

중대사고관리계획에 관한 고찰

이 종 인
(한국원자력안전기술원)

1. 서 론

TMI-2 사고와 Chernobyl 사고 이후 원자력발전소에 대하여 종래의 설계기준사고를 예방하는 것만으로는 안전성이 충분히 확보되지 못한다는 인식과 함께 중대사고에 대한 사고 관리를 고려해야 한다는 여론이 높아졌다. 1979년에 발생한 TMI-2 사고 이전에도 연구용 원자로 SL-1의 폭발이나 Windscale 화재등의 핵사고가 몇 차례 있었지만, 중대사고 관리의 필요성을 조명시켜 준 것으로서는 TMI-2 사고가 첫 사건이었다. TMI-2 사고 이전의 비상 노심 냉각해석결과에 따르면 핵연료 피복재의 온도가 약 1400K를 초과하게 되면 자체촉매반응(autocatalytic reaction)이 일어남으로써 노심 냉각이 회복될 수 없게 되어 용융될 것으로 나타났다. TMI-2 사고가 막상 발생하자 중대사고시 일어나는 과정과 현상들에 대한 이해가 매우 빈약하였음을 알게 되었고 이에 따라 미국을 비롯한 각국에서 대규모의 광범위한 연구를 진행시키게 되었다. 그 결과 종래의 보수적 가정들을 삭제시키는 것이 가능해지고 있으며, 원전 설계자나 운영자, 규제자가 발전소 거동에 대하여 실제적인 평가를 수행하고 사고 결말의 예방 및 완화를 위해 모든 보조, 지원 계통을 이용하는 등 실제적 유익을 얻을 수 있는 방안이 초점을 집중하게 되었다. 1986년에 발생한 Chernobyl 사고는 중대사고 관리의 중요성을 깨우쳐 준 교훈적 사건이었다. 특히 중요한 점은 심각한 중대사고시에도 방사능 영향을 감소시키기 위해 조치할 수 있는 단계적 절차가 많이 있다는 것이었다.

그림 1은 원자력발전소의 안전 특성 및 조치를 확보하기 위한 전반적 전략인 심층방어개념(defence in depth)을 나타내고 있다. 중대사고관리는 심층방어 요소중의 하나로서 사고 발생시 이용가능한 모든 자원, 즉 인원과 설비를 효율적으로 활용함으로써 발전소를 통제된 안전 상태로 회복하고 사고의 피해를 완화하기 위한 제반 활동을 말한다. 사고관리의 목적은 공중에게 끼치는 위해도를 줄이는 것이며, 그 구체적 목표는 노심의 손상방지, 노심의 손상이 발생했을 경우 더 이상의 진전을 막고 손상된 노심을 원자로 용기내에 가두어 두는 것, 격납용기 건전성의 유지, 핵분열 생성물 방출효과의 극소화 등이 된

전략	사고 방지		사고 완화	
사건	정상운전	예상된 운전상태	설계기준 사고	설계 기준을 넘는 중대사고
계어	정상운전활동		설계기준 사고의 계어	사고관리
절차	정상운전절차	비상시의 운전 절차	비상운전절차서의 최종 부분	(사고관리 절차서)
대응	비상운전계통	공학적 안전설비	특수 설계설비	부지 비상대책
방역의 상태	연료 허용 설계범위	연료 중 대 손상 연료손상	연료 제어불가능한 연료 용융	연료 제어불가능한 연료 용융

그림 1. 심층방어 개념

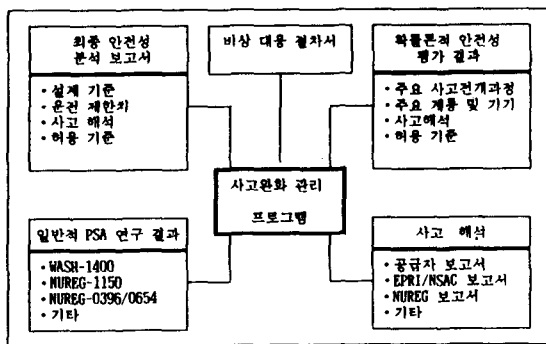
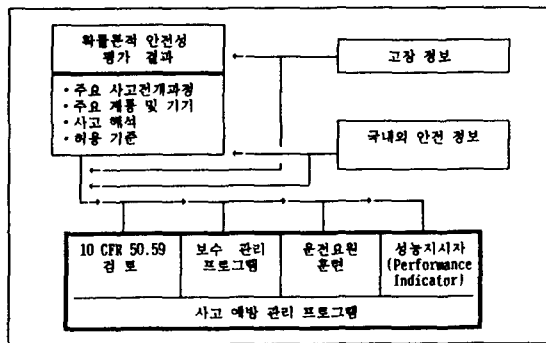


그림 2. 사고 예방/완화 관리 프로그램

다. 사고 예방 및 완화 전략을 수립하기 위한 체제를 그림 2에 예시하였다.

지금까지의 연구 결과, 원자력발전소에서 일어날 가능성이 큰 사고들에 대해 사고진전과정을 연장시키고 더 이상 노심 성능이 저하되지 않도록 하며, 노

심냉각을 회복하고 격납용기 전전성을 유지하기 위한 조치를 취함으로써 위험도가 상당히 감소될 수 있을 것으로 보인다. 국제원자력기구(IAEA)는 원자력 발전소 기본안전원칙(IAEA Safety Series No. 75-INSAG-3)에서 중대사고관리 및 사고 완화 조치들을 통해 단기적인 소의 대응 조치가 필요한 대량 소의 방출(large offsite release) 확률을 1/10 이하로 감소시키는 것을 제안하고 있다. 국내에서도 영광 3, 4 호기의 건설허가 조건으로서 사고관리계획을 고려하는 것이 제시되었으며, 차후 모든 발전소에 대해 사고관리계획을 수립하는 것이 필요하다. 이를 위해 첫째, 운전경험 데이터, 국내의 사고고장 정보자료를 수집하고 수집된 자료를 이용하여 발전소별 취약성 평가를 수행해야 하며, 둘째로 취약성 평가에서 얻은 정보를 포함한 중대사고에 관한 정보를 분석하여 취약부분 실체를 개선하고 사고관리 목표에 따라 기존 운전절차서를 보완하며, 사고관리절차서를 작성하여 운전요원의 훈련, 관리자 교육 등에 활용하는 것이 바람직하다.

본 해설에서는 TMI-2 사고와 Chernobyl 사고 이후 중요하게 대두되고 있는 중대사고 관리에 대한 외국의 사고관리 전략 개발과 그 이행 조치현황을 살펴보고자 한다. 특히 IAEA 및 미국 NRC에서 제시하고 있는 사고관리계획의 세부 내용을 검토하고 이를 토대로 국내 원자력발전소의 중대사고관리 계획 수립시 고려해야 할 기본 요소들에 관하여 개괄적으로 기술하고자 한다.

2. 각국의 중대사고 관리전략

사고관리의 목표를 효율적으로 이루기 위해서는 필요한 조치 계획-중대사고 취약성 분석에 의해 기존 비상운전절차서를 보완하고 훈련계획을 개선하며, 중대사고 발생시 발전소 운전 요원들에게 대한 지원을 강화하기 위한 계획-을 사전에 수립해야 한다. IAEA에서는 각 회원국의 사고관리 요원에 대한 훈련을 수행하고 있고, 미국 및 유럽 각국에서는 원자력 산업계의 사고관리 능력을 향상시키기 위해 사고관리계획(Accident Management Program)을 수행 중에 있다. 사고관리계획에 포함해야 할 기본적인 요소는 사고관리 절차서 및 사고관리 전략, 운전원

을 위한 정보, 제측제어 설비, 조직, 의사 결정 책임, 운전원 훈련 등이다. 이 계획의 주된 목표는 중대사고 발생 빈도를 줄이기 위해 hardware를 변경시키거나 발전소를 개조하는 것이 아니라 기존의 발전소 설비 및 운전원의 기술과 창의력을 활용함으로써 중대사고를 종료시키거나 방사능 소의 방출을 억제하는 방안을 모색하고자 하는 것이다.

이를 위해 미국 NRC에서는 중대사고문제 종결계획(SECY-88-147)의 일환으로서 Generic Letter 88-20, SECY-89-012('89.1.18) 등에 따라 각 발전소에서 자체 사고관리계획을 작성하도록 하였다. 그림 3은 가동중 원전에 대한 사고관리계획 수립시 발전소별 안전성 평가(IPE)와 중대사고 연구를 통해 취약점을 도출하고 대책을 강구하는 제반 과정을 보여주고 있다. 즉 발전소별 안전성 평가의 수행을 통해 드러난 정보 등 중대사고에 관한 정보를 평가하고 중대사고 운전절차서를 작성하여 이 절차서에 따라 운전원과 경영자를 훈련하도록 하고 있으며, 사고관리 계획에 관한 Generic Letter도 "92년 중반에 발행할 예정이다. 한편 산업계에서는 "92. 11월까지 owne-

r's group의 generic accident management guidance를 작성할 목표로 금년 중반에 그 technical basis report를 작성할 예정이다.

스웨덴에서는 Ringhals 발전소에 대한 중대사고 관리 계획으로서 발전소 정전사고에 의한 중대사고 시 방사능 방출을 극소화하려는 것을 목표로 설정하였다. 그림 4에서 보여 주는 바와 같이 filtered containment vent system 및 alternate spray system을 설치하는 등의 설계 변경과 징후지향적인 BERG(symptom-based beyond emergency response guidelines), knowledge based handbook의 작성 및 simulator 등을 이용한 운전원 교육을 강화하였다.

프랑스의 사고관리방안은 그림 5에 제시된 바와 같이 설계기준사고를 초과하는 사고들에 대한 노심 손상 방지 및 사고후 방출 최소화를 다루는 H- 및 U-절차서들을 작성하여 state-oriented procedure로써 보완하고 있다. 또한 스웨덴에서 적용한 것과 같이 filtered containment vent system을 설치하며 computerized display로써 운전원을 지원하는 등의 조치도 수행중에 있다.

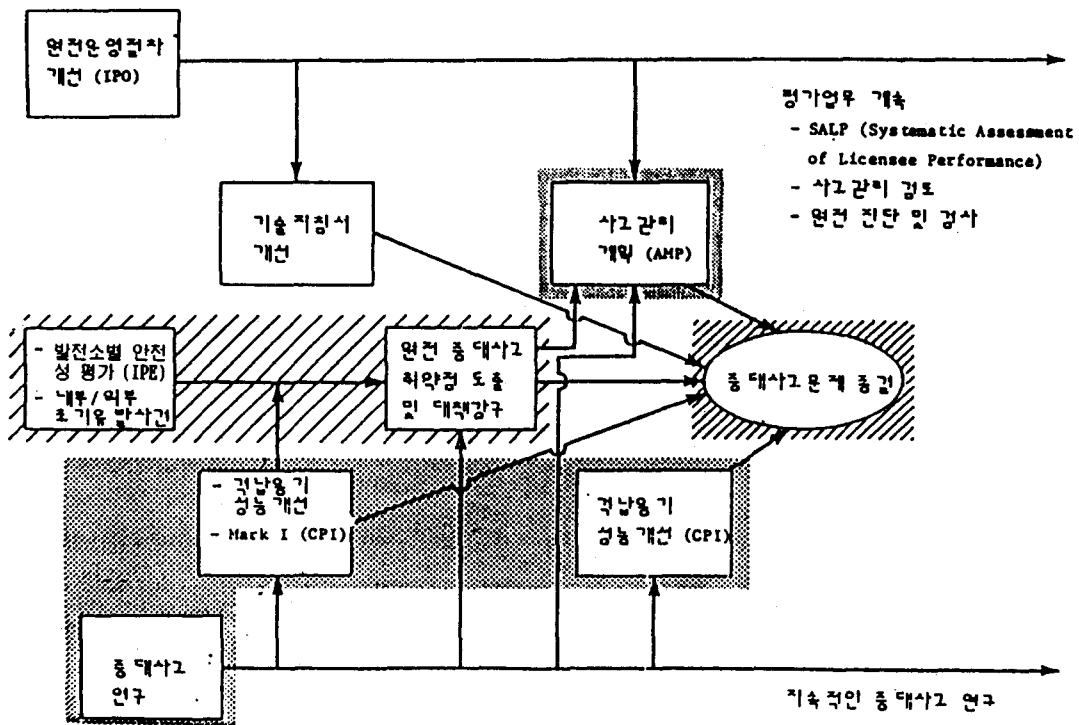


그림 3. 중대사고 종합종결계획 (SECY-88-147)

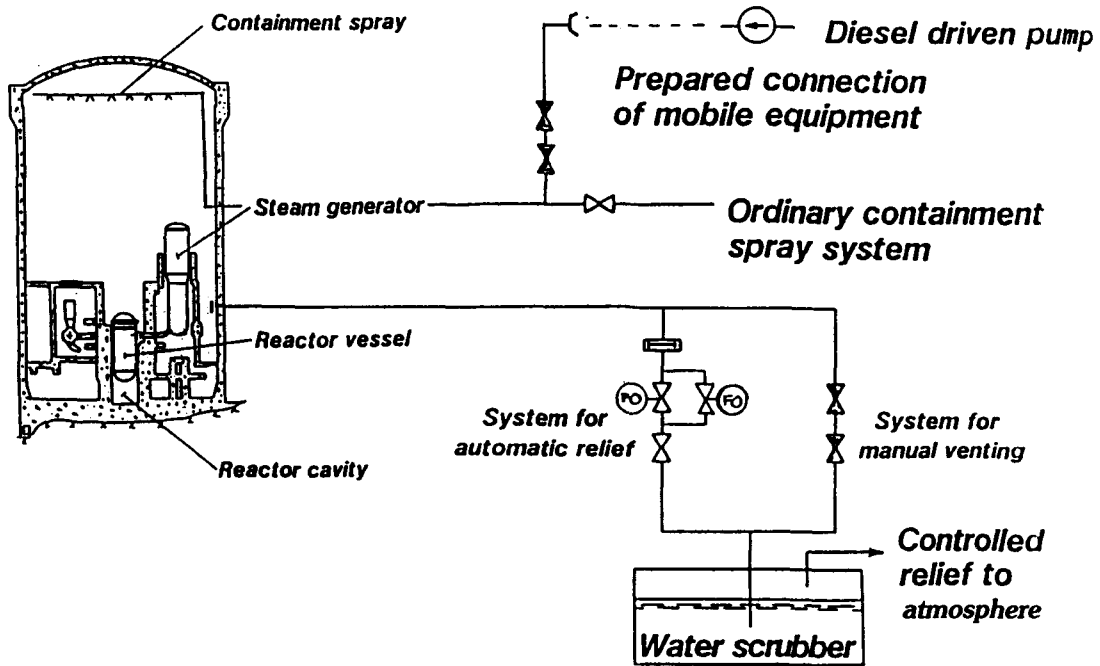


그림 4. RINGHALS 2 CONTAINMENT CONFIGURATION

POSTULATED EVENTS	EQUIPMENT	OPERATORS AND SAFETY ENGINEER PROCEDURES	CRISIS ORGANIZATIONS	TRAINING AND EXERCISES
"Classical" accidents and external events	Basic design Improved devices	Incidental procedure Accidental procedure	. Utility emergency Plan (PUI)	. Operators
Losses of redundant systems	Additional equip. - LLS - H4 - U3 - ...	H ECPs Permanent ECSs Monitoring Procedure	. Public Authorities emergency plans (PPI and PPA) . Remote technical support from EDF, Framatome & IPSN	. Site personnel
Core melt sequences	Effluents reinjection Foundations reinforcement Containment filtration and venting system	Ultimate procedures	. Severe accidents intervention guidelines	. Whole organizations

그림 5. Present status of accident management in France

독일에서도 event-oriented EOP를 sfety function-oriented EOP로 개선하고 원자로냉각재계통의 감압 등을 포함한 비상대응 절차서(accident management procedures 및 accident management guidance)를 작성하고 filtered containment vent, 격납용기 바닥의 강화(reinforcement) 등의 보완조치를 수행하고 있으며, 그밖의 많은 선진국에서 중대사고관리계획을 개발, 수행 중에 있다.

국내에서는 중대사고 관리에 관한 체계적인 지침이 수립되지는 않았으나, 영광 3, 4, 호기의 건설허가 조건으로서 사고관리계획을 고려하는 사항이 반영되어 있다. 원자력 안전기술원에서는 1989년부터 IAEA주관 사고관리 프로그램에 참여하여 사고관리에 관한 기본적인 방향을 설정하는 연구를 수행중에 있다. 또한 1990년 2월 IAEA와 공동주관하에 TMI-2 사고와 Chernobyl 사고 이후 세계적으로 원전규제의 주요 관심사로 대두되고 있는 중대사고에 대한 우리의 정책방향 설정을 위해 Workshop이 개최되었다. 이 Workshop을 통하여 중대사고 규제 방향에 대한 국제 동향과 정보를 파악하였으며, 원전의 안전성 증진을 위하여 가동중 및 신규원전의 중대사고 정책, 안전성 목표(Safety Goals)의 설정 및 지속적인 중대사고 규제연구에 대한 중요성이 크게 인식되었다. 이에 따라 1990년도부터 중대사고에 대한 규제 개념을 국내 가동중 및 신규 원전에 적용하기 위한 중대사고 기본대책 수립을 위해 Working Group을 구성하여 현재까지 산, 학, 연의 유관기관 및 규제기관과 협의하며 추진중에 있다.

3. 중대사고 관리계획

사고관리의 목적을 이루기 위해서는 그 책임을 가진 조직, 즉 전력회사가 사고관리계획을 개발해야 하며, 이를 위해 규제 측면에서도 적절한 지침을 제시하는 것이 바람직하다. 사고관리계획의 목표는 발전소의 특성에 대한 심도 있는 지식과 발전소의 인원과 기기의 능력에 대한 이해를 결합시켜서 적절한 사고관리 전략을 개발하고 수행하기 위한 것이다. IAEA의 사고관리계획 지침서 초안에서 제시하고 있는 사고관리계획의 요소들은 다음과 같다.

- (1) 발전소 성능과 취약점의 파악
- (2) 의사 결정 책임과 권한의 기술

- (3) 필요한 정보의 결정
- (4) 효과적인 전략의 개발
- (5) 공학적 방법의 개발
- (6) 절차서와 지침서의 개발
- (7) 훈련 요건과 책임의 규정
- (8) 수행 효과의 입증
- (9) 새로운 정보의 반영

한편 미국 NRC의 SECY-89-012에서는 위 9개항의 내용과 거의 유사하나 압축된 형태로 다음 5가지-사고관리절차서, 중대사고 관리 훈련, 사고관리 지침서, 계측기, 의사 결정 책임을 제시하고 있다. 이 지침서들은 현재 보완중에 있으며 1992년에는 Accident Management Manual이나 Generic Letter로서 발행될 예정이다. 따라서 차후 국내 원자력발전소에 대해 위와 같은 요소들을 고려하여 사고관리계획을 개발하고 수행함으로써 확률론적 안전성 평가 및 중대사고 해석 결과에 근거한 실질적인 안전성 향상의 효과를 얻게 될 것으로 기대된다.

4. 중대사고 관리전략의 개발

4.1 취약성 평가와 중대사고 관리전략의 개발

그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 중대사고관리를 계획하는데 있어서 첫 단계는 그 발전소의 취약점, 즉 방사성 물질의 방출에 대한 방벽에 위해를 가할 수 있는 메커니즘을 파악하는 것이다. 취약성 평가는 설계기준을 초과하는 사고에 대한 발전소의 반응을 분석한 것에 기초를 두어야 한다. 이 평가는 설계 기준 해석시와 같이 보수적으로 하지 않고 최적 평가 방법을 사용하는 실제적 방법으로 수행하며 전출력 운전의에도 다른 모든 발전소 상태 및 운전모드, 예전대 기동시 및 핵연료 재장전을 위한 정지시 등을 포함하고 있다. 이 분석은 다음과 같은 자료-확률론적 안전성 평가(PSA), 중대사고 현상에 관한 안전성 연구, 운전경험 자료, 유사 또는 참조 발전소에 대한 일반적 연구 및 분석, 제한 사항을 평가하기 위한 기존 절차서의 검토, 사고 식별 및 제어를 위한 계측기의 평가, 비상 상태시 전력회사의 능력 평가 결과에 근거해야 한다.

취약성 평가 결과에 근거하여 그 다음 단계로서 취약점에 대한 사고관리 전략을 개발한다. 사고관리 전략의 목표는 기본 안전기능과 관련되도록 구체화

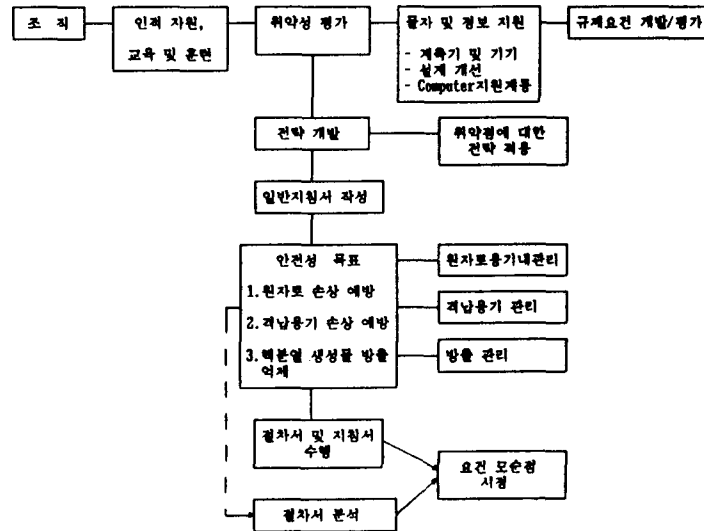


그림 6. 사고관리체제

해야 한다. 예를 들면 노심의 미임제를 유지하고 노심 냉각을 회복함으로써 노심의 건전성을 보호하고, 원자로 냉각재 계통의 건전성을 보호하며, 격납용기의 건전성을 보호하고 만약 격납용기가 손상되거나 우회된다면 방사능 방출을 극소화하는 것 등이다. 전략을 개발하는 데 있어서 첫 단계는 판정기준을 설정하는 일인데, 이를 위해 이미 파악된 발전소의 물리적 상태를 운전원이 대응해야 할 여러 단계의 threshold 또는 조치 수준으로 적용한다. 이 단계들은 발전소 상태가 노심손상까지 진전되지 않도록 예방하거나 상당한 노심용융으로 파급될 때 사고완화를 위해 사고진행 과정을 지연시키는 것을 목적으로 한다. 또한 심층방어 원칙에 따라 한 수준에서 목표를 성취하기 위한 전략이 실패하더라도 다음 수준에서의 목표를 달성하기 위한 선택 가능성이 남아 있어야 한다. 안전기능에 위해를 줄 수 있는 메커니즘에 대해 특별히 취약한 점이 발견된 경우 전략을 개발하는 예를 격납용기 직접가열(Direct Containment Heating) 메커니즘을 취급하는 전략에서 찾아 볼 수 있다. 이 현상에 대한 연구 결과 가압경수로에서 원자로 압력용기의 손상 상태가 나타난다면 일차계통을 감압함으로써 격납용기 건전성에 대한 위해를 방지할 수 있다.

중대사고 관리 과정은 몇가지 안전 목표(원자로 용기 손상 방지, 격납용기 손상 방지, 핵분열 생성물

방출의 완화 등)를 만족시키기 위한 것이므로 이를 위해 몇가지 핵심적인 발전소 안전 운전, 예전대 안전 기능을 유지해야 한다. 사고시 어떤 물리적 상태(온도, 압력 등)에서 발생할 수 있는 메커니즘 때문에 안전 기능이 위해를 받을 수 있다. 그러므로 안전성에 영향을 줄 수 있는 메커니즘들을 다루기 위한 여러가지 전략을 규정하는 것이 필요하다. 적절한 시행 전략을 선택할 수 있기 위해서는 안전 기능에 위해를 줄 수 있는 메커니즘들의 징후를 파악해야 한다. 그러면 적절한 전략을 징후에 근거한 절차서(symptom-based procedures)에 반영함으로써 사고 상황에서 사용할 수 있게 된다. 또한 각 전략의 효율성과 기술적, 인적 타당성 뿐만 아니라 잠재적인 불리한 점(장애)까지 분석하는 것이 필요하다. 예를 들어 현재 사업자가 작성한 발전소별 안전성 점검에서 도출된 개선 사항의 적합 여부를 판단하는 US NRC의 기준은 Backfit Rule(10CFR 50.109)과 안전성 목표(Safety Goals)이다. 5개의 상업용 원전에 대한 원전위험도재평가(NUREG-1150, Reactor Risk Reference Document) 결과에서는 BWR의 초기 격납용기 파손 빈도가 PWR에 비해 높은 것으로 나타나고 있다. 특히 BWR Mark I 격납용기에 대해 몇가지 전략을 채택할 경우 미국 NRC의 비용/편익 계산결과, 노심손상빈도는 5-10배, 핵분열생성물 방출량은 10-100배 감소가 가능할 것으로 판단되었

으며, 개선 소요 비용이 1.6-3.1백만 달러로 추정되는 반면 이익은 호기당 3.6-33백만 달러로 추산되어 판정기준을 만족한 바 있다.

앞에서 언급한 안전목표, 안전기능, 위해, 메커니즘 및 상태, 전략 등의 범주는 그림 7과 같이 계층구조로써 설명할 수 있다. 그림 7은 원자로 압력용기 파손이나 격납용기 파손을 예방하기 위한 전략 및 핵분열생성물 방출을 완화시키기 위한 수단을 명확히 정의해 주고 있다. 중대사고 시나리오에 대하여 단계별로 평가함으로써 그 시나리오가 안전 목표와 안전 기능에 가해지는 위해에 미치는 영향, 그 사건에 의해 적용이 불가능해진 전략과 그 위해를 예방/저지하기 위해 아직도 적절히 사용할 수 있는 전략에 미치는 영향 등을 판단하는 것이 가능하다.

4.2 사고관리 지침, 절차서의 작성 및 분석

4.2.1 사고관리 지침서

중대사고 연구 및 취약성 평가 결과를 토대로 하여 중대사고 관련 전문가들이 발전소 설계자와 운영자들과 협력하여 일반적으로 적용가능한 일련의 지침서를 작성함으로써 사고 관리팀이 중대사고 상황에서 발생할 수 있는 징후와 결말을 취급하는데 적용할 수 있게 해야 한다. 이러한 일반 지침서를 근거로 하여 개별 발전소에 대한 절차서도 작성할 수 있다. 이러한 지침서와 절차서는 어떤 중대사고든지 그 정확한 과정을 사전에 완전히 규정할 수 없기 때문에 최대한 융통성 있게 작성해야 하며, 핵분열 생성물 방출에 대한 순차적인 방호 방벽-핵연료 matrix 및 피복재, 일차 압력 경계, 격납용기-의 손상을 억제함으로써 예방과 완화를 도모하도록 작성해야 한다. 그리고 여러가지 "손상 억제" 절차서로써 일차계통과 격납용기의 파손을 예방하지 못하면 그 상황을 회복하고 격납용기로부터 환경으로의 방출을 제한하기 위한 절차서들도 갖추어야 한다.

원자로 용기의 손상을 방지하는 것은 가장 중요한 안전 목표이다. 그러나 심각하게 성능이 저하된 노심의 위치와 냉각 능력을 진단하는데 유용한 정보가 한정되어 있어 노심 성능 저하의 진전을 멈추는데 적용할 수 있는 전략도 비교적 적다. 예로서, 핵연료봉의 기계적 손상이나 그 이후의 피복재 파편층을 형성하여 나타나는 위해 요소를 제어할 수 있을 것으로

예상되는 전략은 사고초기에 고압주입과 일차 계통의 열 제거를 수행하고 사고 전개 과정 후기에 정상 주입 방식인 축압기로부터의 주입이 가능하도록 일차 계통을 감압하는 것이다. 그밖에 이차계통의 감압 및 통상적인 냉각원이나 기타 냉각원(예: 화재방호수 펌프)을 사용하여 주입하는 전략을 대체할 수도 있다. 노심용융과 재배치를 피할 수 없으면 사고 관리는 압력용기 경계에 주는 위해를 극복하는 쪽으로 취해야 하는데, 과도 온도에 의한 손상이 가장 중요한 것으로 간주되고 있다. 용융된 노심의 구조상 냉각이 가능하다면 더 이상의 성능저하를 막을 수 있는 전략은 냉각재를 충분히 공급하고 일차측의 열을 제거하는 것이다. 이때 감압이나 cavity 범람은 냉각재 주입을 지원하기 위한 대안이 될 수 있을 것이다.

격납용기 손상을 일으키는 것으로 밝혀진 주요 손상 모드 세가지는 과압에 의한 파손, 과도 온도 및 비산물이다. 급속한 과압은 격납용기 초기 손상을 초래하는데 이 손상 모드로 이끄는 메커니즘들은 격납용기 직접가열, 가연성 기체의 폭발, 증기 폭발 및 원자로 용기 파손시 방출되는 증기와 물로부터 격납용기에 첨가되는 다량의 에너지이다. 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 이 메커니즘들을 피하기 위한 조치로서는 원자로 용기 하부 헤드 파손 이전에 일차측을 잘 감압하는 것, 여과기를 통한 배기와 cavity 범람, core catcher같은 장벽 추가, 재결합기/점화기나 살수계통과 fan cooler의 사용 등이 있다. 과도 온도 위하는 격납용기 라이너의 기능 저하시 일어날 수 있는 판통부손상과 용융판통에 기인하며, fan cooler와 살수 및 cavity 범람 등의 대응조치를 취할 수 있다. 비산물은 격납용기 벽에 위해를 가하는 원자로 용기 내부 증기 폭발 및 수소 연소에 의해 생길 수 있으며, 가능한 대응수단은 비산물 생성을 감소시키는데 기여할 수 있는 방벽, 전식용기 및 고압 일차계통 등이 있다.

격납용기가 파손되면 안전성 목표는 핵분열 생성물 방출을 완화하는 것으로 바뀐다. 이 목표는 격납용기 대기에 분산되어 있다. 핵분열 생성물과 물에 녹아 있다. 핵분열 생성물을 제어하고 잠금 시간을 길게 함으로써 달성할 수 있다. 핵분열 생성물의 격납용기 이송, 격납용기 외부 방출, 격납용기 대기중 및 수중 핵분열 생성물의 제어에 관련되는 메커니즘과 가능한 대응 수단은 그림 7에 나타나 있는 바와 같

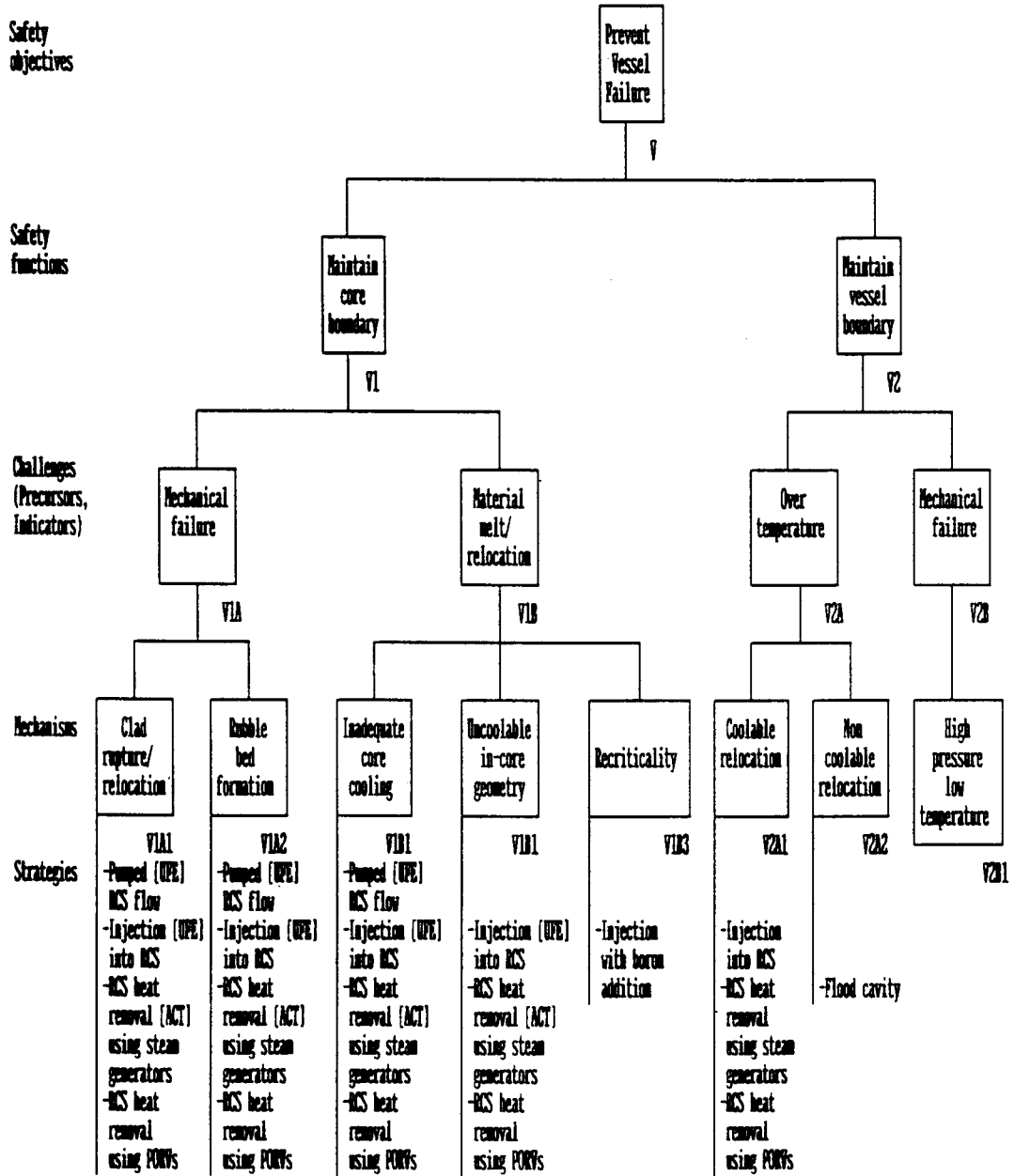


그림 7. Prevent Vessel Failure Tree(1 / 3)

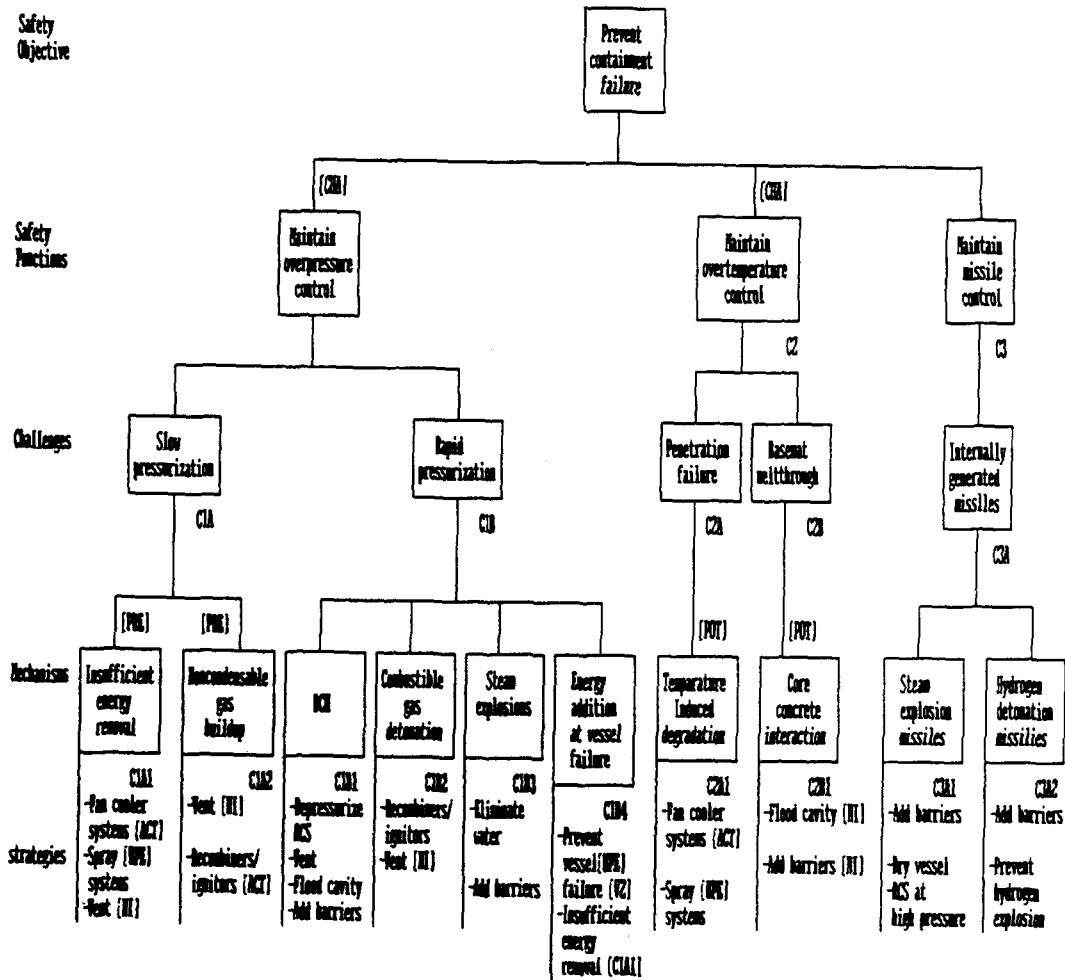


그림 7. Prevent Containment Failure Tree(2/3)

다.

4.2.2 사고관리 절차서

중대사고 관리에 필요한 절차서는 잠재적인 중대 사고, 그 사고에 대한 발전소의 취약성, 이러한 취약 점을 다루기 위한 전략의 개발등 종합적 분석을 통해 개발할 수 있다. 이때 징후 또는 기능 지향적인 절차서(symptom or function oriented procedures)에 상세한 설명서를 첨부함으로써 운전원이 손상 상태를 극복하는데 필요한 모든 설명을 제시해야 한다. 개발해야 할 절차서의 예로서 ROS 진단성 및 냉각성능 회복, 용융된 핵연료 취급, cavity 범람, 격납용

기 손상 방지(filtered vent 사용 등), 손상된 격납용기(basemat melt-through 등) 취급 절차서 등이 있다.

절차서 개발에서 중요한 부분이 절차서 경로를 진입할 것인가 아니면 변경할 것인가 하는 판정 기준을 정의하는 일이다. 그리고 절차서와 지침서는 아직 다룰 수 없는 사항에 대해 open end 형태를 가질 수도 있는데 모든 문제점이 완전히 해결되기를 기다리는 것보다 일련의 임시 절차서를 갖추는 것이 더 중요하다. 중대사고 절차서에는 어떤 환경에서는 해롭거나 비효율적인 조치들에 대한 주의 사항이나 경고와 각 사고 진전 단계에 대해 해야 할 일과 하지 않아

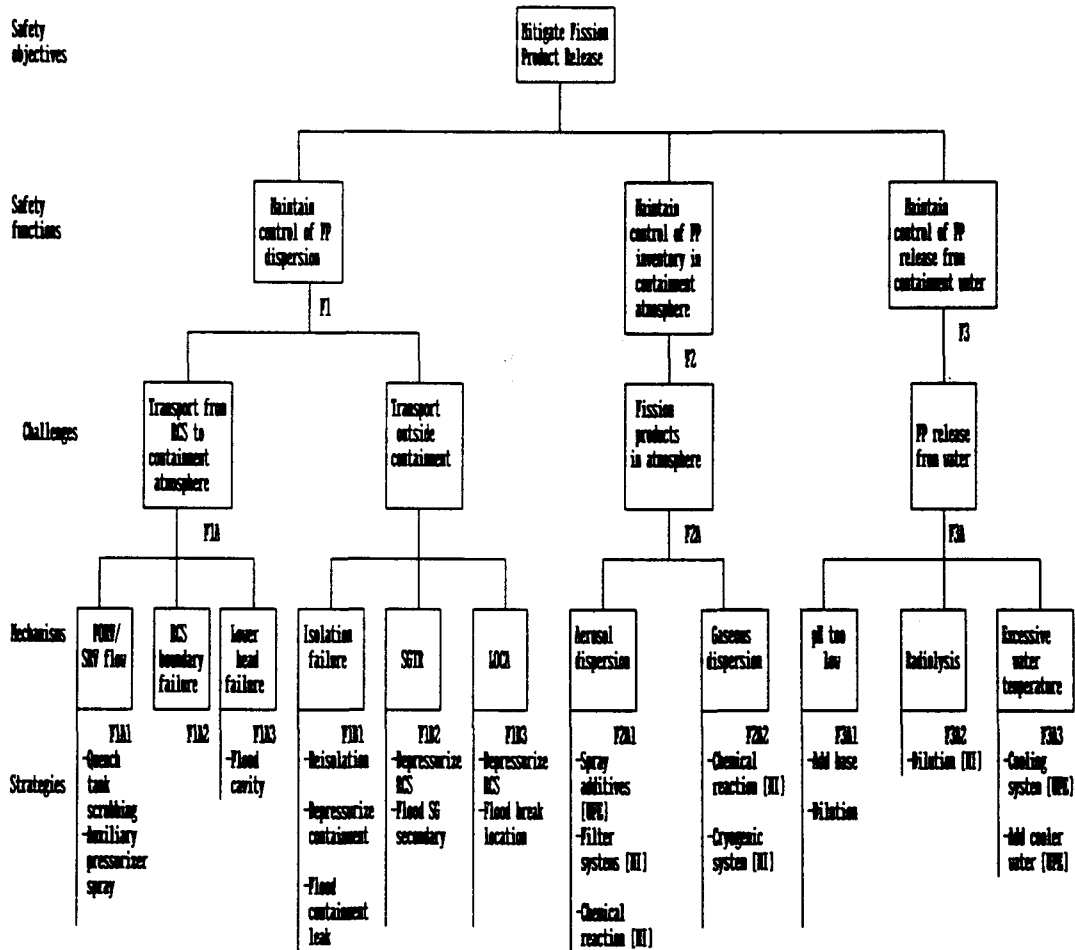


그림 7. Mitigate Fission Product Release Tree(3 /3)

야 할 일의 목록을 작성해야 한다.

제어실 정규 요원들만 관여하는 중대사고 첫 단계에 대해 불확실도를 줄이고 절차를 좀더 정확하게 만들기 위한 연구를 수행하는 것이 매우 중요하다. 그리고 중대사고 지침서와 절차를 기존 비상 운전 절차서와 연속성있게 작성함으로써 서로간에 공백이나 모순점이 없도록 해야 한다. 또한 절차서와 지침서는 기술적 정확성, 범위 및 기능 관점에서 유효성을 입증해야 한다. 그중 기능에 대한 확인에는 절차서와 제어실 설계와의 조화성, 중대사고 기간동안 기기의 접근 가능성 등을 입증하는 것이 포함된다. 절차서에는 우선 순위가 매겨져 있어야 하는데, 예방을 위한 절차서가 완화를 위한 절차서보다 우선적

이어야 한다.

어떤 목표를 이루기 위한 전략을 개발하다 보면 다른 목표의 요구사항과 모순될 수 있다. 예를 들어, 격납용기의 손상 가능성을 줄이기 위해 격납용기를 배기하는 것은 핵분열 생성물 방출을 제한하려는 목표와 상충될 것이다. 사고관리 절차서는 이러한 가능성을 극소화하고 특정한 상황에서 우선적으로 취해야 할 목표에 관해 분명한 지침을 운전원에게 제시해야 한다.

5. 중대사고관리 요소

5.1 조직

제어실 요원이 일반적으로 사고를 극복하기 위한 책임을 맡고 있으나 어떤 경우에는 안전책임자(Shift Technical Advisor: STA)을 두어 사건 지향적 절차서(event-oriented procedures)를 발전소 운전책임자의 지휘하에 수행하고, STA가 핵심적인 안전 기능의 상태를 감시한다. 현재까지는 중대사고에 관해 제어실 요원에게 필요한 지원이 충분하지 않았으므로 발전소의 사고관리 계획은 훈련, 기능 지향적 절차서의 개발, 참고할 수 있는 기술적 전문지식의 제공 등의 형태로 제어실 요원에게 도움을 줄 수 있도록 작성되어야 한다. 또한 중대사고관리를 위해 운전원과 STA와는 별도로 자체 직원 또는 외부 조직의 관련분야 전문인들로서 비상 기술 지원단을 구성하여 발전소 계측기로서는 알 수 없는 정보를 제공하며, 사고전개 상황을 투영하여 차후 결말을 예상하고 제시된 전략의 효과를 평가하는 등의 활동을 통해 사고 전략 수행을 돕는 것이 필요하다. 일단 조직이 구성되면 발전소 운전책임자나 STA는 TSG와 제어실 요원간을 연결시키는 일을 함으로써 시의 적절한 효과적의 의사결정을 통해 효율적으로 사고를 관리할 수 있을 것이다. 사고 상황에서는 심리적 부담이 크므로 사고초기 이후 단계에서의 지시는 발전소나 그 회사의 관리자 수준에서 해야 한다. 그러므로 사고관리요원은 비상사태시의 권한체계에 대해 잘 이해하고 있어야 한다.

5.2. 인적 자원, 교육 및 훈련

원자력발전소의 운전중 일어나는 대부분의 문제점은 인적 실수로부터 파생될 수 있으며, 또한 적절한 훈련의 부족이 인적 실수의 주된 원인 중의 하나이다. 운전 경험 자료를 통해서도 인적 실수에 대해 정확히 파악하기가 쉽지 않지만 운전요원에 대한 부당한 교육의 필요성에 대해서는 의심할 여지가 없다. 현재의 운전요원 훈련계획에는 일반적으로 극심한 노심 손상이 포함되어 있지 않고, simulator도 제한적으로 사용되고 있다. 그러므로 훈련계획을 강의실 훈련과 실습 훈련으로 구분하여, 강의실에서 중대사고에 대한 기본적 교육 및 절차서와 지침서에 대한

심도있는 분석을 수행하고, 제어실 내·외부에서 절차서 수행, 절차서에 따라 사전 예행연습 등 실제적인 훈련을 정기적으로 수행하고 시험을 치르는 것이 효과적이다. 또한 발전소 경영자에게도 훈련계획을 제공하여 중대사고 절차서와 지침서에 익숙하게 하는 것과 TSG 요원들이 정기적으로 실제 훈련에 동참하는 것이 바람직하다. 사고관리연습은 사고관리팀이 의사 결정 임무를 개발하여 분명하게 이해하고 있음을 확인하기 위해 필수적이며, 필요에 따라 비상계획 연습에 포함시키는 것도 좋다. 이러한 사고관리 훈련계획은 주기적으로 검토하여 개선해야 한다.

5.3. 물자 및 정보 지원

일차 및 이차계통과 격납용기의 온도, 압력 측정기와 같이 발전소 상태와 사고의 심각도 수준을 측정하여 전략을 수행하는데 필수적인 계측장치는 발전소 정전시이나 중대사고 환경에서 동작할 수 있어야 한다. 그 필요한 정보를 획득할 수 없으면, TSG가 전산 지원 수단을 통해 제공해야 한다. 또한 전략을 수행하는데 필요한 발전소의 제1선 계통과 보조 계통-같은 기능을 수행할 수 있는 비안전 관련 계통도 포함-을 파악하는 것이 필요하다. 부지 안팎에서 구해야 할 비표준 기기와 물자, 예로써 비표준 수원(non-standard water source)이나 고방사선 구역에서의 화재 진압 장비 등의 사용가능성에 대해서도 계획 단계에서 고려하되 그 부정적 측면을 잘 이해하고 있어야 한다. 어떤 경우에는 전략의 타당성이 있기 위해 기기를 추가로 설치하는 것이 바람직할 수 있다. 몇몇 국가의 원자력발전소에서 채택한 여과배기와 수소 점화기가 그 예이다. 진보된 진단 및 의사 결정 보조수단(expert system)이나 man-machine interface에 대한 연구결과와 활용이 가능하게 되면 사고관리의 인적요소 측면이나 개선된 전략을 개발하는데 상당히 기여할 것이다.

5.4 규제 측면

중대사고 연구가 여러해 동안 수행되어 오면서 중대사고 현상, 발전소 취약성 및 중대사고를 관리하기 위한 기기와 절차서의 평가 및 수행에 관한 기술정보의 기초가 상당히 확장되었다. 불확실성이 아직 많이 있긴 하지만, 여러 나라에서 수행되고 있는 연

구 계획을 통해 안전성 목표와 허용기준, 설비 보완 규정(backfitting rules), 비상 계획의 요건, 발전소 부지 선정, 건설 및 운전, 기기 품질 요건 등과 같은 규제 고려사항을 논할 수 있을 만큼 자세히 정보를 얻을 수 있게 되었다. 따라서 체계적인 발전소 점검, 위험도 연구 및 선원항 평가등과 같은 중대사고 사항의 해결책에 대한 규제 요건이 의무화할 것으로 예상된다.

6. 결론

지금까지 중대사고관리의 배경과 사고관리계획 수립의 필요성 및 사고관리전략의 개발을 위해 고려해야 할 사항들을 논의하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, TMI-2 사고 이후 심층방어를 위해 사고관리기술의 개발이 강조되고 있고, IAEA에서는 효율적 사고관리에 의해 소외 대량 방사능 방출사고 확률을 1/10 이하로 줄이도록 권고하고 있다. 특히, 외국의 이행조치 현황과 연구결과를 살펴보다도 발전소별 중대사고관리의 이행은 원전에서 일어날 가능성이 큰 사고들에 대한 사고진전 과정의 연장, 노심손상의 완화와 신속한 노심냉각, 격납용기 건전성 유지 등에 기여함은 물론 위험도를 상당히 감소시킬 수 있을 것이다.

둘째, 중대사고의 예방 및 완화를 위해서 전력회사가 개발, 수립해야 할 사고관리계획에는 중대사고 분석, 확률론적 안전성 평가(PSA) 결과 등에 근거한 사고관리 지침서와 절차서의 개발 등이 있다. 이 지침서와 절차서에는 중대사고 관련 훈련, 계측기 및 기기의 사용 가능성 평가 및 개선 필요사항의 검토, 의사 결정 책임의 수립 등과 같은 요소가 포함되어야 할 것이다.

셋째, 국내에서도 1989년에 영광 3,4호기 건설허가 조건사항으로서 사고관리계획 및 격납용기 성능 개선을 고려한 발전소별 안전성평가(IPE)에 의해 취약성을 분석하는 요건이 반영됨에 따라 1993년경부터 사고관리계획이 수립될 것으로 예상되고 있다. 또한 국내 모든 원자력발전소에 대한 발전소별 중대사고 취약성 평가가 수행되면 그 분석결과를 토대로 한 각 발전소 사고관리계획의 수립 및 이행을 통해 원전의 안전성 증진에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) 한국에너지연구소 부설 원자력안전센터, KAERI/NSC-420/89, "사고관리 체계개발", 1990.1
- 2) 한국원자력안전기술원, KINS/AR-053, "국내 원전의 중대사고 대책 수립을 위한 Working Group 기술 검토 보고서", 1991.1
- 3) 한국원자력연구소 원자력연수원, "원자력발전소 안전관리기술과정", "사고관리대책", 1991. 5. 13-16
- 4) "Individual Plant Examination for Severe Accident Vulnerabilities-10 CFR 50.54," Generic Letter No.88-20, U.S.Nuclear Regulatory Commission, November 23, 1988
- 5) "Integration Plan for Closure of Severe Accident Issues," SECY-88-147, U.S.Nuclear Regulatory Commission, May 25, 1988.
- 6) "Staff Plans for Accident Management Regulatory and Research Programs," SECY-89-012, U.S.Nuclear Regulatory Commission, January 18, 1989
- 7) "Accident Management in Nuclear Power Plant," doc 3882u / Draft / 1990-10-10, International Atomic Energy Agency, 1990
- 8) "Framework for the Development and Implementation of an Accident Management Programme," doc5870u / Draft / 1990-10-10, International Atomic Energy Agency, 1990
- 9) Leonid P.Kabanov, "IAEA Accident Management Programme," 1990-10-8
- 10) ANS Proceedings of the International Topical Meeting on Probability, Reliability, and Safety Assessment, PSA '89, April 2-7, 1989. pp.635-668
- 11) "Reactor Risk Reference Document," U.S.Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1150, Vol.1. & 2, Second Draft for Peer Review, June 1989
- 12) "Severe Accident Insights Report," NUREG/CR-5132. Brookhaven National La-

- boratory, April 1988
- 13) "Accident Management Strategies for Consideration in the Individual Plant Examination Process," Generic Letter 88-20, Supplement No. 2, U.S.Nuclear Regulatory Commission, April 4, 1990
 - 14) J.C.Carter, J.A.Raulston, A.R.Buhl, "Accident Management Insights through the Industry Individual Plant Evaluation Process," IAEA-SM-296/82
 - 15) "Severe Accident Management: Improvement of Symptom-Oriented Operating Procedures Using Best-Estimate Analysis Method," Korea Institute of Nuclear Safety, IAEA-533/RI/RB, KAERI/NSC-419/89
 - 16) James C.Carter, "Evolution of NRC Perspective", IAEA Workshop presented to the Korean Advanced Energy Research Institute, Feb. 19-22, 1990
 - 17) "Completion of Containment Performance Improvement Program and Forwarding of Insights for Use in the Individual Plant Examination for Severe Accident Vulnerabilities- Generic Letter No.88-20, Supplement No.3," U.S.Nuclear Regulatory Commission, July 6, 1990
 - 18) "Recommendation of Containment Performance Improvement Program for Plants with Mark II, Mark III, Ice Condenser, and Dry Containments," SECY-90-012, U.S.Nuclear Regulatory Commission, March 29, 1990