레벨, 제방)와 관련된 검사 프로그램의 확인
- ③ 경보 후 홍수의 영향을 완화하는 주요 운전설비(비상운전 절차, 이동용 장비, 홍수감시, 경보계통....)와 관련된 검사 프로그램
- ④ 외부전원 상실과 부지내 인원과 장비 접근을 막거나 지연시키는 것을 포함하여 발전소 밖의 상황을 포함하여 고려된 홍수(매우 나쁜 날씨 상태)로 인한 현상 또는 홍수로 인한 다른 영향

다) 현 허가기준 준수

- ① 사업자가 준수하기 위한 일반적인 과정(예, 주기적 유지보수, 점검, 시험...)
- ② 비상절차서에서 고려된 소외 이동용 장비/물자들이 이용가능하고 사용 가능 상태로 있다는 것을 보장하기 위한 사업자 과정
- ③ 어떤 알려진 편차와 안전측면에서 이들 편차의 결과; 시정조치 계획
- ④ 후쿠시마 사고 이후 사업자에 의해 이미 시작된 특별 이행점검

2) 여유도 평가

가) 공학적 판단을 지원하기 위한 엔지니어링 연구를 포함한 이용가능정보를 기반으로 연료(노심 또는 연료저장)의 심각한 손상 없이 견딜 수 있는 홍수 수준은 어느정도 인지?

- ① 경보와 홍수사이의 시간에 대한 의존, 추가적인 보호조치들이 예견되

고 이행될 수 있는지를 나타냄

- ② 취약지점을 표시하고 어떤 베틀끝 효과를 설명, 어느 건물과 장비가 먼저 물에 잠기는지 확인
- ③ 만약 어떤 설비가 이러한 베틀끝 효과를 예방하고 발전소의 견고성(하드웨어 변경, 절차서 개정, 조직규정...)을 증가시키는지 설명

사. 전력상실 및 최종열제거원 상실

AC 전원은 소외전원, 발전기, 백업 발전기(디젤, 가스터빈), 다른 다양한 백업 전원들이 있다. 이들 전원의 잇따른 상실은 아래 내용 1)와 2)에 고려되어야 한다.

최종열제거원(UHS)은 원자로로 부터 잔열이 전달되도록 하는 매개체이다. 어떤 경우에, 발전소는 예를들어 호수, 지하수면 또는 대기과 같은 대체 UHS에 의해 공급된 바다나 강과 같은 주된 UHS를 가지고 있다. 이들 제거원의 연속적인 상실은 아래 3)에서 고려되어야 한다.

1) 소외전원상실(LOOP5)

- ① 이러한 상황이 설계에서 어떻게 고려되어 있는지 설명하고, 어떠한 내부 백업전원이 이러한 상황에 대응하기 위해 설계되었는지 설명
- ② 어떠한 외부지원 없이 소내전원이 얼마나 오래 운영될 수 있는지를 설명
- ③ 어느 설비가 소내전원 공급시간을 지연(디젤발전기의 급유...)시키기 위해 필요한지를 설명
- ④ 발전소의 견고성을 증대시키기 위해 예상된 수단(하드웨어 변경, 절차서 개정, 조직규정...) 설명해야 한다. 명확하게 하기위해, 증기구동펌프와 같은 시스템인 가스탱크 등에 저장된 에너지를 가진 시스템은 예상된 전력상실과 무관하게 그리고 초기사건(예, 지진)에 견디도록 설계에 고려해야 한다.

2) 소외전원 상실과 소내 백업전원(SB0)상실의 두가지 상황은 다음의 조건이 고려되어야 한다

-
- 5) 모든 소외전원이 상실된다. 소외전원이 몇일 동안 상실된 것으로 가정되어야 한다. 부지는 도로, 철도 또는 수로에 의해 72시간동안 중량물의 공급으로부터 고립된다. 휴대용 전등은 최초 24시간후 다른 지역으로부터 부지에 도착할 수 있다.

- ① 소외전원 상실 + 일반 백업전원의 상실
- ② 소외전원 상실 + 일반 백업전원 상실 + 다른 다양성 백업전원 상실

이러한 상황의 각각에 대해

- ㉠ 배터리 용량과 지속시간에 대한 정보 제공
- ㉡ 이들 상황을 위한 설계규정에 대한 정보 제공
- ㉢ 부지가 피할수 없는 심각한 연료 손상 전에 어떠한 외부지원 없이 얼마나 오래 SBO를 견딜수 있는지 설명
- ㉣ 어떠한 조치(외부)가 연료 손상을 예방할 수 있을 것인지 설명

이미 장비는 소내에 비치(예, 또 다른 원자로로 부터 장비), 같은 부지에 있는 모든 원자로가 동일하게 손상되고 이용 가능한 소외 장비가 있다고 가정, 전용선의 직접 연결로 전력을 제공할 수 있는 인근 발전소(예, 수력, 가스터빈), 상기 각각의 시스템 운전에는 필요한 시간, 특별한 연결을 위해 유능한 인적자원의 이용가능성 베틀효과와 언제 그 베틀효과가 발생하는지 확인해야한다.

- ③ 어떠한 설비가 이들 베틀효과를 막을 수 있는지 또는 발전소의 견고성을 증가(하드웨어 변경, 절차서 개정, 조직규정...)시킬 수 있을 것인지 설명

3) 일차 최종열제거원(UHS⁶⁾)

- ① UHS의 상실을 막기 위한 설계규정(예, 다른 위치에서 일차 UHS를 위한 다양한 취수, 대체 UHS 이용...)의 설명 제공하고 다음 두가지 상황을 고려해야 한다.

- ㉠ 일차 UHS 상실, 즉 강이나 바다로부터 취수
- ㉡ 일차 UHS 상실과 대체 UHS

이들 상황의 각각에 대하여 :

- ㉠ 부지가 연료손상 전 어떠한 외부 지원 없이 얼마나 오래 이러한 상황을 견딜 수 있는지 설명하고 이들 상황을 위한 설계규정에 대한 정보를 제공
- ㉡ 어떠한 외부조치가 연료 손상을 막을 것인지 설명

이미 장비는 소내에 비치(예, 또 다른 원자로로 부터 장비), 같은 부

6) 안전 및 비안전 기능을 위한 일차 열제거원이 상실된다. 부지는 도로, 철도 또는 수로에 의해 72시간동안 중량물의 공급으로부터 고립된다. 휴대용 전등은 최초 24시간후 다른 지역으로부터 부지에 도착할 수 있다.

지에 있는 모든 원자로가 동일하게 손상되고 이용 가능한 소외 장비가 있다고 가정, 이들 계통 운전에 필요한 시간, 유능한 인적자원의 가용성, 베타열 효과와 언제 그 베타열 효과가 발생하는지 확인

㉔ 어떤 설비가 이들 베타열 효과를 막을 수 있는지 또는 발전소의 견고성을 증가(하드웨어 변경, 절차서 개정, 조직규정...)시킬 수 있을 것인지 설명

4) SBO와 함께 일차 UHS 상실

부지가 심각한 연료손상 전 어떠한 외부 지원 없이 “주” UHS+SBO의 상실을 얼마나 오래 견딜 수 있는지 설명

① 어떠한 외부 조치가 연료 손상을 막을 것인지 설명

이미 장비는 소내에 비치(예, 또 다른 원자로로 부터 장비), 같은 부지에 있는 모든 원자로가 동일하게 손상되고 이용 가능한 소외 장비가 있다고 가정, 이들 계통 운전에 필요한 시간, 인적자원의 가용성, 베타열 효과가 언제 발생하는지 확인,

② 어떤 설비가 이들 베타열 효과를 막을 수 있는지 또는 발전소의 견고성을 증가(하드웨어 변경, 절차서 개정, 조직규정...)시킬 수 있을 것인지 설명

아. 중대사고관리

이 장은 대부분 완화 문제를 다룬다. 비록 사고확률이 매우 낮을지라도 격납건물 건전성을 위협할 수 있는 하중으로부터 격납건물을 보호하기 위한 수단이 평가되어야 한다. 운전원을 위한 심층방어의 마지막 라인을 형성하는 것으로 중대사고관리는 노심손상을 막기 위해 사용된 조치들과 발전소의 전체적인 안전한 접근과 일치해야 한다.

1) 노심 냉각기능의 상실 시나리오의 여러 단계에서 현재 처해있는 사고관리 조치를 설명해야한다. 원자로 압력용기/다수의 압력튜브에서 연료 손상 발생 전 연료 손상을 막기 위한 최후 수단과 높은 압력에서 연료 손상 가능성의 제거에 대해 설명해야 한다.

2) 손상 발생후 격납건물 기능 건전성을 보호하기 위한 사고관리 조치 및 발전소 설계 특성을 설명

① 배기과정을 고려하여 수소 폭연 또는 수소 폭발 방지(불활성 기체 치환,

- 재결합기 또는 정화기)
- ② 격납건물 과압방지 ; 격납건물의 보호를 위해 만약 환경으로의 방출이 필요하다면 이러한 방출이 여과가 필요한지 평가되어야 한다. 이러한 경우에 환경으로 방출된 방사성물질의 양을 평가하기 위한 수단의 가용성이 설명되어야 한다.
 - ③ 재임계 예방
 - ④ 바닥판 용융 예방
 - ⑤ 격납건물 건전성을 보호하기 위해 사용된 기기를 위한 AC와 DC전원과 압축공기의 공급과 필요성
- 3) 격납건물 건전성 상실의 결과를 완화하기 위한 현재 상황에서 사고관리조치 설명
- 4) 연료저장조 냉각기능 상실 시나리오의 여러 단계에서 사고관리 조치사항 설명(다음사항은 연료 수조와 관련됨)
- ① 적절한 방사선 차단 상실 전, 후
 - ② 연료저장조에서 연료 상부 노출 발생 전, 후
 - ③ 연료 저장조에서 연료손상 발생(수소발생과 함께 빠른 피복재 산화) 전, 후
- 상기 1), 2), 3), 4) 각 단계에서
- ① 발생전에 베타끝 효과를 확인하고 시간을 평가
 - ② 중대사고에 대처하기 위한 절차 안내를 포함하여 기존 관리조치의 적절성 평가와 추가 조치의 잠재성을 평가. 특히 사업자는 요구된 계측기의 적합성 및 가용성, 발전소 중요지역의 거주성 및 접근성(중앙제어실, 비상대응 설비, 현장제어 및 샘플링 지점, 보수 가능성), 격납건물보다 다른 건물에서 잠재적 수소 축적을 고려해야 한다.
- 다음과 같은 측면이 설명되어야 한다.
- ① 상황을 관리하기 위한 사업자 조직 : 직원, 인적자원 및 교대관리, 사고 및 보호 관리를 위한 소외 기술지원의 이용(만약 이용불가능시 긴급 대책), 절차서, 교육 및 훈련
 - ② 기존 장비 사용 가능성
 - ③ 이동장치를 사용하기 위한 규정(이러한 장치의 가용성, 부지내로 장치를 가져와 운전 상태로 놓기 위한 시간, 부지 접근성)

- ④ 보급품(디젤발전기 연료, 물...)
- ⑤ 방사능 방출관리, 그들을 제한하기 위한 규정 ; 작업자 선량관리, 그들을 제한하기 위한 규정
- ⑥ 통신 및 정보시스템(내부, 외부), 장기 사고후 활동

예상 사고관리 조치는 부지에 발생할 상황을 고려하여 평가되어야 한다.

- ① 통신을 포함하여 발전소 주변 기반시설의 광범위한 파괴
- ② 시설(외부로부터 기술 및 인력지원을 더 어렵게 하는 것)
- ③ 업무수행의 장애(주 및 보조제어실 그리고 발전소 비상/위기센터의 접근성 및 거주성에 대한 영향을 포함)
- ④ 부지내 일부 시설들의 오염 및 파괴
- ⑤ 외부 위험(지진, 홍수) 상태에서 사고관리조치의 효율성 및 타당성
- ⑥ 전력 공급의 이용불능
- ⑦ 계측기의 잠재적 상실
- ⑧ 부지내 다른 인접 발전소로부터 잠재적 영향

사업자는 직원들이 주제어실 또는 보조제어실 뿐만아니라 발전소 비상/위기센터에서 업무 수행을 방해하는 것이 무엇이고, 이러한 상황이 발생하는 것을 피할 수 있는 조치들이 무엇인지를 확인해야 한다.

4. 루마니아 체르나보다 원전 Stress Test 국가보고서

가. 지진

1) 설계기준

가) 발전소 설계기준 지진

역사적으로 관측된 최대지진은 규모 $M=7.5$ (리히터 규모)이었으며 최대로 가능한 추정규모는 $M=7.8$ 이며 원전 양반 표면에서 최대 지반 가속도는 $0.11g$ 이다. 최대 추정 규모인 7.8 에 대해 원전양반 표면에서 최대 지반 가속도는 $0.18g$ 이다. 따라서 설계기준 지진인 $0.2g$ 의 최대 지반 가속도 값과 비교시 상기 결과는 설계기준이 적합함을 확인해 준다.

나) 설계기준 지진 방호 수단

지진후에도 SSC가 사용될 수 있음을 확인하기 위한 성공 경로가 규정되어

있고 DBE에 검증된 계통들을 포함하고 있다. 즉 2개의 정지계통과 보조급수 계통 및 정지냉각계통 등 원자로 냉각재계통과 증기발생기가 있으며 DBE 이후 능동적 열제거원들을 사용할 수 없을 때 원자로 냉각은 열제거원으로서 증기발생기의 열전달 루프에서 열 사이폰 현상에 의해 이루어진다. 이외에 DBE후 방사성물질 유출 제어를 위한 격납용기 격리, 주제어실 거주 어려움에 대비한 2차 제어구역(SCA)이 있고 이곳에서 비상운전절차서들을 사용 가능하다.

사용후 연료저장조는 DBE후 정상 냉각불능 대비 비상운전 절차서에 사용후 연료 저장조 물보충을 대체수원(소화전)으로 설정해 놓고있다. 만일 발전소 소화수 사용불가시 소방차와 이동식 펌프로 저장조에 물을 공급한다. 저장조 물이 끓기 시작하는데 약 3일, 껍찬 저장조에 아무조치도 취하지 않을시 핵 연료다발들의 첫째 열이 물 밖으로 노출되는데 15일이 걸릴 것이다. 이에 대비하여 사용후 연료 표면이 바짝 말라 손상되는 시나리오가 필요하다.

지진의 간접적 효과에 대처한 방호

- ① DBE 이후 안전한 정지경로를 보장하는 SSCs의 운전은 외부전력 공급에 의존하지 않는다.
- ② 설계단계의 화재위험도 분석은 최근 확률론적화재안전성평가에 의해 재평가 되어 화재방호 설계대책이 효과적임을 확인하였다.
- ③ 필수구역 관련 방화벽 보존에 관한 설계 견고성 및 재질상태 양호여부를 확인하였고, 필수구역 화재진압 전략 및 완화조치가 확인되었다. 내진검증된 기기 부근 이동형 소화기 사용이 효율적이었고 화재시 언제든지 사용 가능, 가연성 물질이 매우 제한적이고 방화벽 또한 적절함을 확인하였다. 따라서 중대화재는 발생되지 않을 것으로 예상된다.
현장실사를 통해 일부 열화된 방화벽 교정계획 및 방화계획, 수동소화기 위치 지정작업 이행되었다.
- ④ 지진유발 홍수 또는 홍수와 지진 동시발생 사건에 대해 2차제어구역(SC (원자로정지, 격납용기 격리, 원자로 냉각 및 극히 중요한 안전운전변수의 감시 기능)은 내진1등급 PSA에 의한 결정론적 위험도 분석에 따르면 영향이 없다.
- ⑤ 극심한 기상조건, 자연재해(지진, 홍수 등) 또는 교통제한에 대비 비상

대응 관련 기관과 통신규약을 체결하여 비상시 필요한 지원수단(직원 수송, 연료공급 등)을 확보하고 있다.

다) 발전소의 현재 인허가 기준 준수

인허가 사항 준수 및 SSC가 수명기간 내진검증요건 충족의 증거 제시를 위해 프로그램이 마련되어 있다. 수명기간 전력생산, 문서화, 해당 증거 유지등을 통해 SSCs가 안전기능을 수행할 수 있으며, 수명기간 발전소 경년열화, 개조, 수리, 교체 및 이상상태가 고려되어 그에 대한 영향평가, 문서화 등이 수행되었다.

인허가 기준 이행 외에 주기적안전성평가(PSR) 시행, 이를 통해 기기 정비를 다루는 활동과 절차서들이 국제적 우수 실행 사례와 일치함을 보여주었다.

지진발생 후 사용될 이동형 기기와 자재들이 내진검증된 장소에 저장되고 또한 이들이 발전소 감시 및 시험프로그램에 의해 극히 중요한 기기로 다루어진다는 점이 언급되어야 한다.

2) 안전 여유도 평가-내진여유도 평가

발전소 설계지진등급과 DBE평가 방법론이 국제표준을 따름으로 적합한 것으로 확인되었고, 데이터의 적시적 유효성과 설계기준의 적합성은 2005년도에 확률론적위험도분석으로 확인되었으며, 2011년 8월에 개정되었고 루마니아 국립지구물리학연구소에 의해 별도로 확인되었다.

지진의 상호작용 측면에서 원설계에 부합한지를 확인하기 위해 확률론적지진 위험도분석(PSHA⁷⁾)을 수행하였고 이의 취약도 분석은 2011년 발전소 설계자와 운영자의 현장실사에 의해 확인 및 보완되었다.

검토등급 지진은(Review Level Earthquake, RLE) 부지 지진활동도와 발전소 특정 설계특성에 근거하여 합리적으로 높은 등급의 지진 지반운동에서 설정되었고, 선정된 RLE는 지반가속도가 0.33g인 지반운동응답스펙트럼으로 나타나며 재현주기가 10,000년 미만이다.

지진유발 발전소 정전에 대처키 위해 완전한 안전정지 기기 목록이 편찬되었다.

벼랑끝 효과⁸⁾ 가능성이 있는 효과 3가지가 있는 것을 확인하고 분석을 수행하였다. 즉 증기발생기 수직기동 지지대, 개구부가 있는 수직 고압비상노심냉

7) PSHA : Probabilistic Seismic Hazard Analysis

8) 구조물이 아무 경고없이 갑작스럽게 붕괴되는 것

각수 탱크의 스커트 지지대, 그리고 살수 플랫폼의 행거 연결봉은 최고지반가속도 0.4g까지 버郎 끝 효과가 발생하지 않음을 확인하였다.

내진여유도 평가결과 지진발생 이후 안전정지 경로의 일부가 되는 SSCs들은 0.4g까지 안전기능 수행이 가능하다.

가) 심각한 핵연료 손상 및 격납건물 건전성 상실 유발 지진범위

발전소 내진 성능은 0.4g까지 평가한 결과 안전기능 유지가 가능하다.

나) 설계기준 초과 지진 및 홍수 발생

DBE 초과 지진에 의해 유발되는 홍수 가능성은 댐이나 기타 수력학적 또는 토목적 구조물이 붕괴되는 고장과 지진으로 인한 흑해의 쓰나미 발생 가능성 등의 고장 메카니즘 분석 결과 가능성은 없다. 지진 발생후 필수 안전기능을 수행하도록 인증된 기기에 대한 어떤 위험을 주지 않는다는 결론을 내렸다.

다) 지진대처 발전소 견고성 향상을 위해 예상될 수 있는 대책

지진관련 현장실사 및 내진 견고성 분석결과 안전상 중요한 설계변경 필요성이 없음을 확인하였다.

나. 홍수

1) 설계기준

가) 원전 설계기준 홍수

체르나보다 원전 지형 측정결과 설계기준 홍수위는 +14.13mBSL, 발전소 부지 높이는 +16mBSL, 건물의 바닥 기준 높이 +16.24mBSL로 확인되었고 충분한 여유(2.11m)가 설계기준 홍수위와 건물 바닥 기준 높이 사이에 존재한다.

기초부지 또는 그 이상에서 증가되는 유량과 수위를 기초한 부지내 극심한 호우를 모의 실험 결과 +16mBSL 발전소 부지 높이에 도달하기 위해 요구되는 다뉴브 강물의 유량은 비현실적이므로 설계홍수 수위의 예상값을 뒷받침한다.

부지주변 집수조 지역의 극심한 호우로 인한 홍수와 설계기준 홍수위와의 조합은 골짜기 상부 수위가 17.5mBSL이 되는 것으로 평가되어 최대 제방높이 18mBSL 이므로 발전소를 보호할 만큼 높아 계산된 최대수위와 제방 상부사이에 0.5m 여유가 있다.

제방 붕괴와 같은 최악의 시나리오에서도 설계기준 수위 +14.13mBSL와 최

대유량 458 m^3/s 의 집수조 지역 극심한 호우인 경우 등급 IV와 등급 III 전원의 안전관련계통을 손상시킬 수도 있지만 1,2호기의 비상운전절차서에 따라 비상 대응을 하는 한 발전소 운전에 대한 위협은 없다. 최악의 시나리오에서 필수 안전기능(비상급수/증기발생기 보충수와 제2제어실/비상전원계통)을 수행하기 위한 건물 내 계통, 구조물, 기기(SSC)는 침수영향을 받지 않는다.

루마니아 국가표준에 의해 계산된 설계 최대 강우율은 97.2 $\text{l}/\text{m}^2/\text{hr}$ 이고, 기록된 부지 최대 시간당 강우는 2010년7월의 47.3 $\text{l}/\text{m}^2/\text{hr}$ 로 배수계통의 설계치는 최대기록 강우율 이상의 충분한 여유를 가진다.

배수용량을 초과하는 강수율의 경우에 지표면의 빗물은 배수통로나 다뉴브 강-흑해 운하를 넘쳐 흐르게 된다. 이 시나리오에 대한 계산은 빗물은 부지 내 접근 통로에 집결되고 최대 평균 수위는 설계 최대 강우율 10배보다 많아도 20cm 이하이다. 건물 최소 바닥층 높이는 기초부지 높이보다 24cm 높기 때문에 부지내 건물의 침수는 일어나지 않는다.

현재 여유도는 적합한 것으로 여겨지며 외부 홍수에 대한 발전소 추가 보호조치는 요구되지 않는다.

나) 설계기준 홍수 방호수단

안전정지를 위한 SSC는 외부 홍수에도 안전기능 유지될 것이다. 부지는 상부댐 붕괴와 같은 극한 조건에서도 견딜수 있도록 설계되었으며 상부에 두 개의 댐 건설을 기준으로 설계되었으나 댐은 건설되지 않았다. 발전소 부지 높이가 계산된 최대 홍수 수위보다 여유가 있어 홍수 방지 방안이 요구되지 않는다. 도로와 발전소 부지는 최대 호우시 개방된 배수 수집 수로와 배수관로를 통해 배수할 수 있도록 설계되었다.

전원케이블은 강우에 의한 홍수에 노출되지만 절연처리가 되어 침수에 견디도록 되어있다.

발전소 홍수 충격을 방지하기 위해 수로 구조물을 육안감시 및 주기적 정비 활동을 수행하고, 잠재적 외부 홍수사고에 대비한 예방수단으로 국가 기상예보 및 경보체계가 있어 원전 운전과 관련되지 않지만 설계홍수에 비하여 조기 경보를 제공하는 홍수 경보체계를 갖고 있으며, 내·외부 홍수로 야기된 진입조건을 커버할 수 있는 비정상운전절차서가 있어 별도 절차개발은 불필요하다.

아울러 자동관측소, 중앙기상청(지방 기상청으로부터 데이터 받음) 및 수문 관리국으로부터 최신 기장자료를 받도록 기상관측 설비가 있다.

외부 최악의 사고시 인력 및 장비 접근성 보장을 위해 사회기반시설은 발전소와 지방 행정당국 사이에 체결된 협정서에 따르도록 되어 있다.

다) 현재 인허가 기준 준수

외부 홍수에 대한 설계와 운전 영역에 관한 현존 감시프로그램으로 홍수 재해 관점으로부터 충격을 포함해서 안전 및 설계 허가 기준에 영향을 미치는 모든 활동이 검토되고 평가되고 필요한 조치가 행하여지며 연관이 있는 모든 서류는 최신본으로 사용되는 것을 보장하고 있다. 발전소는 가능한 홍수 재해를 극복하기 위해 적용되는 효과적인 절차서 뿐만 아니라 원자력 규제코드 및 기준의 요구사항을 반영하여 부지 선정 및 설계, 건설, 운영되고 있으며 현 스트레스 테스트 보고서의 독립검토로 재확인되었다.

이동형 장비와 공급자재는 홍수 위협을 받지 않는 장소에 저장된다.

내부 홍수에 의한 확률론적안전성평가 결과 노심손상빈도는 3%로서 기여도가 낮아 언급이 안되었다.

2) 안전여유도 평가

발전소는 외부 홍수에 대해 어떠한 안전기능의 사용 없이도 신뢰할만하다. 이는 아래 사항에 의해 알 수 있다.

첫째, 부지 높이는 +16mBSL로 설계되고 가장 낮은 건물의 바닥 높이는 +16.24mBSL로 설계되었으며, 다뉴브강 최대 설계 홍수위 +14.13mBSL과 비교시 2.11m의 여유가 있다.(설계홍수 수위 재현 기간은 100,000년에 한번 미만)

둘째, 발전소 주변의 빗물이 고이는 지역에 폭우로 인한 Cismelei 계곡 범람으로부터 부지를 보호하기 위하여 설계홍수 수위 +14.13mBSL에 비해 제방높이가 +18mBSL로 높고, 계산된 최대수위 +17.5mBSL보다 낮으며, 제방의 설계 높이와 계산된 최대수위를 비교시 0.5m 여유가 있다.

셋째, 건물 바닥높이는 발전소 부지높이보다 더 높고 지상과 경사가 지도로 설계되어 실제 지역 지형 측정결과 건물 최소 지상 바닥 높이는 +16.24mBSL로 확인되었다.

넷째, 최대강수율 $97.2 \text{ l / m}^2 \text{ / h}$ 에 대한 부지 우배수계통 설계는 최대강수율

보다 10배나 많은 호우에 대해 적절한 여유를 보장한다. 따라서 부지정지의 수위는 건물 지상 바닥 주위의 최소높이 24cm이하인 지역 지형 관측결과 20cm로 확인되었다.

다섯째, 계통 고장에 대비한 심층방어 제공을 위해 다수의 독립적인 열제거원과 전원공급원이 설계되었다.

결론적으로 외부 재해에 의한 발전소 건물의 침수에 대해 충분한 여유가 있다. 또한 취약점 및 버랑끝 효과는 없는 것으로 평가되었다. 따라서 홍수재해에 대한 충분한 여유가 있으므로 강화되어야 할 추가 조치는 없다.

다. 악천후 조건

1) 설계기준

가) 설계기준에 사용된 기후조건 재평가

① 겨울철 저온 - 착빙

예비 및 비상전원공급 디젤 발전기실 환기창에 얼음이 싸이는 것을 방지하기 위한 운전상의 대비책이 마련되어 있다.

배수구역의 결빙으로 복수기 냉각수, 기기냉각수원 및 비상급수계통 취수구들의 기능을 저해할 가능성이 비상운전절차서에서 다루어지고 있다.

② 눈

장기간의 영향으로 안전성 관련 구조물이 안전계통의 가동성을 보장하기 위하여 최대 예상 적설하중 조건을 넘어서도 견뎌야함으로 발전소는 극한 기후 사건에 대처하기 위한 일상적 현장점검과 철차를 가지고 있다. 따라서 안전성 관련 구조물들이 손상되지 않도록 적절한 조치가 취해질 것이며 극한적인 적설 하중에 영향을 받지 않을 것으로 예상된다.

③ 가뭄-강의 저수위 평가

2003년 8월 다뉴브강 저수위로 장기간 체르나보다 1호기를 정지한 경험이 있고 2011년 9월~12월 비정상적으로 낮은 수위였으나 발전소 정지할 수준의 수위로 내려가지는 않았다.

2003년 사건 이후 다뉴브강 저수위에 대한 안전성평가를 수행하여 최악의 가뭄 시나리오에도 물을 공급하기 위해 두곳에 깊은 지하 우물을 팠으며, 이

러한 저수위 상황에 대비하기 위해 비상운전절차서를 작성하였다.

④ 산불

발전소 특정 절차서에 따라 소내 소방관들은 일상점검중 건조한 초목의 화재발생 가능성을 점검하고 항시 출동할 수 있도록 되어있다. 발전소 외곽 모든 길들이 소방차 접근이 쉽게 만들어져 있다.

⑤ 초강풍과 토네이도

㉠ 초강풍

발전소 구조물들은 최소한의 풍속으로 환원하면 166km/h(46m/s)에 해당되는 140kgf/m²의 하중값에 견디도록 루마니아 표준에 맞추어 건설되었다. 따라서 체르나보다 구조물들은 적어도 부지 지역에서 역사적으로 기록된 모든 최대 풍속(65~126km/h)을 견딜 것이다. 풍속 180km/h를 초과하는 경우에 취해야 할 조치를 포함한 구체적인 절차서가 이미 마련되어 있다.

㉡ 토네이도

2002년 이래 다수의 토네이도가 발생하였다. 토네이도가 비상전력 공급 건물 및 비상급수 건물에 손상을 줄 수 있고 그 안에 있는 기기들이 가동 불능시 대체 최종 열제거원의 상실에 해당된다. 이 경우 소방차로 소화수 탱크의 물을 이용 증기발생기에 물을 공급한다. 이동식 디젤구동펌프를 이용 소화수 탱크나 소방차에 공급수 할 수 있다. 이 또한 사용할 수 없게 될시 소내용수계통(2개의 지하관정에서 2대의 펌프를 통해 공급)을 사용한다. 2대의 이동식디젤 발전기는 토네이도에 견딜 수 있는 구조물 안에 보관한다. 이런 대책들에 의해 증기발생기 급수 보장을 근거로 붕괴열 제거를 위한 열 사이폰 작용이 지속될 것이며 노심손상을 방지하게 될 것이다.

2) 안전 여유도 평가

천천히 진행되는 시나리오들에서 방지대책에 필요한 시간적 여유뿐만 아니라 안전성 관련 SSCs의 설계에서 제공되는 여유를 감안시 극한 기후조건 들과 관련하여 발전소는 적절한 안전 여유도가 있다. 따라서 최악의 사고 시나리오 들은 발생하지 않을 것이다.

극심한 기후 조건들에 대비하여 절차서를 구체적으로 개정(강풍의 경우 취해야 할 조치를 포함하여)해야 한다.

라. 전력 및 열제거원 상실

1) 전력상실

가) 소외전원 상실

소외전원 상실은 발전소의 원자로 또는 사용후 연료저장조 핵연료 냉각에 어떠한 위험도 주지 않는 설계기준 사고이다. 소외전원 상실사건이 발생하면 안전에 중요한 발전소 설비에 전력을 확실하게 공급하도록 즉각적인 조치가 자동으로 이루어진다. 소외전원 상실은 발전기 출력을 소내부하 전원(전출력의 7%)만 공급하는 원자로 고출력 운전모드(전출력의 35%에서 60%까지) 특성을 가지고 있다. 소내부하를 위해 사용한 증기는 7%를 제외하고 터빈우회 복수기 증기배출밸브를 통해 복수기로 직접 방출된다. 소내부하 중단(IV등급 전원 상실)시 원자로가 정지되고 냉각을 보장하도록 발전소가 설계되어 있다.

소내부하 운전 중단은 전처리 및 탈염수 생산을 중지하나 자동으로 기동되는 디젤구동펌프에 의해 화재진압용수는 공급된다. 보조증기 부하 및 증기발생기 취출을 감소시켜 탈염수 소비를 최소로 감소한다.

IV등급 전원 상실시 대기중인 디젤발전기(SDG)가 자동기동되어 10초이내에 III등급 모선에 전력을 공급한다. 보조급수펌프는 증기발생기 급수 공급을 위해 110초 이내에 전력이 공급되고 가용시간은 4일 이상이 된다. 원자로 정지 후 증기발생기에 확보되어 있는 물의 양은 1차 냉각재의 열제거원으로서 충분하다. 원자로건물 기능은 정상운전 상태로 유지되며 소외전원상실에 의해 영향을 받지 않는다.

원자로의 장기냉각을 위해 정지냉각계통(III등급 전원)을 기동하여 탈염수 재고량을 유지할 수 있다. 정지냉각계통 및 보조급수 펌프가 가용하지 않을 경우 감압 및 살수탱크와 비상급수계통(EPS전원)에 의해 증기발생기를 열제거원으로 사용할 수 있다.

대기용 디젤발전기(SDG) 사용에 필요한 연료는 호기당 약 5일분 4대의 비내진 연료탱크에 저장된다. IV등급 전원상실일 경우 대기용 디젤발전기는 가용한 것으로 고려되지 않는다.

비상전력공급 디젤발전기(EPG) 연료탱크는 내진검증되고 72시간이상(최소 6일) 연료가 확보되어 있다. 비축연료 고갈 후 발전소에 필요한 연료 공급

설비가 마련되어 있다.

소외전원과 별도로 다음 4가지 단계의 추가적 수단에 의해 발전소 전력공급 건전성이 보장된다.

첫째, 100% 용량의 대기 디젤발전기(SDG) 2대에 의해 공급되는 III등급 전원

둘째, 배터리로부터 공급되는 I / II 등급 전원(최근 8시간 동안 배터리 전원공급이 가능한 것으로 평가)

셋째, 내진 검증된 100% 용량의 비상디젤발전기 2대에 의해 공급되는 비상전원 공급

넷째, 이동용 디젤발전기

I / II 등급 배터리를 제외한 다른 전력은 어떠한 외부 지원 없이도 최소 5일간 연속 전력공급을 보장한다. I / II 등급 배터리는 제한된 시간 운전원이 다른 열제거원을 충분히 확보하도록(기본적으로 밸브 작동) 냉각기능을 보장한다. 따라서 추가적인 설계변경 또는 운전변경은 불필요하다.

나) 소외전원 상실 및 일반 백업교류전원 상실

IV등급 전원상실로 대기 디젤발전기가 자동 또는 수동기동이 안될 경우 이로 인해 III등급 모선에 전원이 가압되지 않을 경우 운전원은 증기발생기를 감압한 후 저압급수 공급계통을 통해 물을 증기발생기에 공급한다.

운전원 감압조치가 없을 경우 I, II 등급(батери) 전원이 가용하므로 증기발생기 수위와 급수헤더 압력 조건하에서 자동 감압된다. 이때 살수탱크로부터 물을 공급(약 2000톤)한다. 현장 운전원이 증기발생기 보충수 밸브를 현장에서 수동조절하여 최소 23시간 이상 물을 공급 가능하다. 사건시작 27시간 후 1차 열이송계통이 포화상태에 도달하여 대량의 기포가 발생하기 시작하고 비등이 시작될 것으로 예상된다. 이때에도 증기발생기에 물이 공급되는 동안에는 열사이편 현상으로 붕괴열이 제거되고 연료 손상은 없을 것으로 예상된다.

I, II 등급(батери) 전원이 고갈될 때까지(8시간) 운전원은 주제어실에 남아 비상전원공급디젤(EPS) 기동을 시도할 것이다.

III, IV등급 전원 상실인 경우 I, II 등급 및 비상전원공급계통을 사용하여 모든 안전기능이 충족될 수 있다. 원자로건물 압력은 살수계통에 의해 제어되므로 가압되지 않을 것이다.

2차 제어구역(SCA), 비상전력공급(EPS) 및 비상급수공급(EWS)은 설계기준 사고시 지진에 견디도록 되어 있으며 홍수에 영향을 받지 않는다. 배터리 고갈시간 경과후에도 비상전력을 공급하여 2차 제어구역에서 발전소 감시 및 제어기능을 수행할 수 있다.

사용후연료저장조 및 관련 배관은 지진발생 후에도 건전성을 유지하기 위하여 설계기준 지진 사고에 견디도록 되어있다.

다) 소외전원상실 및 일반 백업 교류전원 상실과 영구설치된 다른 백업 교류 전원 상실

발전소정전(SBO) 사고는 설계기준 초과 사고로서 외부전력망, 대기 디젤발전기 및 비상발전기 상실에 해당되고 배터리는 가용한 상태로 가정한다. 이때에도 원자로정지 및 안전 정지상태가 유지되며 원자로 건물 또한 건전성이 유지된다.

① 원자로 연료냉각을 위한 열제거원 제공

전원상실로 처음 30분동안 원자로 냉각 안전기능을 유지하기 위해 배터리 또는 이동용 디젤발전기에 의해 4개의 주증기 안전밸브를 개방후 차단하여 실제적으로 가장 낮은 증기발생기 압력을 유지하고, 비상급수계통으로 냉각수를 보충하며, 1차열이송계통에 고압비상노심 냉각수를 공급후 비상급수계통을 공급함으로써 증기발생기에서 열사이폰을 유지한다. 수동 또는 자동으로 주증기안전밸브를 개방하여 증기발생기가 30분이내에 감압된다.

발전소 정전이 지진에 의해 시작되지 않으면 주제어실 또는 2차제어구역(SCA)에서 증기발생기 수위를 수동으로 제어가 가능하다. 증기발생기 수위조절을 위해 현장에서 수동으로 밸브 개도를 조절하여 살수탱크 재고량을 관리하면서 사용할 경우 1차열이송계통으로 부터 붕괴열을 제거하는데 살수탱크(약2000톤) 전 재고량으로 최소한 4일을 보장한다.

장기 열제거원 확보 차원에서 운전원은 비상급수계통 펌프를 기동하기 위해 비상전력계통 복구를 시도하고 안되면 절차서에 따라 이동용 디젤발전기를 사용한다. 이동용 디젤발전기는 자체적으로 6시간동안 운전가능하며, 비상전력계통 연료 사용시 최소 5일간 더 운전이 가능하다.

비상전력계통으로 증기발생기에 물을 공급할 수 없을 경우 소방차를 이용 증기발생기에 물을 공급한다. 이렇게 하여 열사이폰 현상을 통해 붕

괴열 제거를 보장하고 연료손상은 예상되지 않는다.

지진으로 인해 모든 전력(교류 및 직류)이 상실되고 증기관 파손으로 증기발생기 압력이 345kPa(g) 이하로 떨어질 때 증기발생기에 살수탱크로부터 물이 중력에 의해 공급되며, 최소한 23시간 지속될 것이다. 사건개시 27시간 후부터 1차열이송계통이 포화상태에 도달하여 기포가 생성되면서 비등이 시작된다. 살수탱크 모든 재고량을 조절하면서 사용할 경우 1차열이송계통의 붕괴열 제거는 최소한 7일간 보장된다.

고압비상노심냉각이 가용하지 않을 경우에도(батери 상실 가정) 증기발생기가 가용하는 동안 열사이폰 현상에 의해 붕괴열이 제거된다. 증기발생기 2차측이 저온상태가 되어도 1차열이송계통에 기포가 60%까지 생성되어도 2상 열사이폰에 의해 냉각이 진행된다. 비상전력공급 디젤발전기는 0.4g의 최고지반가속도(PGA)에도 가용한 것으로 예상된다. 운전절차에 의하면 발생 가능할 것 같지는 않지만 0.4g를 초과하는 지진에 의한 발전소 정전발생시 이동용 디젤발전기를 사용하여 전원을 공급할 수 있으며 이의 연결에 필요한 시간은 이동을 포함하여 2.5~3시간 정도이다.

전원 공급으로 인해 고압노심냉각 및 비상급수계통 펌프가 복구되고 1차열이송계통으로 보충수가 공급되어 열 사이폰 현상에 의해 냉각된다. 만약 이동용 디젤발전기가 가용하지 못하면 소방차를 비상급수관에 연결하여 열제거원을 확보하도록 지시받는다.

지진으로 인해 모든 전력공급(모든교류 및 직류전원)이 상실되나 증기관이 파열되지 않아 증기발생기가 고압상태로 유지될 경우 주증기 안전밸브 개방 및 차단을 통해 압력을 최저로 유지하고 물을 보충후 이동용 디젤발전기로부터 전원을 공급받는 비상급수계통 또는 소방차를 비상급수계통에 연결하고 1차열이송계통에 고압노심냉각 후 살수탱크로부터 물을 공급하여 장기 사이펀 현상을 유지한다.

지진에 의한 모든 전력공급(교류 및 직류) 상실로 증기발생기가 건조될 때까지는 2시간이 걸리며 이 시간부터 최소 1개의 연료채널이 건조될때까지 2시간(사건 개시후 총 4시간)이 더 소요된다. 따라서 이동용 디젤발전기를 연결할 시간(2.5~3시간만에 설치 가능)이 있다. 주증기

안전밸브가 수동으로 열린 상태에서 살수탱크 물로 증기발생기 2차측 재고를 보충하고, 이동용 디젤발전기가 가용되어 1차열이송계통 재고량 회복을 위하여 고압비상노심 냉각수 주입으로 열사이폰 현상에 의해 원자로 냉각이 확보된다. 일단 증기발생기가 감압되면 살수탱크로 노심을 냉각하기 위해 추가로 23시간 공급된다. 지진에 의한 발전소 정전의 경우 이동용 디젤발전기로부터 전원을 공급받을 때만 2차 제어구역에서 주요 안전변수 감시가 가능하다.

② 벼랑끝 효과

벼랑끝 효과는 열제거원으로서 모든 증기발생기의 재고 상실을 의미한다. 지진에 의해 발전소 정전으로 증기발생기 고압 상태시 증기발생기에는 약 2시간의 재고가 있고 여기에 1차열이송계통에서 건조상태가 개시될때까지는 사건발생후 약 4시간이 걸린다. 원자로 냉각을 보장 할 수 있는 계통에 필요한 이동용 디젤발전기가 2.5~3시간내 설치가 가능하므로 벼랑끝 효과는 모면할 수 있다.

벼랑끝 상황 발생 방지를 위해 다음과 같이 설비개선이 사업자에 의해 진행중에 있다. 발전소정전 및 밧데리 사용 불가시 증기발생기 감압 보장을 위해 주증기안전밸브 개방 방식을 현장 수동 또는 공기구동, 전용 밧데리를 사용하여 2차 제어구역에서 공기구동으로 변경하고 밧데리의 내진능력을 향상시키며, 이동용 디젤발전기 2대를 전 비상전력계통 부하를 감당할 정도로 큰 용량(1MW)으로 교체하는 설계변경을 진행중에 있다.

라) 전원상실에 대한 보호의 적절성에 관한 결론

발전소 보호를 위해 대기 디젤발전기(IV등급 전원 상실후 3분이내 자동 기동되고 자동 기동되지 않을시 수동기동)가 있고 대기 디젤발전기 이용불가시 비상디젤발전기가(운전원에 의해 기동)가 있다. 이 모든게 실패시 직류 및 교류용 밧데리로 사고관리 및 붕괴열을 제거하며, 비상디젤발전기를 백업하고 비상급수계통 등에 전력을 공급할 수 있는 2대의 이동용 디젤발전기가 있다.

결론적으로 발전소에 대한 견고성 및 정비 상태는 전원상실에 대비한 설계기준에 부합하는 것으로 볼 수 있고, 발전소 절차서 및 사고관리대책을 고려할 때 전력상실 및 이로 인한 영향에 대응하는 발전소의 방어수준이 높다.

마) 전원상실시 발전소의 견고성을 증대시키기 위한 조치

전원공급 보호를 위한 여유도와 설정된 사건(지진, 홍수 및 극한 기후조건)을 고려시 전원공급 상실의 경우 발전소의 견고성을 더 증가시키기 위한 대책은 불필요한 것으로 결론을 내렸다.

앞에서 언급한 대로 향후 사업자는 벼랑끝 상황 발생 방지를 위해 설계변경을 진행중이므로 전원상실시 발전소 견고성을 증가시킬 것이다.

2) 붕괴열 제거능력/최종열제거원의 상실

1차최종열제거원은 1차열수송계통내 강제 냉각 순환을 이용하는 붕괴열제거를 기본으로 한다. 붕괴열 제거의 선호 방법은 정지냉각 계통을 사용하고 정지냉각은 열교환기를 통하여 열을 기기냉각수계통으로 이송한다.

기기냉각수계통은 열교환기를 통하여 열을 기기냉각원수로 이송하고 그 열은 다뉴브강에서 소모된다. 원수는 취수구를 통해 취수된다.

대체 열제거원은 1차최종열제거원을 이용할 수 없는(노심을 통한 강제 순환 상실) 경우에 1차계통의 자연순환을 통해 에너지를 증기발생기의 2차에 또는 증기발생기를 통해 대기로 제거할 수 있다. 보조급수펌프가 운전되는 한 지속적 열제거가 가능하다.

주급수 또는 보조급수펌프가 증기발생기 2차측에 물을 공급할 수 없을 경우 대체 최종열제거원은 증기발생기 보충수(살수탱크 재고량)에서 중력에 의해 물을 공급한다. 증기발생기는 대기압까지 감압된다. 살수탱크 재고는 증기발생기 보충수밸브(고장개방)를 수동제어할 수 없을시 23시간 동안, 유량이 제어되면 7일동안 증기발생기에 물 공급을 보장할 것이다.

비상급수계통에 의한 증기발생기로 연속 물공급은 탈염수 재고가 고갈되면 2대의 100% 비상급수공급펌프(호기별)에 의해 다뉴브강에서 증기발생기 2차측에 급수를 직접 주입한다. 이로인해 1차 열수송계통과 증기발생기 2차측에 공급된 물의 일부분은 개방된 주증기 안전밸브(1등급 또는 비상전력 공급 또는 이동형 디젤발전기로 전원공급, 개방잠금)를 통해 대기로 방출된다.

각 비상급수공급 펌프는 비상전력공급 디젤발전기(설계기준) 및 이동형디젤발전기에 의해 전력을 공급받는다. 비상급수 공급계통이 증기발생기에 급수를 공급하고 1차계통내에 충분한 재고가 존재하는 한 적절한 붕괴열제거가 보장된다.

가) 주 냉각수 취수 차단을 방지하기 위한 계통 또는 해수 대체 취수와 같은 1차최종열제거원 상실을 방지하기 위한 설계

전력은 유용한 것으로 가정하고, 지진이 아닌 다른 사건에 의해 유발되는 1차최종열제거원의 상실은 기본적으로 기기냉각원수 취수구의 냉각수 또는 기기냉각수/기기냉각원수계통(능동 또는 수동) 상실을 의미한다. 이러한 상실에 대해 분석한 결과 취수구 유량 차단을 피하기 위한 발전소 설비들은 적절한 것으로 결론이 내려졌다.

1차최종열제거원이 유용하지 않는 경우 특히 지진의 경우에는 대체 최종 열제거원은 원자로에 의해 발생한 열 사용을 위한 신뢰할 수 있는 경로이다. 살수탱크는 1차최종열제거원 또는 급수계통을 이용할 수 없을 때 증기발생기 수위 회복을 위해 증기발생기 보충수 계통으로 사용될 수 있으며 내진검증이 되어 있다. 증기발생기 및 비상급수 공급계통은 설계기준 지진에 대해 내진검증이 되어 있으며 비상급수 공급계통 취수구는 내진검증이 되어 있고 기기 냉각원수 펌프와 취수구가 분리되어 있다.

각 비상급수계통 펌프(호기당 100%, 2계열)는 설계기준 지진에 대해 내진검증된 비상전력공급 디젤발전기에 의해 전력이 공급된다. 비상전력공급 디젤발전기는 붕괴열 제거를 위해 1차 열수송 루프와 증기발생기에 비상냉각수를 공급하는데 필요한 모든 밸브에 전력을 공급한다. 비상급수공급계통은 2차 제어지역에서 조작할 수 있고, 설계기준 지진에 내진검증이 되어있으며, 펌프와 밸브는 이동식 디젤발전기에 의하여 전력을 공급할 수 있다.

나) 최종 열거원 상실(예: 강, 호수 또는 바다로부터의 냉각수 공급상실 또는 주냉각탑의 상실)

1차최종열제거원의 상실은 발전소 설계(급수 상실, 정지냉각 상실, 기기냉각수 상실)의 일부로 안전성분석에서 고려되었다.

주급수펌프가 이용불가능시 대체 열제거원은 보조급수 펌프이며, 보조급수 펌프는 물처리실이 탈염수를 생산할 수 없는 상황에서도 최소한 3일동안 증기발생기에 물을 공급할 수 있다.

대체열제거원인 보조급수 펌프도 이용불가능시 운전원에 의해 증기발생기

보충수계통을 통하여 살수 탱크로부터 탈염수를 사용할 수 있도록 공기식 격리밸브 개방 후 다우징 물 재고는 증기발생기 2차측에 물을 공급하기 위해 사용될 수 있다. 전체 살수탱크 재고는 적어도 7일동안 지속적인 열제거원의 작동을 보장할 것이다.

발전소 격납건물 안전기능과 감시는 기기냉각수/기기냉각원수의 상실에 의해 영향을 받지 않으며 운전은 주제어실(필요시, 제2제어지역)로부터 수행될 수 있다.

다) 최종 열제거원 및 대체 열제거원 상실

주급수펌프, 보조급수펌프(또는 “급수계열” 불용성)의 완전한 고장, 두 계열의 비상냉각수 공급계통 상실뿐만 아니라 정지냉각 또는 기기냉각수/기기냉각원수계통(1차 최종열제거원)의 상실은 체르나보다 원전의 설계를 넘어선 사건이다. 이 경우 증기발생기를 통한 대기로 방출하는 열 제거는 운전원 수동조작과 사고관리대책에 따라 열대류에 의해 보장될 수 있다.

1차최종열제거원(기기냉각수/기기냉각원수계통) 상실후 운전원은 열대류 과정으로 구성하고 있는 대체 열제거원(증기발생기 보충수 계통/비상급수공급계통에 의해 제공되는 물)을 사용하도록 지시를 받는다(원자로 정지 후 3일 이상 계속될시 보조급수와 탈염수 재고량의 이용).

전출력 운전상태에서 모든 열제거원 상실시 주제어실(주제어실 지역 유용시) 또는 2차 제어지역(지원계통 상실시)에서 비정상 운전절차서를 운전원이 사용한다.

기기냉각수/기기냉각원수, 급수와 비상급수 공급계통 상실 가정시 살수탱크 재고는 증기발생기 2차측에 물을 공급하여 1차측 저온관과 고온관의 밀도차이에 의해 1차열수송계통에서 지속적 순환을 가능하게 하고 증기발생기 2차측에서 생산된 증기는 개방된 경로(주증기 안전밸브)를 통하여 대기로 방출될 것이다. 1차측 재고와 압력제어는 고압비상노심냉각수 재고에 의해 회복된다.

1차와 대체 최종 열제거원의 상실로 증기발생기 2차측에 냉각수 공급은 살수탱크 재고(약 2000톤)에 의해 보장된다. 살수탱크 유량은 증기발생기 보충수 공기식 격리밸브 개방(주제어실, 2차 제어지역, 또는 현장 수동제어에 의해)에 의해 증기발생기 2차측에 제공된다. 만약 살수탱크 재고가 통제된 방법으로 사용되면 이는 1차열수송계통으로부터 붕괴열 제거를 위해 적어도 7일동안 보장할 것이다. 증기

발생기 수위가 제어될 수 없는(증기발생기 보충수 밸브의 개방과 닫침에 의해) 경우 살수탱크 재고는 적어도 23시간 동안 연속적으로 열제거원을 보장할 것이다.

증기발생기 보충수 공기식 격리밸브가 현장에서 수동조작될 수 있으므로 발생 가능하지는 않지만, 사건발생 27시간 이후 1차 열수송 냉각재는 포화상태에 도달하고 증발하기 시작한다.

전력 상실로 비상급수 공급계통 작동 불능시 운전원은 2.5에서 3시간 이내에 이동용 디젤발전기를 설치하고 비상전력공급 모선이나 현장 펌프에 직접 연결하여 증기발생기 2차측과 필요시 1차 열수송계통에 물을 공급할 수 있다. 이렇게 함으로써 열대류에 의한 붕괴열이 제거된다. 이동형 디젤발전기는 5~6시간의 자체 운전이 가능하고 이후 비상전력공급 탱크로부터 연료를 보충하여 운전이 가능하다.

모든 열제거원 상실시 특별히 비상급수 공급계통 배관에 설치된 한세트의 연결관에 소방차를 연결하여 증기발생기에 물을 보충한다. 소방차는 소화수탱크(1500^m, 2대)로부터 물 또는 음용수계통의 물을 공급받을 수 있다.

설계에 의해 제공된 전동기 구동펌프에 더하여, 소화수탱크는 이동형 디젤구동 펌프를 사용하여 취수구로부터 물을 공급받을 수 있다. 이동형 디젤펌프 구매는 이미 계약되어 있다.

음용수 계통의 물 보충은 소외전력에 의해 전원을 받는 2대의 펌프에 의해 제공되는데, 전원상실시를 대비해 2대의 이동형 디젤발전기를 확보하기 위하여 구매에 착수하였다.

1.21mBSL(10^{-4} /년 주기) 미만의 점진적 취수구 수위감소에 따른 1차 최종 열제거원의 상실 후에 대체 최종 열제거원의 상실은 특정 비정상 운전절차서 적용을 허락하는 느린 과정이다. 절차서는 기기냉각원수계통 펌프(1차 최종 열제거원)를 정지해야 하는 수위까지 도달하기 적어도 3일전 발전소 정지를 요구한다. 이 절차서 진입조건이 충족되면, 소화호스를 수동으로 연결한다. 1호기 기기냉각수 계통을 위한 냉각수는 소화수계통과 소내용수계통에 의해 공급된다. 2호기 기기냉각수 계통을 위한 냉각수는 단지 소화수계통만을 이용할 것이다. 이러한 연결이 1호기에만 되어 있는 반면 2호기는 기기냉각수 상실이 임박할 때만 효과적으로 작동되어진다.

1차최종열제거원(기기냉각수/기기냉각원수 계통)과 대체 최종 열제거원의 상실은 사용후연료저장조 냉각기능 상실을 유발할 것이다.

라) 최종 열제거원 상실에 대비한 보호의 적절성에 대한 결론

최종 열제거원의 완전 상실은 체르나보다 원전에서 연료손상을 유발함이 없이 대처할 수 있다.

마) 최종 열제거원 상실의 경우에 발전소의 견고성을 증가시킬 수 있는 조치
후쿠시마 사건후 발전소는 2대의 이동형 디젤발전기의 유용성(발전소 현장에서)을 확인했다. 또한 발전소는 소화수탱크 보충 또는 소방차를 위한 이동형 디젤구동 펌프의 구매에 착수했다. 또한 2대의 이동용 전기 수중펌프는 이미 발전소에서 이용가능하다.

부지에서 이용 가능한 깊은 우물로부터 소내 용수계통에 물을 공급할 수 있는 두 대의 펌프에 전력을 공급하기 위해 두 대의 이동형 디젤발전기 계약은 이미 완료되었다.

3) 발전소 정전(SBO)을 동반한 1차 최종 열제거원 상실

발전소 정전에 따른 최종 열제거원 상실은 상당히 낮은 확률의 사건이다. 발전소 정전은 IV, III등급 계통과 비상전력공급의 상실을 의미한다. 발전소 정전결과 보조급수펌프가 상실되고 급수계통으로부터 어떠한 탈염수도 증기발생기에 공급할 수 없어 유일한 공급원은 살수탱크의 물이다.

1차 최종열제거원 상실과 발전소 정전후 1차 열수송계통 재고와 압력제어는 고압비상노심냉각재 재고량(적어도 170m³)을 이용하여 회복(압력 및 수위제어 계통 상실 후)될 것이다. 따라서 1차 열수송계통 압력은 고압비상노심냉각 가스 탱크에 의해 유지될 것이다. 고압비상노심냉각수 주입(그리고 증기발생기 2차측 감압)을 보증하기 위해 운전원은 4개의 주증기안전밸브를 개방한다. 주증기 안전밸브는 I 등급 전원이 사용가능하기 때문에 개방될 수 있다. 증기발생기가 수동감압이 수행될 때까지 2차측 압력은 높게 유지될 것이다. 주증기 안전밸브의 개방이 지연되면 8개의 주증기안전밸브 개방에 의한 특정한 조건이 충족될 때 증기발생기는 30분이내에 자동감압이 발생할 것이다. I, II등급 전

원이 이용가능한 반복적인 증기발생기 감압은 1차열수송계통의 급속한 감압을 초래하고 수동 또는 자동으로 고압비상노심냉각수 주입을 유발할 것이다.

단기적으로 이러한 상황의 유용한 탈염수는 살수탱크 물이 될 것이다. 살수탱크 물은 증기발생기에 보충수 공기식 격리밸브 개방후 보충수 계통을 통해 공급할 수 있다. 운전원이 주제어실 또는 2차 제어지역 또는 현장에서 수동으로 보충수 공기식 격리밸브를 개방할 수 있다. 살수탱크 재고는 7일간 붕괴열 제거를 보장한다. 살수탱크로부터 전혀 유량이 제어되지 않는 상황(고장열림)에서도 1차 열수송계통이 포화상태에 도달하고 증발이 시작되기 때문에 1차 열수송계통 내 중요한 기포가 발생하기 시작할 때도 물은 적어도 27시간 동안 열제거를 보장할 수 있다. 이러한 상황은 보충수 공기식 격리밸브가 현장 수동조작 가능함으로 발생하지 않을 것이다.

체르나보다 원전은 380VAC 비상전력공급 모선과 비상급수 공급계통 펌프에 전원을 공급할 수 있는 이동형 디젤발전기(2.5~3시간 이내 설치가능) 호기별 각 1대를 이용할 수 있다. 살수탱크 재고량은 이동형 디젤발전기 설치시간을 충분히 확보해 준다. 이후 비상급수공급계통은 증기발생기 2차측에 물을 공급하고 개방된 주증기안전밸브를 통해 대기로 증기를 방출하여 붕괴열을 제거한다.

다른 어떠한 열제거원도 없을시 비상급수공급계통 배관에 특별한 접속부를 설치하여 소방차 또는 소내용수계통으로 부터 물을 증기발생기 2차측에 공급하여 열대류에 의해 붕괴열을 제거한다.

주요 안전변수 감시는 축전지가 유용한한 주제어실에서 수행하고 비상전력 공급모선 전원 재가압(이동형 디젤발전기 접속 이후)후 감시는 2차 제어지역에서 수행한다. 이로인해 확인된 절벽효과는 8시간 이내 축전지 전원상실이다. 이동형 디젤발전기는 축전지가 고갈되었을 때 비상전력공급을 위하여 2.5~3시간 이내에 설치될 수 있다. 발전소 정전과 결합된 최종 열제거원(기기냉각수/기기냉각원수계통) 상실은 사용후연료저장조의 냉각상실을 유발할 것이다.

가) 원자로 노심과 사용후연료저장조의 정상적인 냉각조건 상실전 조치시간
(예: 일차계통으로 부터 냉각재 상실 개시)

발전소 정전과 결합된 1차 최종 열제거원 상실의 경우 원자로 냉각조건을 7일 이상 보장할 수 있는 모든 필요한 설비가 있다.

후쿠시마 원전 사고 이후 호기당 1대씩의 880kW 이동형 디젤발전기를 구매하여 380VAC 비상전력공급모선과 비상급수 공급계통 펌프에 동력을 공급하여 시험 하였다. 증기발생기 2차측에 냉각수를 공급할 수 있다. 비상전력공급 연료탱크는 디젤발전기를 위해 적어도 5일 동안 필요한 연료유를 확보하고 있다. 증기발생기에서 붕괴열을 제거가 가능하며, 비상전력공급 모선 재가압 후 2차 제어지역에서 발전소 감시 복구가 이루어진다.

나) 연료손상 방지를 위한 외부조치

복구단계에서 사업자와 국립 전력수송회사는 소외전력 회복을 위해 함께 노력할 것이다.

1차최종열제거원의 상실과 함께 발생하는 발전소 정전의 경우 발전소는 급전망 재접속과 전등의 공급 및 중장비와 필요한 디젤연료 공급을 위한 절대적인 우선순위를 가지도록 보장하기 위해 비상대응관련 지방 및 국가기관과의 특별협정이 확립되어 있다. 이러한 협정은 비상계획 및 대응의 일부분이다.

다) 발전소 정전과 함께 1차최종열제거원 상실의 경우에 발전소의 건전성 증가 조치

후쿠시마원전 사고이후 호기당 각 1대씩 구입한 이동용 디젤발전기(880kW, 0.4kV, 설계반영 비이동형 비상전력공급 디젤발전기와 같은 용량)로 380VAC 비상전력공급모선과 비상급수 공급계통 펌프에 전원을 공급하여 시험되었다. 또한 상기 이동용 디젤발전기를 교체하기 위해 1MW 디젤발전기(비상전력공급 계통 부하를 감당할 수 있도록 하기 위해) 구매 계약이 승인되었다.

이에 더하여 사업자는 이동형 디젤엔진 구동펌프 구매에 착수했다. 또한 이동형 전기식 수중펌프는 이미 발전소에서 사용중이다. 깊은 지하 우물로부터 소내용수계통에 물을 공급할 수 있는 두 대의 펌프에 전력을 공급하기 위한 더 소형 디젤발전기 2대를 구매할 계획이 있다.

발전소는 이동형 디젤발전기 연결시간 감소를 위해 특별한 부하접속 판넬을 설치하기 위해 설비개선에 착수했다.

마. 중대사고관리

1) 사고완화를 위한 사업자 조직 및 배치

발전소는 초기사고 영향을 완화하고 운전원이 발전소를 안정상태인 상온정지 상태로 조치하기 위한 세분화된 절차서를 갖고 있으며 예상되는 운전 비정상 상황과 사고에 대해서 다음과 같은 절차서에 의해 체계적으로 제어된다.

- 운전 및 경보 대응지침서 : 발전소 운전원들이 사용하는 절차서로서 발전소 계통(설정치, 발생원인, 조치방안 등)과 관련된 비정상 및 경보에 대처하는 내용 포함
- 운전제한지침서 : 안전운전 한계 영역을 초과할 우려가 있거나 근접할 경우 운전원이 취할 조치내용 포함
- 비정상운전절차서(비상운전절차서, EOPs로 알려짐) : 사고상황(설계기준 및 설계기준 초과사고) 동안 운전원이 조치할 사항이 기술된 절차서로서 발전소를 안정상태로 회복시켜 종사자 및 일반대중의 안전과 건강을 확보
- 중대사고관리지침 : 운전원과 비상기술지원팀에서 사용되며 중대사고 영향을 최소화하고 발전소를 최종적으로 안정상태로 유지
- 비상대응지침 : 방사선사고, 의료사고, 화학사고, 화재사고, 극심한 기상조건, 사용후 연료 이송사고, 사용후 연료저장조 및 건식 연료저장고 설비사고, 주 제어실 거주성 상실의 경우 운전원 조치 내용을 포함하여 소내 비상계획서에 의해 통제되는 모든 절차로 비상 종류별 필요한 조치를 포함하여 쉬운접근 제공

비정상운전절차서는 설계기준사고 및 설계범위 초과 상태에 대응하기 위해 제공된 절차서이며 징후 기반 절차 뿐만 아니라 사건 기반형 절차들을 포함하고 있다.

후쿠시마 사고 교훈에 따라 소내정전과 사용후연료저장조 비정상냉각에 대한 2개의 새로운 절차서가 작성되었다.

추가로 발전소는 비정상운전절차서에 기반한 대응이 비효과적이고, 심각한 노심손상으로 사고가 진전되는 상황까지 중대사고관리지침서를 수행했다.

중대사고관리지침서의 목적은 노심손상 진행 중단, 가능한 긴시간 동안 격납 용기 건전성 유지, 소내외 방사능 누출 최소화이다.

중대사고 진입조건을 비정상운전절차서에 반영함으로써 비정상운전절차서와 중대사고관리지침서 상호관계를 연결했다. 중대사고관리지침서의 이행으로 발

생되는 새로운 책임과 요구사항을 반영하기 위하여 비정상운전절차서를 개정함으로써 비상계획과의 연계성을 제공한다. 또한 비상대응조직의 모든 요원은 중대사고관리지침의 사용에 대한 교육을 받았고 훈련은 현재 모든 비상대응훈련프로그램에 포함되어 있다.

중대사고관리지침의 진단과 평가의 일차적인 정보는 발전소 계측기에서 나오며 비상대응절차서를 통한 예상 데이터 및 전산자료와 추가 측정을 통해 보완된다.

가) 사고대응조직(소내 비상대응)

비상대응 인력은 양호기가 동시에 사고에 의한 영향을 받는다는 전제하에 평가되었으며, 412명이 비상대응 절차를 위해 특별히 훈련되었다. 비상대응 인력은 운전원, 비상관리 및 기술지원 요원, 대피소 책임요원, 의료요원, 전문 외부소방대로 구성되어 있다.

중대사고가 포함된 포괄적인 비상대응 프로그램과 방안이 다음과 같이 마련되어 있다. 이는 조직 및 인적자원, 비상절차서, 교육 및 훈련, 비상대응설비 및 장비, 비상디젤발전기 연료공급, 비상감시 및 시료채취, 방사선량 계산, 인명보호 및 대피(소개), 통신수단 및 장비, 소외 대응을 위한 공공기관 통보이다.

관련 서류를 포함한 비상계획서의 모든 수단들은 발전소 관리조직 및 규제 당국에 의해 승인되고 비상 훈련을 통해 주기적으로 시험을 받는다.

소내 비상통제센터는 비상대응 요원들의 종합상황실이며 장기간 운영에 대비하여 발전소 상태를 평가할 계측기, 여과배기계통, 디젤발전기, 식량과 식수가 마련되어 있다. 비상발령기준은 기준1-경고, 기준2-소내비상, 기준3-부지비상, 기준4-종합비상으로 분류되며 종합비상은 환경으로의 방사능 물질이 실제 또는 잠재적으로 누출될 우려가 있을 경우 소외 보호조치를 위해서 발령된다.

종합비상인 경우 비상통제실 발족까지 발전부장은 대중, 환경, 발전소 및 부지내 직원을 보호하기 위한 관리 및 협력활동에 관한 비상대책위원장 임무를 이행한다. 부지 비상통제실 발족에 따라 비상통제실 요원(비상대책위원장, 비상기술요원, 비상보건물리요원 및 행정요원)이 도착하여 발전부장으로 부터 발전소 상태, 직원, 진행된 통보 등을 인수받아 대응 활동 전략목적을 검토한다. 요구된 시간은 일과시간 중에는 통보후 15분/일과시간 후에는 2시

간까지 이다. 이후 비상보건물리요원은 방사선 감시데이터 처리 및 일반인과 소내 인원 보호조치를 수립하고 조치를 수행하며, 비상 행정요원은 소내 요원에 대한 보호조치를 이행한다. 비상기술요원은 비상대책위원장과 발전부장에게 적기에 기술적 조언을 제공한다.

비상사태 동안 “비상구호 및 사상자 가족에게 통보, 소내 비상통제센터에서 정보기록, 공공기관 통보양식에 의한 팩스 송신, 사고기간중 보충인력 소집 통보, 교통통제 통보, 추가적 보급품 확보, 잔해 처리용 중장비 확보, 소내 비상조직 요원용 숙식 제공, 소외 지원요원에 대한 교통, 숙식 확보” 등 행정적 관리활동이 비상행정당국에 의해 수행되고 협력된다.

행정당국은 도로를 청소하고 연료, 주요 비상대응요원의 수송, 음식 및 기타 필요물품을 제공하는 것과 같은 다른 어떤 필요사항들을 지원할 것이다.

나) 기존 설비 이용가능성

사고완화를 위해 원자로냉각 계통과 사용후연료 저장조를 충수하기 위한 보충수 공급원은 소화수, 소방차 또는 이동용 펌프를 포함한다.

필요시 사고완화를 위해 이동형펌프, 소방차 등과 같은 이동형 설비를 부지내에 가져오도록 하는 수단을 가지고 있다. 모든 전원상실에 대비하여 두대의 이동용 디젤발전기가 있으며 이는 2.5~3시간내에 연결하여 이용가능하다. 보충연료 조달은 예비디젤발전기, 비상전력공급 디젤발전기, 이동용 디젤발전기 및 이동용 디젤엔진구동 펌프의 지속적 운전을 보장하기 위해 가장 중요한 행정활동중의 하나이다. 참고로 두 개 호기에 있는 비상디젤발전기와 예비디젤발전기 및 비상통제센터용 디젤발전기의 연료유 전체 저장능력은 100일동안 연속 운전이 가능한 용량이다. 부지내 호기간 상호 연료 이송이 가능하다. 발전소 비상연료 공급계약이 이루어졌으며 행정당국도 수송을 지원할 것이다.

방사능 누출을 관리하기 위해 격리밸브, 댐퍼, 지역공기냉각기, 살수설비 등이 있다.

종사자 및 일반인에 대한 경보설비는 부지내 방송계통, 부지내 사이렌(батери 전원), 지역사회용 사이렌으로 구성되어 있으며 주기적으로 시험되고 있다.

통신 및 동보장치에는 주제어실 및 비상통제센터의 전화, 팩스, 위성전화,

E-LAN, 특수 통신전화와 무선설비가 있다. 이들 설비는 최악의 상황에서도 기능을 유지하며 행정당국과의 접촉이 유지된다.

통신설비 신뢰성 증가 조치로 발전소는 추가로 특수 통신전화 및 위성전화를 보유하기 위한 조치를 취했다.

다) 사고관리 방해 요소와 돌발 사태의 평가

발전소는 극심한 기상조건과 자연재해, 교통통제, 의료지원에 대한 지원을 위해 외부기관과 협정을 체결했다. 발전소로부터 800m 떨어진 비상통제센터는 장기간 거주성이 확보되어 있다.

비상통제센터가 이용불능시 제2제어실(1호기 또는 2호기)이 비상관리를 위해 사용될 수 있다.

발전소로부터 60km 떨어진 위치에 대체 소외 비상통제센터 설립이 진행중에 있다.

발전소는 부지내 내진검증된 위치에 부지내 비상통제센터와 소화설비를 두기 위한 조치를 시작했으며 동일 위치에 매우 중요한 사고완화 장비(이동형 디젤발전기, 이동형 디젤발전기 펌프, 소방차, 방사능 응급차 및 장애물 제거 중장비 등)가 비치될 것이다.

발전소내 대부분의 계측기는 중대사고관리지침 진입시 비보수적이다. 따라서 발전소는 원자로건물내 수소감시기를 설치하고 측정범위를 확대하며 중대사고 환경 검증으로 계측기의 지속적 감시 신뢰성을 명확히 하고 개선이행 방안을 제출해야 한다.

라) 사고관리 조직 적절성 결론

사고관리와 비상대응에 대한 조직은 적합한 것으로 확인되었으며 할당된 자원은 양호기 사고시에도 충분하다.

마) 사고관리능력 향상 조치

통신설비 및 소내 비상통제센터의 신뢰성에 대한 개선방안이 도출되었으며 이행될 것이다. 소외비상지휘센터 설립이 진행중이고 발전소 계측기 설비개선은 중대사고관리지침서 이행을 지원하기 위해 계획된다.

2) 노심냉각기능 상실 시나리오의 각 단계별 사고관리 조치

중수로는 중대사고시 노심손상 방지, 노심손상 진행 차단, 칼란드리아 용기 내로 원자로를 가두기 위한 고유 기술적인 방안을 가지고 있다. 노심 잔해물을 칼란드리아 볼트내에 국부적으로 가두고 격납용기 건전성을 유지하며 소외 방사능 방출을 최소화 한다.

중수로는 노심손상에 대해 고압력에서 심각한 노심 손상이 발생하지 않고, 고압 용융물 및 격납용기 직접가열이 차단되며, 사고로 인한 반응도는 빠르고, 매우 신뢰할만하고 다양한 정지계통에 의해 차단되는 고유 설계강점을 가지고 있다. 연료와 전체 노심을 둘러싼 대규모 냉각수 재고량은 모든 공학적 열제거계통이 고장나더라도 원자로 정지후 붕괴열 제거원으로서 작동하며 중대사고관리 조치 이행을 위한 충분한 시간을 허용한다.

가) 원자로압력용기/다수의 압력관 손상전 사고관리 조치(연료손상 방지를 위한 최후 수단 포함)

1차열수송계통이 건전한 사고(주증기관 파단사고, 급속냉각 사고, 1차 열수송계통 재고량 부족)시 원자로 냉각재 보충방법은 비상노심냉각계통 또는 비상급수공급계통 또는 일차 재고제어계통 급수펌프(가용시)를 이용하는 3가지가 있다. 2차계통은 증기발생기 재고가 고갈될 때 “주급수 가용시 무한정운전 가능, 증기발생기 전 압력에서 운전 가능, 보조급수는 가용급수원 고갈시 까지(총 73시간) 사용, 증기발생기 전압력에서 운전가능, 살수저장태크로 부터 중력에 의한 급수 허용 위해 증기발생기 감압(제어되지 않는 유량에서 23시간, 제어 유량에서 6.5일), 비상급수계통 공급(증기발생기 감압후 다뉴브강으로 부터), 정지냉각계통이 장기 열제거원으로 이용(기기냉각수 계통과 3등급 전원 유용한 상태)” 의 장기 열제거 방법중에 하나가 확립되어져야 한다.

대형 파단에 의한 냉각재 상실사고시 냉각재 상실 감지로 자동적으로 급속한 냉각이 진행되고 비상노심냉각재 주입계통으로 부터 피동 고압주입이 이루어진다. 비상노심냉각은 집수조로부터 취수하여 열교환기를 거쳐 1차열수송계통으로 냉각재를 주입한다.

소형 냉각재 상실사고시 2차측 열제거원이 장기 열제거를 위해 요구된다. 급수나 정지냉각계통은 1차열수송계통 건전성을 유지하기 위해 열제거원으로

서 사용될 수 있다.

심각한 노심손상사고로 진행되는 주요한 전제조건은 열수송계통으로 냉각수를 주입하기 위한 비상냉각계통의 고장과 함께 발생한 열수송계통 냉각재 상실(LOECC+LOCA)이다. 이는 설계기준 사고해석에 해당된다. 노심손상 진행은 연료채널로부터 감속재로 피동적인 열 방출로 인해 효과적으로 방지되며 감속재의 열은 감속재 열교환기에서 제거된다. 감속재의 강제순환 불가능시 칼란드리아 내에서 자연순환에 의해 심각한 노심손상을 방지한다. 칼란드리아 내 용수는 점진적으로 원자로건물내로 증기화될 것이다.

칼란드리아 수위가 연료채널 상단 아래로 감소하게 되면 사고는 심각한 노심손상(연료채널 손상)으로 진행될 것이다. 유사하게 감속재 배수 사고시에도 연료채널은 노출될 것이고 결국에는 손상될 것이다. 능동적인 열제거원이 없을 경우 원자로건물에 발생하는 증기는 지역 공기냉각기 또는 살수에 의해 진압될 수 있는 압력으로 상승할 것이다.

나) 원자로압력용기/다수의 압력관 손상후 사고관리 조치

감속재 열제거원 상실시 감속재가 점차 끓게 되어 연료채널은 점차 노출되고 과열되며 늘어지고 파단되어 결국 노심은 칼라드리아 용기 바닥에 떨어질 것이다. 사고 진전은 칼란드리아 용기에 보충수를 제공하거나 칼란드리아 볼트내에 경수 재고량을 통한 칼란드리아 용기를 외부에서 냉각함으로써 중단될 것이다.

차폐냉각계통(SCS)은 순수를 중단차폐체와 칼란드리아 볼트내를 순환시키고 흡수된 열을 열교환기를 통해 기기냉각수 계통으로 전달하여 노심 붕괴열을 제거한다. 중대사고시에도 운전가능하다면 차폐냉각계통 및 이의 지원계통은 사고 진행을 중단시키고 칼란드리아 용기내에 노심용융물을 가두기 위한 노심 붕괴열 제거와 격납용기 에너지 관리 수단으로 요구되어 진다.

만약 능동적인 순환과 냉각이 불가능하다면 칼란드리아 볼트의 냉각수는 점차 끓게 되고 그 시간동안의 열제거는 칼란드리아 용기 건전성을 확보하기에 충분하게 될 것이다. 칼란드리아 용기는 변형될 수 있지만 칼란드리아 볼트에 충분한 열전달 통로를 제공함으로써 노심붕괴 과정동안 증기 급등이나 다른 동적부하 상태하에서 파손될 것으로 여겨지지 않는다.

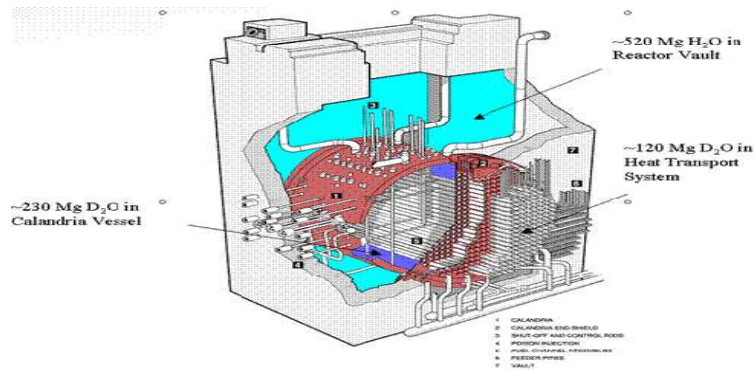


그림 2.2 - 칼란드리아 볼트 내부 칼란드리아 용기 위치

칼란드리아 용기가 대부분 물속에 잠겨있고 칼란드리아 볼트내의 냉각수 재고가 유지될 수 있는 한 노심용융물은 칼란드리아 용기내에 가두어지게 될 것이고 사고 진행은 용기내로 한정될 것이다. 칼란드리아 용기내 노심 용융물을 가두고 칼란드리아 볼트내에서 노심 잔해물의 재배치를 방지하기 위해 중대 사고 관리지침은 칼란드리아 용기와 칼란드리아 볼트내에 물을 보충하도록 제공한다. 중대사고관리지침을 지원하기 위한 설계변경이 제안되었고 이행할 계획이다. (2호기에서는 칼란드리아 용기에 보충하기 위한 설계변경이 이미 이행됨)

다) 원자로 압력용기/칼란드리아 용기 상실후 사고관리 조치

어떠한 물 보충도 이용할 수 없다고 가정시 칼란드리아 용기는 결국 변형으로 인해 파손될 것이며 용융물은 칼란드리아 볼트로 재배치 될 것이다.

CANDU-6 고유설계에 대한 중대사고 해석은 만약 노외 노심 용융물이 물속에 잠기지 않고 냉각되지 않는다면 사고후 2일만에 노심 용융물과 콘크리트 반응(MCCI)이 일어나고 사고 시작후 적어도 4일 만에 완전한 콘크리트 침식이 발생한다는 것을 보여준다. 이는 칼란드리아 용기 손상 동안 하부를 감싸고 있는 칼란드리아 볼트 냉각수가 있어 운전원이 격납용기내 사고결과를 완화하고 사고를 제어하며 안정된 상태로 유도하기 위한 충분한 시간이다.

3) 심각한 연료손상(노심용융까지)후 격납건물 건전성 유지

격납건물은 밀폐기능을 보호하기 위해 격납용기 내부 온도와 압력을 제한할 것이 요구된다.

고압 노심 용융물 분출은 중수로 원자로에서는 불가능하다. 노심잔해물의

잠재적 재임계는 중수로에서는 관심사항이 아니다.

파열된 증기발생기 튜브를 통한 격납건물 우회는 중대사고 동안 중수로 원자로에서는 불가능하다. 중수로 중대사고 시나리오에서 압력관은 증기발생기 튜브 파열전 1차열수송계통 과압으로 파열될 것으로 예상된다. CANDU-6에서 1차열수송계통 압력방출밸브는 증기발생기 튜브 파열 압력 이하로 열수송계통 압력을 제한할 것이다.

증기폭발(연료-냉각재 상호반응)은 중수로 중대사고 진행 기간동안 뜨거운 노심 잔해물질이 물과 접촉상태에 있는 노심기하학적 특성 때문에 발생되지 않을 것으로 여겨진다.

가) 고압 시나리오에서 연료손상 및 용융 가능성 제거

고압 노심 용융물 분출 시나리오는 중수로에서 위협이 되지 않는다. 1차열수송계통 감압은 용융 코리움 상태의 잠재적 형성 전 발생한다.

공학적 감압 메커니즘이 상실된다면 연료 과열은 1차열수송계통을 감압하면서 제한된 수의 연료채널 상실이 발생할 것이다. 따라서 연료채널은 압력 보호 퓨즈로서 작동한다.

나) 격납건물내 수소 위험관리

수소제어 전략은 1호기는 격납용기내 대기를 불활성화 시켜 수소체적 농도를 감소, 2호기는 점화기를 점화시켜 수소를 연소시킨다.

격납용기 구조물은 자연순환 혼합을 제공한다. 그리고 이용 가능하다면 지역 공기냉각 팬은 국부적 수소 고농도를 막기 위해 강제 공기순환을 촉진한다. 고유 중대사고관리지침서는 중대사고 환경에서 수소제어를 위하여 개발되었다.

추가로 안전여유도 증가를 위해 피동축매형 수소재결합기를 설치할 예정이다.

다) 격납건물 과압방지

과압에 의한 격납용기 건전성 유지를 위한 현 설계특성은 격납용기 체적과 원자로 건물 구조물의 피동 응축 구조와 지역공기 냉각기 및 살수설비이다.

격납용기 과압에 의한 배기전략은 “여과배기 유로사용, 물세정 배기유로사용, 비여과배기 유로사용” 등 3가지가 있다.

배기전략의 첫째 이점은 격납건물 가스제거로 연소에 의해 방출된 에너지

와 초기압력을 감소시켜 제어되지 않은 수소연소 또는 폭발에 의한 최고압력을 줄인다. 여과된 배출유로를 통한 배기의 두번째 이점은 격납용기 압력이 감소되어 비여과 누설경로를 통한 누출 잠재성을 줄인다. 격납용기 배기는 물에 의해 정화된 유로, 사용후 연료저장조나 증기발생기를 통하여 수행되어 질 수 있다. 사용후 연료저장조는 격리되어 질 수 있고 사용후 연료저장조 건물은 사용후 연료저장조 환기시스템의 배기 필터를 통하여 소량 유량을 배기함으로써 부압을 유지한다. 대기 증기방출밸브와 어떤 다른 릴리프/격리밸브는 수동으로 닫을 수 있다.

만약 상기 여과 또는 정화유로중 어느것도 격납건물 배기를 위하여 이용 불가능하다면 여과되지 않은 다양한 크기의 몇몇 격납건물 관통부가 제어된 방법으로 배기에 사용될 수 있으며 이러한 목적으로 그들의 이용은 중대사고 관리지침서에 설명되어있다.

격납건물 압력을 줄이기 위해 기존 계통과 수단들에 추가하여 비상여과배기 계통 설치가 양호기를 위하여 계약되었다.

라) 재임계 방지

중대사고 환경에서 원자로, 사용후연료저장조 및 신연료 저장고에서 재임계 가능성은 없는 것으로 확인되었다.

노심 용융상태의 중대사고시 노심용융물로 인한 연료채널과 연료다발의 붕괴는 결국 우라늄내 더높은 공명흡수를 발생하고 용융노심 미임계를 유지하는 더 적은 중성자 감속으로 인해 전체적으로 노심반응도를 줄일것이다.

사용후 연료저장조는 사용후 연료를 냉각하고 차폐 역할을 하기 위해 경수가 사용된다. 경수 속에 무한배치되어 있는 37개의 천연우라늄 연료다발은 미임계상태를 유지하는 것으로 입증되었다.

마) 기초바닥 용융 관통 방지

용융 잔해물이 칼란드리아 볼트내에 잔류되지 않는다는 것을 보수적으로 가정할시 노심용융 시작 후 7일째 격납용기 기초 바닥판에 용융 잔해물이 도달할 것으로 분석되었다.

격납용기 기초 바닥의 용융물 관통 방지는 노심 잔해물 냉각과 용융노심-

콘트리트반응(MCCI)을 제한하기 위해 격납건물내로 물을 주입하는 중대사고 관리지침서(SAMG)에 기반한다. 여러 중대사고 시나리오로부터 나온 예상된 상태와 물주입을 위해 사용될 수 있는 계통의 이용 가능성을 고려하여 선호 및 대체 전략들이 확인되었다.

격납용기내로 물을 주입하기 위한 고유 SAMG는 격납건물 바닥 수위가 1.5m 이하일 경우 사용될 수 있다.(이러한 진입조건은 노심냉각과 격납건물 감압을 위해 사용된 계통의 운전으로 부터 격납건물 바닥에 물재고가 존재해야하기 때문에 대부분 중대사고 시나리오와는 맞지 않다.) 이러한 고유 SAMG의 주목적은 MCCI 추가 진행을 방지하고 4.5m 두께의 바닥면을 보호하는 것이다. 격납용기내로 물을 주입하기 위해 확인된 선호된 전략은 직접 비상노심냉각 배관을 통하거나 또는 살수탱크를 통한 비상급수계통 물의 이용을 포함한다. CANDU-6 원자로 설계는 잔해물이 확산될 만한 충분한 바닥공간을 제공하고 잔해물이 물속에 잠기게 하는 방법을 제공한다.

바) 격납건물 건전성 보호를 위한 AC 및 DC 전원과 계측용 압축공기 공급 필요성

다른 어떠한 공급전원도 이용할 수 없을 시 이동용 디젤발전기를 설치한다. 격납건물 에어록 밀봉(격리보증)을 위해 계측용 공기 공급이 필요하며, 계측용 공기시스템 공급에 추가하여 설계에 반영되어 있는 밀봉기능 보증을 위한 백업용 질소 탱크 공급이 필요하다.

사) 격납용기 건전성 보호를 위한 조치 및 제어용 계측

기존 계측기는 SAMGs 이행 지원을 위해 적절한 것으로 평가되었고 조치수단들이 확인되었다. 그리고 조치들은 중대사고 조건의 환경검증을 위해 이행될 것이며, 원자로건물 내 수소 감시계통과 같은 추가적인 계측기를 제공할 뿐만 아니라 측정 범위를 확장하기 위하여 이행될 것이다.

아) 동일부지에서 다수호기 노심용융/연료손상 사고시 중대사고관리 능력

비상대응 활동을 위한 인적 및 물적 자원은 스트레스 테스트 세부사항에 따라 양호기가 사고의 영향을 받는다는 가정하에 평가되고, 배치되었다.

자) 격납건물 건전성 보호를 위한 중대사고 관리체계의 적절성에 대한 결론

격납건물은 중대사고시 일반 대중을 보호하기 위해 환경으로의 방사능 누출을 제한하는 기본 방벽이며 사고시 수반되는 내부온도와 압력을 제한한다. 중대사고시 격납건물 건전성을 위협하는 것은 완만한 과압, 수소제어 및 MCCI이다.

중대사고시 격납건물 건전성 위협은 열제거원 상실의 결과로 초래된 붕괴 열에 의한 증기생성으로 인한 완만한 가압이다. 격납건물내 증기발생을 피하기 위한 다양한 방법이 이용 가능하다. 즉 매우 신뢰할만 하고, 능동적인 사고 후 열제거원이 이용 가능할시 격납건물 대기로 증기화를 중단시키는 1차 열수송계통과 칼란드리아 용기와 차폐냉각을 위해 제공된다. 원자로건물은 격납건물 대기를 냉각하기 위해 지역공기 냉각기가 있다. 살수 설비는 격납건물 감압을 위해 사용된다. 이러한 설비들은 격납건물 건전성을 위협하는 고압이 감지될 때 자동으로 작동된다.

격납건물 구조는 자연순환에 의해 공기가 혼합되도록 설계되었다. 만약 이용 가능하다면 지역공기 냉각기는 고농도의 수소가 국부적으로 존재하지 않도록 수소혼합을 위해 강제공기 순환을 촉진한다. 1호기 수소제어 방안은 격납용기 대기를 불활성 상태로 만들어 수소체적 농도를 감소시켜 오랜 기간 격납용기 건전성이 위협받지 않도록 한다. 2호기는 수소가 가연농도에 도달하자마자 정화되어 수소를 연소시키는 정화기가 설치되어 있어 격납용기내 압력을 더욱 상승시키는 고농도에서의 폭발을 피하게 한다. 2개호기 모두 외부 전원이 필요하지 않는 피동축매형수소재결합기 설치를 고려하고 있다.

있을것 같지 않은 노외 노심손상의 경우, MCCI는 불응축성 가스와 발생된 증기 압력으로 인해 격납건물 건전성을 위협할 수 있다. 발전소는 잔해물의 확산을 위한 충분한 바닥 공간과 바닥내 잔해물이 물속에 잠기도록 하는 수단을 제공하고 있으며 SAMGs는 격납건물 내 물 주입을 위해 준비되어 있다.

차) 심각한 연료손상후 격납건물 건전성 유지능력 향상을 위한 조치방안

몇가지 설계개선사항이 확인되었으며 중대사고시 격납건물 건전성 유지능력 향상을 위한 이행이 계획되어 있다. 이러한 사항들은 노심용융의 진행과 재배치를 막기 위해 칼란드리아 용기와 칼란드리아 볼트에 보충수 주입 수단, 수소관리를 위한 수소 감시계통 및 피동축매형수소재결합기의 설치 및 여과배기계통 설치를 포함하고 있다.

4) 방사능물질 누출 억제를 위한 사고관리 조치

중대사고 진행동안 중대사고관리의 최우선 순위는 핵분열생성물의 방출을 방지하기 위한 모든 수단을 강구함으로써 일반대중과 환경을 보호하는 것이다. 핵분열 생성물의 방출이 일어날 경우 전략은 신속히 방출을 종결시키고 더 이상의 방출을 완화시키는게 필요하다.

핵분열 생성물 방출은 진단완화 흐름도에 의해 감시된다. 만약 방사선 선량이 SAG-4 설정값(발전소 경계에서 0.2mSv/h)를 초과하면 중대사고지침-4, “분열생성물 방출 감소”를 수행한다. 설정치는 격납용기로부터 방사성핵종의 대기방출과 방사선의 직접 조사량을 포함한다(장시간이며 단기간의 과도상태가 아니어야 한다.)

격납건물 내부로부터 핵분열 생성물 방출을 감소하기 위한 전략은 먼저, 방출 중지(격납건물 내 밀폐), 다음으로 방출률 감소, 마지막으로 대기중의 핵분열생성물 제거(시간, 살수, 화학물질, 물, 지역냉각기) 등 3가지로 분류할 수 있다.

최고의 우선순위는 방출원을 차단함으로써 방사성물질의 방출을 중지시키는 것이다. 방출유로 차단이 불가능하면 방출 압력을 감소시키고 방출율을 최소화하기 위해 격납건물 압력을 낮추는 열제거 방법이 사용된다. 만약 유출경로가 차단될 수 없고 열제거원이 유용하지 않거나 격납건물 압력을 줄이기에 불충분하다면 다음으로 가장 우선조치는 대기중의 핵분열생성물을 제거하는 것이다. 예를 들어 격납건물 지역 냉각기가 냉각기능을 수행하고 있거나 그렇지 않더라도 공기중 에어로졸과 옥소를 제거한다. 살수는 부유중인 핵분열 생성물을 씻어내기 위한 신속하고 효과적인 수단이다. SAG-4 지침내 전략에는 배기조치가 포함되지 않는다.

만약 지침 SAG-4에서 조치들이 성공적이라면 방사성 물질에 의해 발생하는 결과들은 제어된다. 반면 SAG-4 조치가 성공적이지 못하거나 소외 보호조치가 요구되는 일반인과 환경에 긴박한 재해 수준까지 방사선 준위가 증가되면 사고완화지침 1인 핵분열생성물 누출 완화로 진입한다.

가) 격납건물 건전성 상실후 방사성물질 누출

부지외 지역의 보호조치가 요구되는 실제 또는 잠재적 환경에 방사능 누출을 포함한 사고는 종합비상을 발령한다.

일반인 및 소내인원의 보호조치는 일반개입과 운영개입 수준에 따라 취해진다.

표 2.9 - 일반개입 수준에 따른 보호조치

보호조치	일반개입 수준(선량)
피신	10mSv
소개	50mSv
옥소 예방조치	100mSv

표 2.10 - 방사능 구름으로부터 외부 선량률에 기반한 보호조치

운영개입 수준	선량률	보호조치
수준1	1mSv/h ^(a,c)	소개된 사람들이 창문을 닫고 내부에 머물도록 안내가 있을때 까지, 이 구역, 인접구역 및 발전소에 더 가까운 구역에 대한 소개 또는 견고한 피난소 ^(b) 를 제공
수준2	0.2mSv/h ^(c)	실내에서 창문을 닫고 다음 안내시 까지 라디오를 듣고 TV를 시청한다.

- a) 연료 손상이 없다면, 운영개입 수준1 = 10mSv/h
- b) 견고한 피난처는 특별히 설계된 피난처 또는 대형 석조건물의 내부 홀 또는 지하에 설치한다. 피난처는 단지 24~48시간만 고려되어야 하고 유효성은 고선량률 지역에서 특별히 감시함으로써 확인되어야 한다.
- c) 대피인원을 감시하고 일반 대중에 대한 제염조치를 지시한다

표 2.11 - 침적으로부터 외부선량률 측정에 기반한 보호조치

운영개입 수준	선량률	보호조치
수준3	1mSv/h	소개 또는 구역내 견고한 피난소 제공
수준4	0.2mSv/h ^(a,b)	구역으로부터 사람들을 재배치하는 것을 고려
수준5	1 μSv/h	시료 분석시까지 지역내에서 잠재적인 오염음식 및 우유의 즉시 섭취 제한

- a) 운영개입 수준은 가능한 한 빨리 시료분석에 기반하여 계산해야함
- b) 사고후 2~7일동안

표 2.12 - I-131 대기중 농도 측정에 기반한 보호조치

운영개입 수준	선량률	보호조치
수준6	70kBq/m ³	갑상선 차단제 복용

나) 연료저장조에서 연료상부 노출후 사고관리

사용후연료 저장소의 장기간 냉각상실의 경우 사용후 연료의 노출과 잠재적 수소발생을 막기위해 물보충이 요구된다.

후쿠시마 사고에 따른 WANO SOER 2011-2 권고에 기초한 비상운전절차서 AOP G04- “사용후연료 냉각 비정상” 은 과열로 인한 연료다발 손상과 수소발생을 막는게 주 목표인 사용후연료저장조 냉각능력의 지연/연장을 위해 개발되고 검증되었다. 계산결과 사용후 연료다발이 잠기도록 물 보충을 위한 충분한 시간이 있다. 사용후연료 저장조 내부 콘크리트 표면을 100℃에 노출시켰을 때 구조물의 콘크리트 특성의 어떠한 중대한 감소도 나타나지 않았다.

사용후 연료저장조 냉각상실 사고의 경우 사용후연료저장조 룸내 방사성물질이 1.7mSv/h까지 심각하게 증가하기 시작할 때까지 9일, 사용후연료다발의 첫 번째 열이 처음 노출될때까지 15일로서 충분한 시간(완화되지 않는 사고의 진전을 기반으로)이 있어 비정상절차서 AOP-G04에 따라 성공적으로 관리될 수 있다.

정상냉각과 정상순수 보충수 공급 장기간 상실의 최악의 시나리오(저장조 내 물 비등 시작될때 까지 60시간 소요)에서 보충수 공급을 위해 호스연결을 통해 소방차나 이동형 펌프를 이용하여 사용후 연료를 잠겨있게 한다.

증발로 인한 수증기는 자연대류에 의해 배기된다. 휴대용 수소감시기를 현장에 설치가 요구된다.

저장조 수위, 온도, 저장조룸 내 수소농도와 방사선량 감시절차가 있다. 만약 가혹한 환경으로 운전원이 소화호스를 연결하지 못하게 된다면 내진검증된 새로운 소화수배관이 사용될 것이다. 새로운 물공급 배관 설치를 위한 설계변경이 진행중이며 이는 저장조 건물로 들어가지 않고 사용후연료저장조 건물 외부에서 제공된 연결구를 통해 내부로 물을 보충할 수 있도록 할 것이다.

APOP-G04 수행을 지원하기 위해 다음 설계변경과 운전조치가 이행되었거나 진행중에 있다. 첫째, 튜빙라인이 수소샘플을 위해 사용후연료 저장조 상부에 설치되었다. 둘째, 고정용 수위계측기가 사용후연료 저장조와 연료임시 저장조에 설치되었다. 셋째, 소방차나 이동용펌프(진행중)로 저장조에 물을 보충하기 위해 내진검증된 사용후연료 저장조 외부 연결 신규배관은 설치되어 있다. 넷째, 저장조 상부지역의 배기는 사용후연료 저장지역 문을 개방하거나 천정에 해치를 설치하고 벽면에 배기구(진행중) 설계에 의해 제공된다.

비정상절차서 APOP-G04 유효성 입증시 최악의 경우는 정상 보충수와 보조 소화수가 이용불가능 한 것으로 고려되었고 절차서를 따른 결과 소방차와 호

스를 사용하면 초기 사고후 보충수원은 30분만에 확보되었다.

결론적으로 사용후 연료 저장조 냉각상실의 결과로서 어떠한 부정적인면도 예상되지 않고 어떠한 사용후 연료 손상도 발생하지 않을 것으로 예상된다. 사용후 연료는 대기나 물속에 있더라도 재임계 가능성은 없다. 사용후 연료 저장조의 냉각 상실을 포함하는 사고의 느린 진행은, 심지어 최악의 경우 시나리오에 대해서조차도 연료가 적절하게 냉각되고 제한치를 초과하는 피폭 선량이 발생하지 않는다는 것을 보증하기 위한 비상운전절차의 이행을 위해 충분한 시간을 제공한다.

다) 방사능 누출 억제를 위한 조치의 적절성에 대한 결론

설계규정 및 사고관리 조치는 심각한 노심손상 시나리오를 포함하여 사고 범위에 대한 방사능 누출을 예방하고 완화하는데 있다.

중대사고 시나리오에서 격납건물 성능을 개선하기 위한 설계방안이 확인되었으며 이는 노심용융의 진행과 재배치를 막기 위해 칼란드리아 용기와 칼란드리아 볼트에 보충수 주입 수단, 수소관리를 위한 수소감시계통 및 피동축매형 수소재결합기의 설치 및 격납건물 여과배기계통 설치이며 이행될 것이다.

사용후연료저장조 냉각상실을 포함하는 사고는 방사능 누출의 위험은 없다.

5) 소외 비상대응 조직

루마니아 입법부에 따르면 국가 비상관리 체계는 “의사결정 조직 - 비상위원회, 행정조직 - 비상조사단, 운영조직 - 비상운영센터” 3가지 형태로 구성된다.

모든 결정, 집행 및 운영조직은 국가, 주, 지역 3단계로 설치된다.

국가 비상사태 위원회(CNSU)는 국가단계에서 의사결정 조직을 대표한다. 국가 비상사태 위원회는 국무총리 산하에 설치되며 내무부장관에 의해 관리된다. 모든 정부, 주 및 지방 위원회는 국가 비상사태 위원회하에 있다. 주/지방 비상위원회는 주지사/지방 시장에 의해 지시를 받는다.

내무부 특별조직인 비상사태 종합조사단이 국가 단계에서 행정조직으로서 설립되어졌다. 비상사태 종합조사단은 국가차원에서 비상사태의 예방과 관리의 무한한 조정책임을 가지고 있다. 주 차원에서도 비상조사단이 설립되어져 있으며 대중에 대한 전문 비상 서비스로서 활동한다.

각 비상사태 조사단내에 비상운영센터가 설립되어져 있으며 지속적인 비상 활동과 함께 사고시 비상조직을 가동하기위해 준비되어 있다. 이들 비상운영센터는 방사선 사고를 포함한 모든 형태의 비상통보를 받고 있다. 또한 국가차원의 책임조직들은 그들의 활동분야에서 법에 따라 비상운영센터를 운영하고 있다. 비상사태 종합조사단의 국가운영센터는 국가차원에서 운영조직을 대표한다.

원자력사고나 방사능 비상인 경우 법적인 책임을 이행하기 위해 원자력규제위원회는 비상관리에 대한 국가 조직의 일원으로서 자체 비상대응센터를 가지고 있다. 그곳은 모든 방사선 비상과 관련한 국가적 접촉점이다. 이는 국가체계의 일부로서 비상사태 종합조사단 운영센터와 공공기관의 다른 운영센터와 소통을 한다.

법에 의하여 내무부장관은 핵물질 및 방사성물질의 비상 상황에 대한 비상 관리 책임을 갖고 있고 핵물질 사고 및 방사성물질 비상시 국가 소관 관청이 되는 비상사태 종합조사단과 원자력규제위원회의 관리 책임을 가지고 있다. 지방차원에서, 중재는 지방 비상위원회에 의해 조정되고 지방 대응군에 의해 수행되어 진다. 비상사태가 지방당국에 의해 해결되지 않을 때 지방 중재를 지원하기 위해 국가차원(국가 비상사태 위원회와 비상사태 종합조사단)의 활동이 시작된다. 비상사태시 공동활동과 정보교환을 위해서 문서화된 동의서와 협정서가 지방과 중앙차원의 책임있는 조직 사이에 체결되어 있다.

대응조직은 다음의 책임을 가진다.

- ① 적절한 비상계획을 상세히 기술하고 최신본으로 개정
- ② 비상사태시 주민, 환경 및 재산보호, 의료구호, 재정보상 등을 위한 법적 근거인 법, 조례, 시행령과 같은 수단에 의한 보장
- ③ 적합한 중재조직의 설립 및 유지 : 핵안전 및 방사선 방호, 시료채취 및 분석에 대한 조언, 경찰, 군 및 소방대와 접촉 유지, 물관리국, 농업생산 통제국, 의료서비스, 기상예보 시설들로부터 조언을 받고 접촉 유지
- ④ 비상 전문기술을 위한 기술적 수단과 충분한 통신수단이 구비된 비상조정센터를 조직하고 유지
- ⑤ 비상사태시 비상요원의 훈련수준과 장비의 가용성을 유지하기 위한 연습과 훈련 준비
- ⑥ 국가간 비상인 경우 비상 발령을 위한 수준 확립

바. 종합결론

사업자는 스트레스 테스트 규격서가 요구하는 모든 사건들과 그 사건들의 조합 그리고 중대사고 예방과 완화 시나리오에 적용된 고유 설계특성 및 공학적 계통들, 열수송 경로의 이용 가능성과 성능, 잠재적인 베틀효과와 운전원 조치 가능시간 등을 포함한 여러 가지 중대사고관리 전략에 대한 종합적인 정보를 제공하고 있다. 또한 발전소 고유의 중대사고관리지침에서 언급한 완화되지 않는 중대사고 시나리오와 사고완화 전략 분석을 모두 다루었다. 이들은 방대한 분량의 참조자료로 뒷받침되고 있으며 대부분이 과거 30년 동안의 연구결과 COG가 개발한 중대사고 해석 및 사고관리지침에 관한 것이다.

1) 기 수행된 중요 강화방안

특정 비상운전절차서가 발전소 정전과 사용후연료저장조 냉각 상실에 대응하기 위해 개발되고 이행되었다. SBO 시나리오에 대한 보호를 강화하기 위해 이동용 디젤발전기가 구매되었고 시험되었으며 소내에서 이용가능하다.

1차 최종열제거원 상실 및 SBO에 대한 발전소 대응-복합사건은 일차적 대응을 위해 어떠한 소외장비에도 의존하지 않는다. 발전소내에서 모든 필요한 설비와 자원은 이용가능 하며 장기 SBO에 대응하기 위해 충분하다. 더 장기 복구단계를 위해 국영 송전회사인 “Transelectrica”사와 소외전력 공급을 회복하기 위해 협력할 것이다.

후쿠시마 사고후, 시정조치들은 이 사고로부터 얻은 교훈을 고려하여 개발되고 이행되어졌다. 기존에 수립된 비상계획 및 절차서, 협정, 의정서 및 계약이 재평가되었거나 개정하여 중대사고와 자연재해의 동시발생에 대한 비상대응 능력을 더욱 향상시켰다. 특히 “국가 특별 통신서비스(NSCS)”와 함께 실제 통신체계를 보완하고 개선하는 조치를 취했다.

후쿠시마 사고 교훈을 반영할 목적으로 국가(소외) 비상대응전략이 검토중이다.

2) 안전문제

완화되지 않는 사고 시나리오 분석에 의해 확인된 잠재적인 베틀효과와 사고 발생전 이용가능 시간은 SAMG에 설명되어 있으며 베틀효과 예방을 위한 조치를 포함하고 있다.

3) 잠재적 안전성 개선 및 예상된 추가작업

원자력규제위원회의 검토결과 체르노보다 원전의 설계기준을 초과하는 사고로 인한 일반대중에 대한 위험성은 낮으며 통제가능한 수준인 것으로 확인하였다.

사업자는 잠재적 설계개선사항을 확인하였으며 현재의 안전 여유도를 더욱 높이고 중대사고로 인한 위험성을 감소시키기 위해 이의 적용을 고려하고 있다.

사업자는 이들 개선사항을 적절한 기간내에 이행하기 위해 최선을 다하고 있으며, 모든 자금은 이미 확보되었다.

사고결과 전개와 관련하여 2종류의 설계변경이 확인되었으며, 첫째는 중대 사고 예방 조치이고 두 번째는 중대사고완화 조치이다. 일반적으로 첫 번째에 우선순위를 주고 있으며 각각의 종류에 대한 설계변경의 내용, 적용기간, 목표 및 안전성 이득 등에 관한 관련정보는 아래 표에 요약되어 있다.

표 2.13 - 중대사고 예방 강화를 위한 설계변경

번호	설계변경 내용
1	이동식디젤발전기 Set 추가제공 및 기존 비상전력공급모선에 연결
2	발전소내 비상사태시 필요한 이동식 장비 보관을 위한 내진검증 저장소 설치
3	I, II등급 축전지의 내진견고성 개선
4	SB0후 주증기안전밸브를 개방하기 위한 설비 제공
5	비상시 기기냉각원수/기기냉각수 계통의 열교환기와 증기발생기의 1차측에 소방차와 플렉시블 컨듀트를 이용하여 물을 보충하기 위한 연결설비 제공
6	소방차를 이용하여 사용후연료 저장조 외부로부터 사용후연료저장조에 물을 보충하기 위해 필요한 영구 연결설비 제공
7	부지 비상통제센터(ECC)의 내진 견고성 개선

표 2.14 - 중대사고결과 완화 및 노외 노심손상 상태로의 진전 방지를 위한 설계변경

번호	설계변경 내용
1	원자로건물 외부로부터 칼란드리아 용기로 물을 주입하기 위한 설비 제공
2	원자로건물 외부에서 칼란드리아 볼트로 물을 주입하기 위한 설비 제공
3	격납건물 여과배기설비 설치
4	격납건물내 피동축매형 수소재결합기 설치
5	격납건물 수소농도 감시계통 설치
6	필수안전변수 감시루프 환경검증 개선 및 측정범위 확대

표 2.15 - 체르나보다 원전 기타 개선사항

번호	개선사항	비 고
1	극심한 기후 조건들에 대비 절차를 구체적으로 개정	강풍의 경우 취해야 할 조치 포함
2	이동형디젤펌프 구매	소화수탱크에 취수구로부터 물공급
3	별도 부하접속 판넬 설치	이동형디젤발전기 연결시간 단축
4	우물로부터 소내용수계통 물 공급을 위한 펌프 2대에 전력공급 위해 이동형 디젤발전기 구매	
5	특수 통신전화 및 위성전화 설치	통신설비 신뢰성 증가 조치
6	발전소로부터 60km 떨어진 위치에 대체 소외비상통제센터 설립	소내 비상통제센터 이용불가 대비
7	격납건물 에어록 밀봉위해 계측용공기공급 및 백업용질소탱크 공급 필요	규제기관 권고
8	사용후연료저장조에 사고관리를 위한 휴대용 수소감시기 설치	
9	사용후연료저장조 지역 배기위해 천정에 해치 설치하고 벽면에 배기구 설치	

10	최악의 가뭄에도 물공급위해 두곳에 깊은 지하 우물파고 비상운전절차서 작성	2003년 다뉴브강 저수위에 의한 1호기 정지경험반영, 기 조치완료
11	중대사고 진입조건을 비정상운전절차서에 반영 상호 연결	기개발, EOP에서 SAMG 진입 가능
12	수소샘플을 위해 사용후연료저장조 상부에 튜빙라인 설치	기 설치완료

제4절 국내원전 안전점검과 EU Stress Test 비교

1. 수행과정 비교

국내 원전 안전점검은 규제기관(정부) 주도로 수행되었고, 점검결과에 대해 규제기관의 검토를 통해 개선사항을 2015년까지 이행완료 할 것을 사업자에게 요구한 반면, EU Stress Test는 서유럽규제자협회에서 유럽연합 원전보유국 모두가 통일된 기준하에 사업자 자체적으로 체계적인 점검을 할 수 있도록 상세기준을 수립하였다. 사업자들은 그 기준에 따라 평가하여 개선사항을 도출하고 이행하거나 이행을 계획하고 동시에 그 결과를 해당국의 규제기관에 제출하여 검토를 받고 당사국 규제기관은 국가보고서를 발행하여 유럽연합 규제자 상호검토를 통해 최종 개선사항을 도출 유럽 원전이 이를 이행토록 하는 체계적인 수행과정이었다.

표 2.16 - 수행과정 비교

구분	기준수립	점검수행	검토	상호검토
국내점검	규제기관(정부) 참조사항수준(27개항)	규제기관(정부) (정부,산,학,연공동)	규제기관(정부) 결과 구체화	-
EU S.T.	서유럽규제자협회 구체적 점검방안 수립	사업자 자체	해당국가 규제기관	유럽연합 규제자그룹

2. 점검기준 비교

국내원전 안전점검 기준과 유럽연합 점검 기준을 비교했을 때 국내원전 안전점검은 6개 점검분야로 사고예방과 대응, 연구로, 핵주기시설 및 방사산진료기관 등의 시설 까지를 포함하는 포괄적인 점검 기준으로 점검과정에서 전문가 개

인 의견 개입 가능성이 많은 구체적인 기준이었다. 반면 유럽연합 점검기준은 3개 분야로 사고예방에 대해 평가내용 및 평가방법 등을 구체적이고 세부적으로 설정하여 다수의 유럽원전이 동일한 형태의 보고서가 나올 수 있도록 하였다.

따라서 유럽연합 점검기준은 3개 분야에 국한되어 사고예방 측면에 초점이 맞추어져 있지만 세부 점검기준이 국내 원전 안전점검 기준보다 더 구체적이다.

아래에서 국내원전과 유럽원전의 점검 기준에 대해 상세히 살펴보자

가. 국내원전 안전점검 기준

국내 원전 안전점검 기준은 제1분야 지진·해일에 의한 구조물 안전성, 제2분야 침수 발생시 전력, 화재, 냉각계통의 취약성, 제3분야 중대사고 발생시 대응절차 적절성, 제4분야 비상대응 체계의 적절성, 제5분야 장기 가동원전 및 신형원전, 제6분야 연구로, 핵주기시설 및 방사선비상 진료기관 등 6개 분야에 27개 주요 점검 항목(표 2.1 참조)을 기준으로 21개 가동중 원전(PWR 17 Units, PHWR 4 Units), 연구로, 핵주기 시설, 방사선비상 진료기관 등에 대해 안전성을 점검하였다.

나. 유럽연합 안전점검 기준

반면 유럽연합은 발전소 일반 특성, 지진, 홍수, 전력상실 및 최종 열제거원 상실, 중대사고관리에 대해 평가하기 위한 기준인 Stress Test Specification을 발행하여 전 유럽원전이 동일한 기준으로 각국의 발전소 안전성을 평가하도록 하였다.

유럽연합 점검기준을 살펴보면 기술적인 범위는 초기사건 실패의 조합을 포함 후쿠시마사고를 고려하여 첫째, 초기사건(지진, 홍수), 둘째, 안전기능 상실결과 소내정전을 포함한 전력상실, 최종열제거원 상실 및 이 둘의 조합, 셋째, 중대사고관리 문제, 즉, 노심/사용후연료저장조 냉각기능과 격납건물 건전성 상실을 막고 관리하기 위한 수단들에 대한 검토, 발전소 안전기능 유지를 위해 소외 지원과 같은 비상대응조치를 포함할 수도 있지만 이는 스트레스 테스트 범위 밖에 있다. 넷째, 상기 둘째와 셋째는 후쿠시마와 같은 쓰나미와 지진에 국한되지 않고 홍수와 나쁜 날씨조건을 포함한다. 다음으로 포함되어야 할 정보로서는 첫째, 발전소 설계기준에 반영된 규정과 설계요건에 대한 적합성이 평가되어야 한다. 둘째, 설계기준 초과사고에 대한 안전관련 계통, 구조물 및 기기의 견고성과 심층방호 개념의 효과가 평가되어야 한다. 설치 및 조치의 견고성에 관해서

는 이어진 사건(벼랑끝 효과⁹⁾)의 단계적 변화를 확인하는데 초점을 둔다. 필요 시 이러한 상황을 피하기 위한 조치를 고려한다. 셋째, 다른 방어수준과의 독립성을 강화하거나 기기의 저항성을 개선하는 관점에서 고려된 심층방어 수준을 개선하기 위한 가능성뿐만 아니라 예상된 극한 시나리오를 피하려는 보호조치를 설명해야 한다. 분석 필요시 다음과 같은 현장점검을 통해 확인해야 한다. 첫째, 기본안전기능(반응도관리, 연료냉각, 방사능 차폐)과 지원기능(전력공급, 최종열제거원을 통한 냉각)을 유지하기 위한 수단들, 둘째, 이동용 외부 수단의 가능성과 이용조건, 셋째, 하나의 원자로로부터 다른 원자로를 지원하기 위한 수단을 이용하기 위한 어떤 기존 절차, 같은 부지에 있는 다른 원자로의 기능에 대해 하나의 원자로의 의존관계 등을 확인해야 한다.

중대사고관리를 위해 사업자는 첫째, 연료손상 전 시간, 노심이 원자로용기에 있다면 냉각수가 노심 상부에 이르기 전 시간과 연료손상 전 시간, 둘째, 연료가 사용후연료저장조에 있다면 저장조가 끓기 전 시간, 방사선차폐가 적절하게 유지될 때 까지의 시간, 냉각수가 연료집합체 상부에 이르기 전 시간, 연료손상 시작 전 시간 등을 확인하도록 하고 있다.

3. 점검결과 비교

국내원전 안전점검은 후쿠시마 사고와 같은 설계기준 초과와 최악의 사고를 가정하여 점검을 실시했으며, 점검결과 지진 자동정지 설비 설치를 포함하여 운영중인 원전(장기 가동원전 포함), 연구로·핵주기 및 방사선 비상진료기관까지 포함하여 총 50건의 개선사항을 도출하였으며, 점검이후 10건의 추가 개선사항이 도출되어 총 60건을 조치되었거나 조치중에 있다. 이러한 개선사항은 건설중인 5개호기(PWR)와 이후 건설되는 원전에 대해서도 적용하도록 하였다.

체르노보다 원전은 지진 및 홍수, 전력상실 및 최종열 제거원 상실과 중대사고관리 3개분야에 대해 이동식 디젤발전기 추가 설치 등 25개 개선사항(중대사고 예방 및 완화를 위한 설계변경 13건, 기타 12건)을 도출하였다. 이는 대부분 국내원전 안전점검 결과에 포함된 개선사항이거나 국내원전에 반영되어진 사항 또는 원전 특성상 적용 불필요한 사항들이다.

9) : 발전소 정전(station black out)시 배터리 용량의 고갈

따라서 국내원전과 체르나보다 원전의 스트레스 테스트를 결과를 비교할시 국내 원전 위치 및 특성과 다른 부분을 제외하고 국내원전 안전점검이 안전성 향상을 위해 더욱 기여한 것으로 판단되며 개선사항 목록 비교를 통해 국내원전 안전점검 결과가 유럽연합 스트레스 테스트보다 강력하고 적절함을 확인할 수 있다.

루마니아 체르나보다 원전의 스트레스 테스트 결과 개선사항에서 국내원전 안전점검 개선사항에 없는 사항으로서 국내원전이 향후 개선사항으로 도입할 필요가 있는 사항을 확인하였다. 이는 먼저, 사용후연료 저장조 상부에 수소 샘플을 위한 튜빙라인 설치, 둘째, 최악의 가뭄시에도 소내용수 공급을 위해 발전소 내에 깊은 우물을 파서 비상시 물을 공급할 수 있도록 하고, 이를 위한 비상운전 절차서를 작성하며, 전력상실에 대비하여 전용 이동형 디젤발전기를 구매하는 것이다.

다음은 국내원전 개선사항을 중심으로 체르나보다 원전 점검결과 개선사항을 확인해보고자 한다.

표 17 - 국내원전 및 체르나보다 원전 개선사항 비교

국내 개선사항		체르나보다 개선사항
1.		
지진 자동정지설비 설치	전원전	
안전정지유지계통 내진성능 개선	전원전	I,II 등급 축전지의 내진건고성 개선
원전부지 최대 지진에 대한 조사·연구	전원전	
주제어실 지진발생 경보창의 내진성능 개선	전원전	
월성원전 진입교량의 내진성능 개선	월성1~4	
(추가) 용수공급관료 내진성능 평가	전원전	
2. 침수,가뭄대비		
고리원전 해안방벽증축	고리1~4	
방수문 및 방수형 배수펌프 설치	전원전	(기타) 최악의 가뭄에도 물공급위해 두곳에 깊은 지하 우물파고 비상운전절차서 작성
원전부지 설계기준 해수위 조사·연구	전원전	(기타) 우물로부터 소내용수계통 물 공급을 위한 펌프 2대에 전력공급 위해 이동형 디젤발전기 구매
냉각해수 취수능력 강화 및 해일대비 시설 개선(고리1,2, 자재창고 침수에 안전한 위치로 이설)	전원전	(기타) 극심한 기후 조건들에 대비 절차서를 구체적으로 개정

앵커링(전원전), 월성 EPS 연료주입구 개선(월성1~4)	전원전 월성	
최종 열제거설비 침수방지 및 복구대책 마련(기기냉각해수계통 펌프의 전동기와 전력함 등 전기설비 방수조치, 전동기 예비품확보 및 기능상실시 복구절차마련)	전원전	
옥외 설치 탱크 방호벽 설치	전원전	
주증기안전밸브실(월성2~4) 및 비상급수 펌프실의 침수방지 대책마련(월성1~4)		
(추가) 울진1,2호기 제2 보조급수저 장탱크 설치	울진1,2	
3. 전력상실대비		
이동형 발전차량 및 축전지 등 확보(침 수에 안전한 위치에 구비, 임시전원 연결지점 확보)	전원전	이동식디젤발전기 Set 추가제공 및 기존 비상전력공급모선에 연결 (기타) 별도 부하접속 판넬 설치
대체비상발전기 설계기준 개선	전원전	발전소내 비상사태시 필요한 이동식 장비 보관을 위한 내진검증 저장소 설치
스위치야드 설비 관리 주체 개선	전원전	
사용후연료저장조 냉각기능 상실시 대책 확보	전원전	소방차를 이용하여 사용후연료 저장조 외부로부터 사용후연료저장조에 물을 보 충하기 위해 필요한 영구 연결설비 제공
(추가) SFP수위, 온도, 방사선계측기의 안전등급 적용	전원전	
(추가) SFP 비상전원 확보 관련 기술 지침서 개정(영광5,6제외)	전원전	
(추가) 월성1호기 지역공기냉각기 비 상전원 공급방안 마련	월성1	SB0후 주증기안전밸브를 개방하기 위한 설비 제공
4. 화재방호		
소방계획서 개선 및 협력체계 강화	전원전	
화재방호설비(소방차연계 대체수원 확보) 및 자체소방대 대응능력(화학소방차 운영 최소한 전문인력확보)개선	전원전	
원전 성능위주 소방설계 도입	전원전	

5. 대응		
피동형수소제거 설비 설치[격납건물 수소감시설비설치(울진1,2,월성1~4) 포함]	전원전 (고리1 제외)	격납건물내 피동축매형 수소재결합기 설치
		격납건물 수소농도 감시계통 설치
격납건물 배기 또는 감압설비 설치	전원전	격납건물 여과배기설비 설치
원자로 비상냉각수 외부 주입유로 설치	전원전	비상시 기기냉각원수/기기냉각수 계통의 열교환기와 증기발생기의 1차측에 소방차와 플렉시블 컨듀트를 이용하여 물을 보충하기 위한 연결설비 제공
중대사고 교육훈련 강화	전원전	
사고관리전략 실효성 강화를 위한 중대 사고관리지침서 개정(충수유로 가용성 및 냉각성능의 타당성평가 반영, 중대 사고대처용 필수기기와 계측설비 장기 소외전원상실 고려 생존성평가, 전원복구 우선순위에 근거한 전원절차 마련)	전원전	원자로건물 외부로부터 칼란드리아 용기로 물을 주입하기 위한 설비 제공
		원자로건물 외부에서 칼란드리아 볼트로 물을 주입하기 위한 설비 제공
		필수안전변수 감시루프 환경경증 개선 및 측정범위 확대
정지·저출력 운전중 중대사고관리지침서 개발	전원전	
(추가) 이동형디젤펌프 확보	전원전	(기타) 이동형디젤펌프 구매
(추가) 비상 충수용 장거리 호스 확보	전원전	
(추가) 광역재해완화지침서(EDMG) 개발	전원전	
(추가) EOP-SAMG 연계지침서 개발	전원전	(기타) 중대사고 진입조건을 비정상운전 절차서에 반영 상호연결
		(기타) 격납건물 에어록 밀봉위해 계측용공기공급 및 백업용 질소탱크 공급 필요
		(기타) 사용후연료저장조에 사고관리를 위한 휴대용 수소감시기 설치
		(기타) 사용후연료저장조 지역 배기 위해 천정에 해치 설치하고 벽면에 배기구 설치
		(기타) 수소샘플을 위해 사용후연료저장조 상부에 튜브라인 설치

6. 및 비상진료 체계		
원전인근 주민보호용 방사선방호 장비 추가 확보	전원전	
다수호기 동시 비상발령 등 방사선비상 계획서 개정	전원전	
장기 비상발령 대비 비상장비 추가 확보	전원전	
비상진료기관의 장비 추가 확충(원자력의학원)	의학원	
방사선 비상훈련의 강화	전원전	
장기전원상실시 필수 정보의 확보방안 강구 (필수기능감시계통과 안전정보표시계통 전원설비 보강, 원전주변환경감시기 침수방지책마련 및 비상전원추가 확보)	전원전	
보수작업자 방호대책 확보(협력사 방재교육 및 훈련토록 방사선비상계획서 개정, 표준화된 긴급작업자 구호 절차 마련)	전원전	
비상대응시설 개선(TSC 및 OSC내진성능 개선-고리, 침수방지능력 개선-고리, 영광1,2)	영광1,2 고리	부지 비상통제센터(ECC)의 내진 견고성 개선 (기타) 발전소로부터 60km 떨어진 위치에 대체 소외비상통제 센터 설립
방사선 비상시 정보공개 절차 개정	전원전	
비상계획구역 밖의 주민보호조치 평가	전원전	
비상경보시설의 성능 강화(비상전원 확보)	전원전	
(추가) 장기전원상실 대비 비상 통신 설비 확보	전원전	(기타) 특수 통신전화 및 위성전화 설치
7. 고리 1호기 및 장기가동 원전		
정기검사 등 안전검사 대폭 강화(경년 열화 완화대책 및 관리계획 수립 이행, 적합성입증-고리1~4, 영광1,2, 울진 1,2, 월성1)	월성 1 등	
주요 기기 및 배관의 가동중검사 강화	고리1	
경년열화관리계획(AMP) 통합관리방안 수립/이행	고리1	
주요 능동기기 성능변수 관리 강화 (안전관련펌프 및 밸브 성능변수 경향분석수행, 관리-고리/영광/울진1,2, 월성1~4)	월성1~4 등	

피로 관리 강화를 위한 피로 감시 시스템 설치(고리2~4, 영광1,2, 울진1,2)	고리 영광 울진1,2	
가압기 하부헤드 피로 건전성 강화 (고2,3,4,영1,2,울1~2)	2~4, 울진 1,2	
발전정지 유발기기의 신뢰도 증진	전원전	
운영 인력 적정성 평가	고리1,2	
소내 전력공급계통 신뢰도 향상	고리1	
구매 품질보증 체계 점검 강화	전원전	
8. 원자력연구원, 한전원자력연료(주)		
구조물의 내진성능 평가 및 주제어실 개선(원자력연구원)		
하나로 및 부대시설 부지 침수심 재평가(원자력연구원)		
복합적 방사선비상 상황 반영, 방사선 비상계획서 개정(원자력연구원, 한전원자력연료)		

국내 안전점검은 세계에 내 세울 수 있을 만한 안전성 향상을 위한 점검이라 생각된다. 국내원전의 안전점검이 더 포괄적이고 강력함에도 불구하고 월성1호기 계속운전 조건 충족을 위해 유럽연합 스트레스 테스트를 수행한 것은 물론 체계적 자발적 평가 측면에서 볼 때 유리한 점도 있지만 사업자는 물론 정부에 대한 신뢰의 문제가 국민의 마음속에 자리 잡고 있었기 때문이라 생각된다. 유럽연합과 달리 그 과정이 체계적이고 검토내용이 구체적이지 않았고 무엇보다 규제기관이 국민에게 안전성에 대해 기술적인 확신을 주지 못하고 국민의 눈치를 본 결과 우리 국민들이 국내원전 안전점검 결과에 대해 신뢰하지를 않았던 것이라 생각된다. 하지만 향후 국내원전 종합 점검시 유럽연합 스트레스 점검과 같은 명확한 기준설정에 따라 점검을 수행할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

제 3 장 결론

국내원전 안전점검은 정부 주도로 너무 급하게 추진함으로써 그 과정이 유럽 연합에 비해 체계적이지 못하고 점검결과 또한 규제기관의 단기간 검토에 의해 개선사항이 도출됨으로써 일부 이중 삼중의 개선사항이 도출되기도 하였다. 하지만 점검결과 개선사항은 스트레스 테스트 보다 더 광범위하고 안전성을 향상시키는 내용으로 안전성 향상측면에서 적절한 것으로 판단된다.

대표 원전인 루마니아 체르나보다 원전을 선정하여 검토 한바, 내용측면에서 살펴볼 때 유럽연합 스트레스 테스트는 부지특성은 물론 지진, 홍수, 악천후 조건, 전원 및 열제거원 상실, 중대사고관리에 대해 설계기준 및 설계기준 초과 사고에 대한 여유도를 재평가함으로써 안전성을 확인한 반면 국내원전 안전점검의 경우 지진/해일에 의한 구조물, 기기 안전성, 침수 발생시 전력, 냉각, 화재방호계통의 건전성, 중대사고 대응, 비상대응 및 비상진료 체계 등의 광범위한 분야 대한 안전성을 점검하였다. 비록 체르나보다 스트레스테스트 보다는 세부 점검기준에서는 구체적이지 않았지만 설계기준사고 확인 및 그 이상의 사고에 대한 개선사항을 볼 때 다양하고 강력한 개선사항을 도출함으로써 원전안전성을 확보하는데 더 적절한 것으로 판단된다. 그러나 향후 유럽연합 스트레스 테스트 처럼 설계기준 초과 사고에 대한 조치수단 확인 및 여유도 평가와 같은 적절한 안전성 재평가 체계는 국내 도입 시 체계적인 국내원전의 안전성 및 경제성 확보에 유리할 것이다.

향후 국내원자력 사업은 사회적 변화에 따라 갈수록 어려워지고 경제성에서도 타 원전에 비교우위를 차지하기 어려울 것으로 전망된다. 그 이유는, 첫째 원전 안전운영 감시에 대한 지역민의 참여 의지가 갈수록 커짐에 따라 그에 대한 대응 소요비용 및 손실 비용이 크게 증가할 것이다. 둘째, 세계적인 기준에 부합하는 원전 안전성 개선을 위한 비용이 갈수록 증가할 것이다. 셋째, 태양광 전 기생산 기술 발달, 획기적인 전력저장 능력의 발전 등 신재생에너지의 효율과 경제성 우위에 의한 경쟁력 향상으로 갈수록 원전의 입지는 감소할 것이다. 하지만 탄소 저감을 위한 측면 및 에너지 자원의 부족국으로서 원전의 역할은 기대할 만 할 것이다.

아울러 국내원전의 안전성 향상을 위해 체르노보다 원전의 스트레스 결과로부터 얻은 국내원전에 추가 적용 검토사항으로 향후 극심한 가뭄 또는 지진에 의한 발전소 내 용수 공급 불가에 대비하여 발전소 내 깊은 우물을 파서 비상시 공급할 수 있도록 하는 사항과 이에 소용되는 펌프에 전원을 공급할 수 있는 소형 이동형 발전차량 구입을 추가로 검토할 필요성이 있는 것으로 여겨진다.

【참고문헌】

1. 제43차 원자력안전위원회 “국내원전 안전점검 세부계획” , 2011.3
2. EU "Stress tests" specifications(European Nuclear Safety Regulatory Group, 2011
3. ROMANIA, National Report on the Implementation of the Stress Tests, 2011.12
4. 국내원전 안전점검 결과 보고서(KINS/AR-916), 2011.5.4.
5. 후쿠시마 원전사고 이후의 국내원전 전력설비 신뢰도 확보방안(대한전기학회, 2011년 제60권 제10호)
6. 후쿠시마 원전사고 후속조치 이행현황 및 향후계획, 원자력안전위원회, 2014.3.
7. 2012 Nuclear Generation Dictionary(산업부). 2013