

The Improvement of OPR1000 and APR1400 EOGs to Cope with the Multiple Failure Accidents and Beyond Design Basis External Event

Jae Min Park, dong Hyun Cho, Chang Gyun Lee, Jae Yong Huh, KEPCO E&C, Inc., Safety Analysis Dept., 989-111 Daeduk-Daero, Yusong-gu, Daejeon, KOREA 34057
Corresponding Author : parkjm@kepc0-enc.com

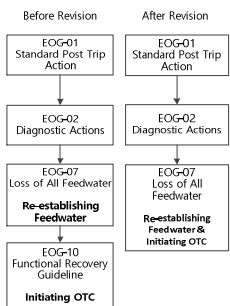
INTRODUCTION

2011년 후쿠시마에서 지진에 의해 쓰나미가 발생하여 원자력발전소의 비상전원 공급과 배전계통의 이용이 불가능하게 되어 안전기능이 유지되지 못하는 극한재해 사고가 발생하였다. 이 사고로 다량의 방사성 물질이 외부로 유출되고 대중과 환경에 막대한 피해를 입혀 세계 각국의 원전 설비를 재점검하고 대응체계를 재정립하는 계기가 되었다.

국내에서는 2016년에 원자력안전법 개정에 따라 다중고장사고(Multiple Failure Accident) 발생시 사고를 완화[1]하기 위하여 비상운영지침서 (Emergency Operating Guidelines) [2,3]의 복구 전략을 개선 중이며, 후쿠시마 사고와 같은 극한재해 사고 발생시 일부 비상운영지침서와 다중방어운영지침서(MACST Operating Guidelines) [4,5]를 연계하여 발전소를 안전하고 안정된 상태로 복구할 수 있는 전략이 개발중이다. 한국표준형원전과 신형경수로 1400 원전은 설계 특성이 유사하므로 개선된 복구 전략도 유사하다.

본 논문에서는 설계기준을 초과하는 자연재해 사고 및 다중고장사고에 대비하여 개선된 한국표준형원전과 신형경수로 1400원전의 비상운영지침서 복구 전략을 기술하였다.

EOGs Improvement for Multiple Failure Accidents

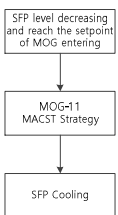


■ 급수완전상실사고 (TLOFW)

급수완전상실사고는 주급수가 상실된 후 보조급수계통 기능이 상실되어 증기발생기(S/G)로의 급수가 완전히 중단되는 사고이다. 급수가 상실된 후 원자로냉각재계통(RCS)의 감압 및 비상노심냉각재계에 의한 주입방출운전(Feed & Bleed Operation)을 통하여 노심의 붕괴열을 제거함으로써 노심의 손상을 방지할 수 있다. 이를 반영하여 기존 급수완전상실 지침서(EOG-07)에 주입방출운전 전략을 추가하였다. 따라서 급수완전상실사고가 발생한 후 기능회복지침서에 진입하지 않고도 주입방출운전을 신속히 수행할 수 있다. 그리고 기존 기능회복지침서의 주입방출운전 전략은 기존과 동일하게 기능회복지침서에 유지되어 있다.

■ 정지냉각기능 상실사고 (LOSC)

정지냉각기능 상실사고는 원자로정지 이후 정지냉각계통 운전 중 안전설비의 다중고장으로 정지냉각계통의 노심 열제거 기능이 상실되는 사고이다. 이를 복구하기 위해 중력충수 또는 강제 충수를 이용하여 RCS를 충수한다. 현재 이러한 정지냉각기능 상실사고를 복구하기 위해 '부분 충수 운전 중 정지냉각기능 상실' 정지비상운영지침서(Shutdown EOG)가 개발되었다.

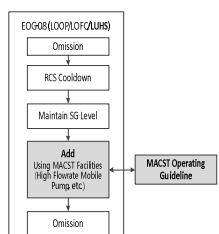


■ 사용후연료저장조 냉각기능 상실 (LOSFPC)

사용후연료저장조 냉각기능을 상실시 사용후연료저장조의 비등으로 저장조 수위가 지속적으로 감소할 수 있다. 사용후연료저장조 수위가 감소할 경우에는 사용후연료저장조를 보충하기 위하여 MACST 설비(저압 이동형 펌프 및 소방차 등)를 확보하고 대체 주입유를 통하여 안전한 수위에 도달할 때까지 사용후연료저장조 냉각수를 공급해야 한다. 이를 위하여 MOG-11이 개발되었다.

■ S/G 전열관 다중파단사고 (MSGTR)

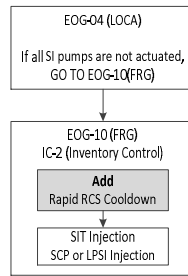
S/G 전열관 다중파단사고가 발생하면 원자로냉각재가 이차계통으로 누출되고, 누출된 원자로냉각재는 주중기안전밸브를 통해 대기로 누출될 수 있다. 따라서 파단된 S/G가 확인되면 파단측 S/G 고수위 방지를 위해 주중기격리밸브 우회밸브 및 취출계통을 사용하여 신속하게 S/G 수위를 조절하여 누출된 원자로냉각재가 주중기안전밸브를 통해 대기로 누출되지 않도록 해야 한다. 이를 위하여 건전한 S/G 수위 유지 보다 후순위에 위치하던 격리된 S/G 수위 유지 조치가 먼저 수행할 수 있도록 증기발생기 전열과파열(EOG-04)를 개정하였다.



■ 최종열제거원 상실사고 (LUHS)

정상운전 상태에서 1차기 냉각해수계통의 기능이 상실되면, 최종열제거원 상실사고를 복구하기 위해 소외전원/강제순환/최종열제거원상실 지침서(EOG-08)에서 고유량 이동형 펌프 등의 MACST 설비를 사용하기 위하여 다중방어운영지침서와 연계되며, 다음의 주요 조치가 수행된다.

- > 기기격실론 개발
- > 사용후연료저장조 수위 확인
- > MACST 설비 배치
- > RCS 냉각
- > S/G 수위 유지
- > 고유량 이동형 펌프 등 설치

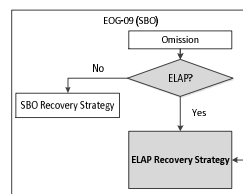


■ 소형냉각재상실사고와 동시에 발생하는 안전주입 상실사고 (SBLOCA with SI Fail)

소형냉각재상실사고와 동시에 발생하는 안전주입(고압안전주입 또는 재순환) 상실사고는 소형냉각재상실사고가 발생한 이후에 안전주입계통이 실패함으로써 더 심각한 상태로 진행되는 사고이다.

소형냉각재상실사고시 S/G의 급속냉각은 RCS 감압에 효과적이다. 이를 위하여 기능회복지침서(EOG-10)에 S/G 급속냉각 조치를 추가하였다. 한국표준형 원전의 경우, RCS의 급속냉각에 따라 안전주입탱크(SIT) 및 저압안전주입이 주입된 후 RCS의 온도는 급격히 감소하여 과냉각 액체상태로 유지될 수 있다. 이후 RCS의 재고량 회복 및 압력 상승으로 저압안전주입 유량이 감소하고, SIT 주입이 중단되며, 저압안전주입과 파단방출 유량이 균형을 이루어 안정적인 냉각이 유지된다. 신형경수로 1400원전의 경우에는 S/G의 급속냉각에 따라 SIT가 주입되고 원자로냉각재의 온도는 급격히 감소하여 과냉각액체상태로 유지된다.

EOGs Improvement for BDBEES



■ 장기교류전원 완전상실사고 (ELAP)

후쿠시마 사고와 같이 극한재해에 의해 원자력발전소의 모든 교류전원이 상실후 장기화되는 ELAP에 대처하기 위하여 MACST 전략을 교류전원 완전상실 지침서(EOG-09)에 반영하였다.

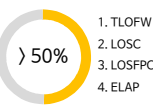
1단계 전략은 고정형 설비를 이용하여 발전소를 고온대기 상태로 유지한다. 이를 위하여 우선 축전지 수명 연장을 위한 비필수 부하를 차단 한다. 또한, 발전소 피해를 파악

후, MACST 설비를 배치하여 2단계 전략을 준비한다. 아울러, RCS 초기 냉각/감압 전략에 따라 RCS를 최대냉각을 이내에서 신속히 냉각한다.

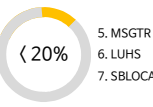
2단계 전략은 소내 MACST 설비 이용 전략으로써, 우선 1MW 이동형 발전차로 교류전원을 공급하고, 보조충전펌프 및 이동형펌프를 사용하여 RCS 재고량을 유지한다. 또한 이동형펌프를 이용하여 S/G 수위를 유지한다. 이때 MACST설비의 조치는 다중방어운영지침서에 따라 수행되며, 비상운영지침서와 다중방어운영지침서는 연계된다.

3단계 전략은 소외 자원을 공급받아 발전소를 안정한 상태로 유지하는 장기적 대응 전략이다. 장기적 복구전략에는 해당 발전소 부지 내 및 부지 이외의 타 원전 부지의 소외자원까지 포함한다. 우선 3.2MW 이동형발전차를 이용하여 기기냉각수계통 및 기기냉각해수계통의 운전을 위한 전원을 공급한다. 만약, 기기냉각해수펌프가 운전 불가능할 경우에는 고유량 이동형펌프를 이용하여 기기냉각수열교환기에 해수를 공급한다. 4.16kV 안전등급전원 및 최종열제거원이 확보되면, 정지냉각계통을 운전하여 발전소를 안전정지 상태로 유지한다.

RESULTS



1. TLOFW
2. LOSC
3. LOSFPC
4. ELAP



5. MSGTR
6. LUHS
7. SBLOCA with SI Fail



8. ISLOCA
9. ATWS
10. SBO

■ 지침서 대량 변경

급수완전상실사고 지침서는 사고완화전략이 추가되었으며, 정지냉각기능 상실 및 사용후연료저장조 냉각기능상실 사고는 새로운 지침서가 개발되었다.

■ 지침서 일부 변경

증기발생기 다중전열관 파단사고, 소외전원/강제순환/최종열제거원상실 사고 및 소형냉각재상실사고와 동시에 발생하는 안전주입 상실사고와 관련된 지침서는 일부 변경되거나 추가되었다.

■ 지침서 변경 없음

계통간 냉각재상실사고, 정지불능이상운전과도 및 발전소 교류전원 완전상실사고는 기존 지침서에 기반되어 있었으므로, 변경사항이 없어 본 논문에서 기술하지 않았다.

CONCLUSIONS

2011년 후쿠시마에서 쓰나미로 인하여 발전소의 비상전원 공급과 배전계통 이용이 불가능하고 열제거원이 장시간 상실되어 안전기능이 유지되지 못하는 사고가 발생하였다. 이 사고로 국내에서는 2016년부터 다중고장사고 및 극한재해 사고를 반영한 비상운영지침서가 개발되었다. 개발된 비상운영지침서는 9개의 다중고장사고 및 극한재해사고에 대비하여 비상운영지침서를 개선하고, MACST 전략을 수행하기 위한 다중방어운영지침서가 개발되었다. 그 결과 6개의 비상운영지침서가 개선되었으며, 13개의 다중방어운영지침서 및 1개의 정지비상운영지침서가 개발되었다. 극한재해 사고 복구의 주요 전략은 비상운영지침서를 이용하여 수행되며, 주요 전략을 보조하기 위하여 MACST 설비를 사용하는 전략은 다중방어운영지침서에서 수행할 수 있도록 연계되어 발전소를 안전하고 안정된 상태로 유지하도록 개선되었다.