

경수형 원전의 중대사고관리계획 안전심사지침(안) 개발 Development of the Safety Review Guideline for the Severe Accident Management Program of PWR plants

김세원, 금오현, 박재홍, 이석호, 류용호

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

정부는 “원자력발전소 중대사고 정책” (과학기술부, 2001.8.30)에 따라 중대사고관리 및 중대사고정책과 관련된 심사지침의 작성을 한국원자력안전기술원에 요구하였다. 또한 중대사고정책에 따라 원전 운영자는 각 발전소 별 중대사고관리계획을 2008년까지 수립할 예정이며 표-1에 이들 상세 일정이 제시되어 있다. 중대사고관리계획 안전심사 지침(안)의 목적은 사업자의 중대사고관리계획 적합성 검토에 사용될 지침을 작성하는데 있다. 이를 위해 본 연구에서는 중대사고관리계획에 대한 각국의 기술현황 검토를 수행하고 국내 실정에 적합한 “중대사고관리계획 안전심사지침(안)”을 개발하였으며 이를 영광 5,6호기의 중대사고관리계획 관련 문서에 시범 적용한 결과 안전심사지침(안)의 내용은 전체적으로 타당한 것으로 평가되었다. 이 지침(안)은 2002년 후반기에 관련기관의 의견을 수렴하여 필요 사항의 보완 후 안전심사지침 19.3(중대사고관리계획)으로 확정하고 가동원전 및 신규 발전소의 안전심사에 사용할 예정이다.

Abstract

MOST (Ministry of Science and Technology) asked the KINS (Korea Institute of Nuclear Safety) to develop the safety review guidelines related to the severe accident policy and the severe accident management in accordance with the "severe accident

policy statement: MOST, 2001.8.30). On the other hand, the licensee of nuclear power plant has the planning to establish the severe accident management programs for the individual plant by the year 2008 and Table 1 represents detailed schedule of these plan. The purpose of safety review guideline(SRG) of severe accident management program (SAMP) is to develop a guideline which will be used to review the validity of the licensee's SAMP. To accomplish above purpose, technical review performs for the foreign countries of their SAMP status and develop a "Safety Review Guideline (SRG) of Severe Accident Management Program" which is suitable for Korean plants. Application results this SRG to the SAMP of YGN 5,6 are generally acceptable. KINS will improve this SRG after comments from the domestic nuclear industry during 2002 and fix it as the KINS's SRG 19.3 (Severe Accident Management Program). It will be used to review the SAMP of operational and newly constructed plants in Korea.

1. 서론

중대사고관리에 대한 규제 입장은 각 나라의 원전 규제환경과 사업자의 인식수준에 따라 상당한 차이를 보이고 있다. 예로서 각 나라에서 중대사고관리와 관련된 각종 지침의 개발 주체는 규제기관이 아닌 사업자가 담당할 수도 있으며, 규제기관은 이를 승인 또는 허가제도를 통해 검토하거나 혹은 단순히 참고자료로 사용할 수도 있다.

국내에서는 최근 정부가 제시한 “원자력발전소 중대사고 정책” (과학기술부, 2001)에 따라 중대사고 안전목표, 확률론적 안전성평가, 중대사고 대처능력 및 중대사고 관리계획에 대한 관련 지침서의 작성이 한국원자력안전기술원에서 진행되고 있다.

외국의 OECD 국가간 사고관리계획 검토에 따른 주요 비교 항목은 개발된 사고관리전략 및 지침의 기술적 근거, 비상운전절차서 및 비상계획과의 연계성, 지침서 진입조건, 전략수행 우선순위 및 제어도, 전략 수행에 따른 부정적 영향 평가 수행, 장기 회복조치 및 종결지침, 발전소 보완설비의 필요성 및 설비설치, 훈련 및 교육계획 같은 사항이 포함되어 있다. 이들 항목은 중대사고관리 지침 개발시 일반적으로 고려해야할 항목으로써 국내 원전의 경우에도 중대사고관리지침서 개발을 위해서는 DB (Data Base) 구축, 사고관리전략의 분석, 의사결정 체제의 분석, 계측기 및 필수 정보의 분석 등이 요구된다. 중대사고 DB 구축에서 고려해야할 사항은 최종안전성분석보고서(FSAR: Final Safety Analysis Report), 비상운전절차서(EOP: Emergency Operating Procedure), 비상계획(EP:

Emergency Plan), 발전소별 안전성점검(IPE: Individual Plant Examination)결과, 사고 시나리오, 중대사고 현상, 기계-인간 연계(MMI:Man Machine Interface), 비상조직과 의사소통의 조직 인자 등이 있다.

여기서는 이러한 중대사고관리를 위한 미국을 비롯한 OECD 주요 국가의 중대사고관리 계획을 조사하고 국내의 “중대사고관리계획 안전심사지침(안)” 개발에 참고하였다. 이 지침(안)은 과학기술부의 “중대사고정책” 성명의 이행과 관련한 심사지침서의 개발 중 하나로서 발전소의 중대사고관리계획 적합성 검토에 사용할 예정이다. 2002. 4월부터 수행되는 3단계 중장기계획사업에서는 관련기관의 의견을 수렴하여 필요 사항의 보완 후 안전심사지침 19.3(중대사고관리계획)으로 확정할 예정이다.

2. 중대사고관리 기술배경

중대사고관리에 대한 미국 및 IAEA의 기본적인 입장은 동일하며 중대사고관리를 위한 5가지 핵심 요소는 다음과 같다.

1) 사고관리전략의 분석

사고관리전략은 사고시 발전소에 대한 어떠한 위협(Challenge)으로부터 회복하거나 위협(원자로반응도제어, 노심열제거 및 원자로냉각재계통 압력제어, 격납용기 열제거 및 압력제어)을 완화하기 위해 어떠한 기기나 설비를 이용하여 발전소 요원에 의해 취해지는 행위나 조치사항을 의미한다. 사고관리전략의 3대요소는 취해질 행위 혹은 조치사항(Action), 완화되어질 발전소 위협 그리고 사용될 기기(Equipment)를 의미하며 이들에 대한 검토 분석이 수행되어 노심손상을 예방하고 필요한 노내외 전략이 수립되어야 한다. 발전소에서는 보조전략을 사용할 수 있으며 보조전략은 한정된 발전소 자원의 보존 또는 재충전, 계통이나 기기의 혁신적 사용, 연동 및 기기보호 정지의 해제 등 중대사고를 회복하거나 완화에 사용할 수 있는 간접적인 전략을 뜻한다.

2) 의사결정체제의 분석

TCS(Technical Support Center), EOF(Emergency Operating Facility)의 구성 및 임무로서, 우선 조치사항의 결정, 중대사고절차서 사용여부 결정, 최선의 전략 선택, 전략 수행후 성공여부 결정 등이 평가되어야 한다. 중대사고 측면에서 비상조직 중 주제어실과 TCS의 임무 및 역할이 분명하게 규정되어야 하며 중대사고에 효율적으로 대처하기 위한 의사결정 과정이 명백히 규정되어야 한다. 예로서 미국 웨스팅하우스사의 SAMG(Severe Accident Management Guidance)에서는 중대사고관리의 최종 목표는 비상 사태를 종결

하는 것이며 이를 위해서 비상요원이 취해야할 주요사항은 다음과 같다고 언급하고 있다.

- 주어진 발전소 상태에서 중대사고관리절차서의 사용여부 결정
- 발전소 위협에 대해서 우선적으로 취해야할 조치의 결정
- 주어진 발전소 위협상태에서 가용한 최선의 전략 선택
- 전략 수행 후 그 전략에 대한 성공여부 예측 및 결정

3) 계측기 및 필수정보 분석:

발전소 위협의 파악 및 사고 완화와 회복 조치수행에 필요한 계측기 및 필요 정보(계산보조도구, 전산프로그램 등)가 마련되어 있어야 하며 계측기는 측정범위, 정밀도, 사고 상태에서의 성능, 설치위치에 따른 취약성 등이 평가되어야 한다. IAEA는 중대사고시 사고의 심각성 파악 및 사고관리 전략을 수행하기 위해서는 다음과 같은 정보를 얻을 수 있는 계측기나 지시기가 필요하다고 밝히고 있다.

- 중성자속
- 1차와 2차의 냉각재계통 및 격납용기의 온도
- 1차와 2차의 냉각재계통 및 격납용기의 냉각재 재고량
- 1차와 2차의 냉각재계통 및 격납용기의 압력
- 1차와 2차의 냉각재계통 및 격납용기의 방사능
- 격납용기의 대기 구성(예: 수소 농도)
- 안전기기의 상태

또한 중대사고 완화를 위한 기기의 이용가능성 평가는 다음과 같은 절차를 사용하도록 권고하고 있다.

- 중대사고 완화기능을 수행하는 데 필요한 기기와 이들 기기들이 작동해야 하는 환경 조건 목록
- 중대사고 완화기기가 기능을 수행해야 하는 적용대상 초기사건의 상황(발전소정전사고와 지진 등)과 환경조건(압력, 온도, 방사선량 등) 고려여부
- 안전등급의 전원 (Class 1E)과 대체전원이 중대사고 완화기기에 공급되는지의 여부
- 특히 설계기준사고에 대해 설치된 계측기를 중대사고 완화를 위해 사용하는 경우 검토대상 (계측기의 측정범위 및 정밀도, 중대사고 조건에서의 계측기의 성능, 계측기의 상한범위와 예상되는 중대사고 조건을 측정할 수 있는 지의 여부 그리고 계측기와 전선의 위치에 따른 취약성)

4) 중대사고관리 지침서/절차서 개발 및 검증

중대사고 기술배경서와 작성자 지침서에 포함되는 사항은 진단도구(진단 흐름도와 중대 위험 상태도), 사고관리지침(주제어실 및 TSC용), 계산보조도구, EOP 및 EP의 연계성 등이 있다. 국내원전의 경우 초기에는 웨스팅하우스사의 전략이 선택 예정이었으나 CE 전략과 혼합된 모델로 결정되었다. 웨스팅의 SAMG 특징은 주요 운전변수에 기반을 둔 징후 지향적 진단 체계로 쉽게 발전소 상태를 파악 가능하나, CE의 SAMG는 RCS와 격납용기의 손상 상태를 스스로 판단하여 완화 조치를 수행하도록 되어 있다.

5) 중대사고 훈련 프로그램 개발

중대사고 훈련 프로그램은 중대사고관리를 위한 의사결정 체제에서 중대사고관리절차서를 가장 효율적으로 관리하는데 목적이 있다. 훈련프로그램은 비상요원들이 발전소의 취약성과 함께 중대사고 현상에 대한 지식을 습득하게 하며 특히 계측기의 한계성과 이로부터 발전소의 정보를 정확하게 활용할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 또한 사고관리 절차서 상의 사고관리 전략이나 절차의 수행방법과 더불어 계산보조도구의 사용방법, 연동장치의 해제, 방재훈련 등도 훈련프로그램에 포함된다.

3. 지침(안)의 개발 및 주요내용

가. 중대사고관리계획 안전심사지침(안)

위에 기술된 사항들을 종합하여, 중대사고 관리계획 수립에 필요한 최소한의 기본 요건, 범위 및 기준을 설정하고, 중대사고관리계획에 필요한 세부 항목을 도출을 위해 비상 운전절차서 개발 계획과 유사한 개념으로 국내 원전에 적합한 “중대사고관리 안전심사지침(안)”을 개발하였다.

중대사고관리 안전심사지침(안)은 안전성분석보고서의 기술내용 및 관련 제출 문서에 대한 내용으로 구분하여 작성되었으며, 중대사고관리에 필요한 관련 제출 문서는 다음의 5가지 기본 문서에 대한 각각의 평가 기준을 제시하였다.

- 발전소 고유 기술배경서
- 발전소 고유 작성자지침
- 검증 프로그램
- 훈련 프로그램
- 이행 프로그램

상기 5개 문서들에 대한 상세 평가 사항은 안전심사지침서에 기술되어 있다. 발전소의 중대사고관리지침서는 발전소별 중대사고 취약성 평가, 직무분석, 인간신뢰도분석 및

확률론적 안전성 분석 결과에서 도출된 효과적인 중대사고 전략에 근거해야 하며, 중대 사고 현상 및 전략 분석결과에 따른 승인된 기술배경서에 근거할 것을 요구하고 있다. 작성자지침서에는 기술배경서를 사용하여 개발된, 사고관리절차서가 완전하고, 정확하고, 일관성이 있으며, 이해되고 수행하기에 쉽게 작성된다는 것을 확인하는데 충분한 자료를 제시하고 작성자지침서에 기술된 방법은 사고관리절차서의 절차서간 또는 절차서 내에서 계속적으로 일관성을 갖게 됨을 입증하는데 충분할 것을 요구하고 있다. 검증 프로그램의 기술내용은 사고관리절차서가 적용 가능한 작성자지침서에 따르고 발전소 설비에 일치하여 기술적으로 정확하고 사용 가능함을 검증하는데 충분해야 하며, 훈련프로그램은 사고관리절차서를 접근하는 내재된 철학을 사고관리팀이 이해하고, 중대사고 현상과 완화전략 및 절차서의 기술적인 근거를 이해하며, 절차를 수행할 능력을 갖출 수 있도록 정기적인 훈련을 실시하게 됨을 입증하는데 충분할 것을 요구하고 있다. 이행프로그램에서는 사고관리절차서가 적절히 유지, 관리되며, 설계변경 및 운전경험으로 도출된 개선 사항이 적절히 반영될 것을 요구하며 또한, 절차서에 대한 사용원칙과 의사결정 책임의 수립 사항이 제시되어 있어 사고관리팀이 사용하는데 혼선이 없을 것을 요구하고 있다.

나. 사고관리전략 평가지침(안)

중대사고 시 노심 손상이 발생하더라도, 노심 손상의 진행을 완화하고 가능한 한 핵분열생성물을 원자로용기 내에 가두어 두어야 하며 격납용기의 건전성을 유지하여 소외로의 방사능 누출을 최소화해야 한다. 발전소는 이러한 조치를 취하기 위한 사고관리팀(발전소 운전원 및 비상대책요원)이 구성되어 있으며 사고관리를 위해 사전에 마련된 종합적인 사고관리계획에 따라 필요한 조치를 효과적으로 수행해야 한다. 사고관리전략 평가지침(안)은 이러한 발전소 조치 수행시 선택된 전략의 효율성을 평가하기 위한 지침이다. 국내 PWR 원전의 중대사고관리전략을 일반적으로 검토할 수 있는 최소한의 기본 요건, 범위 및 기준을 설정하고자 미국의 중대사고관리지침서(SAMG) 및 EPRI 연구소의 관련 기술개발내용 그리고 국내 한국형표준원전을 비교·검토하였으며(표-2 참조) 사고관리전략 평가에 필요한 세부 항목을 도출하여 국내 실정에 적합한 사고관리전략 평가지침(안)을 작성하였다. 사고관리전략 평가지침(안)은 크게 일반사항 평가지침과 세부 평가지침으로 구분하였으며 일반사항 평가지침에는 중대사고관리전략 검토에 일반적으로 적용되는 평가기준과 중대사고관리 전략에 포함되어야 하는 사항을 기술하였다. 사고관리전략 세부 평가지침에는 우리나라의 웨스팅하우스형 원전, CE형 원전 및 프라마툼형 원전에

일반적으로 적용할 수 있는 다음의 15가지 주요 사고관리전략에 대한 각각의 평가지침을 개발하였다.

- (1) 원자로냉각재계통으로의 냉각수 주입
- (2) 원자로냉각재계통 감압
- (3) 원자로냉각재펌프 재기동
- (4) 증기발생기 감압
- (5) 증기발생기 2차측 냉각수 주입
- (6) 격납건물 살수
- (7) 격납건물 내로 냉각수 주입
- (8) 격납건물 팬 냉각기 운전
- (9) 수소재결합기 운전
- (10) 수소점화기 운전
- (11) 격납건물 배기
- (12) 보조건물 살수
- (13) 보조건물 침수
- (14) 원자로 압력용기 외벽냉각
- (15) 격납건물 증기 활성화 및 비활성화

4. 지침(안)의 검증 및 시범 적용

이 지침(안)의 개발 내용은 OECD/NEA/CSNI 주관 ‘중대사고관리조치 이행’에 관한 워크샵(2001.9)에 참가하여 “한국의 중대사고 관리 현황 및 활동”에 관한 논문으로 발표하였으며 동 지침(안)의 내용은 이들 국가에서 대체로 인정되는 방법으로 평가받았다. 또한 안전기술원이 개최한 제7회 원자력안전기술정보회의 (2001. 12. 14)의 원자로안전해석분과에서 중대사고관리계획 안전심사지침(안)을 발표한 바 있다.

영광 5,6호기의 중대사고관리지침서는 국내 비상운전절차서의 개발 형식과 유사한 개념으로 개발이 이루어졌으며, 안전기술원에서 개발한 중대사고관리계획 안전심사지침(안)에 기술된 사항도 위에 언급한 5개 문서를 요구하고 있다. 중대사고관리계획 안전심사지침(안)을 영광5,6호기에 시범 적용한 결과 안전심사지침(안)과 잘 부합하고 있으며 지침(안)의 개발 내용을 가동중 및 신규 원전에 적용하는 것은 전반적으로 적절한 것으로 평가되었다. 따라서 이 지침(안)은 가동원전 및 신규 경수로 원전의 설계자 및 신청자에게

중대사고관리계획 수립을 위한 지침을 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결 론

과학기술부는 원자력 안전목표, 확률론적 안전성평가, 중대사고 대처능력 및 중대사고 관리계획에 대한 “원자력발전소 중대사고 정책” (2001. 8)을 발표하였으며, 안전기술원은 중대사고정책 이행에 따른 “중대사고관리계획 안전심사지침(안)”을 개발하였다.

또한, 이 연구에서는 “사고관리전략 평가지침(안)”을 개발하였으며, 미국을 비롯한 OECD 국가에서 고려하고 있는 현재까지의 기술현황에 근거하여 작성하였다. 이 지침(안)은 관련기관의 의견수렴을 통하여 향후 안전심사지침 19.3절 (중대사고 관리계획)의 부록 2로 첨부될 예정이다.

국내 가동원전 및 신규 건설원전의 중대사고관리계획 검토를 위한 “중대사고관리계획 안전심사지침(안)”은 영광5,6호기에 시범 적용한 결과 지침서의 적용 가능성이 확인되었다.

이 지침(안)은 2002년 중반기에 관련기관의 의견수렴을 하여 필요한 내용을 수정하고 2008년까지 제출될 가동원전의 사고관리계획 및 신규원전의 심사에 사용할 예정이다.

중대사고관리와 관련하여 현재까지 완전히 마무리된 국가는 없으며 중대사고 위협사항에 대해 다양한 방안이 제시될 수 있으나, 중대사고를 효율적으로 대처하기 위해서는 잘 준비된 기기/장비들과 정보/지식이 뒷받침되고 이들을 이용한 현명한 결정이 수반되어야 한다. 아울러, 정지 중 운전에 대한 사고 확률이 정상 운전중 사고 확률에 비해 결코 낮지 않으므로 정지 운전시 적용될 중대사고지침서의 개발이 필요하며 국내원전도 이들 내용을 적극적으로 검토하여 반영해야 한다.

참고문헌

- “원자력발전소 중대사고 정책”, 과학기술부 원안71231- 751, 2001. 8. 30
- “영광 5,6호기 중대사고관리지침서”, 한국전력공사, 2001.6
- “한국표준원전 중대사고지침서 개발”, 한국전력공사, 2000. 12
- "A Framework for the Assessment of Severe Accident Management Strategies.", NUREG/CR-6056
- "A Systematic Process for Developing and Assessing Accident Management Plans.",

NUREG/CR-5543

- "Accident Management Programmes in Nuclear Power Plants", Technical Reports Series No. 368, A Guidebook, International Atomic Energy Agency, 1994.
- "Individual Plant Examination for Severe Accident Vulnerabilities -10CFR50.54", Generic Letter No.88-20, U.S. NRC, Nov. 23, 1988
- "Staff Plans for Accident Management Regulatory and Research Programs", SECY-89-012, U.S. NRC, Jan. 18, 1989

표-1 국내 원전 사고관리계획

구분 호기	수행기간	추진 일정									비고
		'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	
영광 5,6	'99.12 ~ '01.06	————									완료
영광 3,4 울진 3,4,5,6	'02.01 ~ '02.12			————							한국표준형 일괄개발
고리 1	'03.01 ~ '03.12				————						WH형 원전 일괄개발
고리 2,3,4 영광 1,2	'04.01 ~ '04.12					————					
울진 1,2	'05.01 ~ '06.12						-----				(추정일정)
월성 1,2,3,4	'07.01 ~ '08.12								-----		(추정일정)
이행체제 및 교육과정 개발	'01.07 ~			———— CE	———— WH		----- 울진			———— 월성	원전형태별 개발, 이행 (영광 5호기 부터 이행)
이행	'02.04 ~			————							

표-2 EPRI 및 WH, CE, KSNP 의 중대사고관리전략 비교

사고관리전략	EPRI TBR	WH	CE	KSNP
1. Inject into RCS	●	●	●	●
2. Depressurize RCS	●	●	●	●
3. <i>Spray within the RPV(BWR)</i>	● x			
4. Restart RCP	●		●	6항 적용
5. Depressurize SG	●		●	6항 적용
6. Inject into SG	●	●	●	●
7. Spray into CV	●		●	8,16,17항 적용
8. Inject into CV	●	●		●
9. Operate Fan Cooler	●		●	16,17항 적용
10. Operate Recombiner	●		●	18항 적용
11. Operate Ignitor	●			18항 적용
12. <i>Inert CV with Noncondensables(BWR)</i>	● x			
13. Vent CV	●		●	17항 적용
14. Spray Aux BLDG	●		●	16항 적용
15. Flood Aux BLDG	●		●	16항 적용
16. Control FP Release		●		●
17. Control CV Condition		●		●
18. Control CV H ₂		●		●
19. Flood CV		●		8항 적용
20. Mitigate FP Release		●		16항 적용
21. Depressurize CV		●		17항 적용
22. Control H ₂ Flammability		●		18항 적용
23. Control CV Vacuum				
24. Flood Cavity				
25. Vent RCS			●	6항 적용
26. Spray CV outside			●	16항 적용
27. Feed & Bleed				
합 계	13(15)	11	13	7