

## 원자력발전소 중대사고대책(안)

### Severe Accident Countermeasure Plan (Draft) for Nuclear Power Plants

김한철, 이창주, 류용호, 신원기

한국원자력안전기술원  
대전광역시 유성구 구성동 19

#### 요 약

원자력발전소는 중대사고 발생 가능성과 중대사고가 일어날 경우 공중에 미치는 영향이 극소화될 수 있도록 타당하게 설계, 건설, 운영해야 한다. 원자력안전기술원에서는 원자력안전 정책성명과 과거 중대사고대책을 재조명하여 합리적인 수준의 중대사고 규제 방향을 제시하기 위해 중대사고대책(안)을 마련하였다. 본 대책(안)은 가동중 원전과 기존 설계를 참조한 신규 및 차세대 원전을 포함한 향후 원전의 유형별 특성을 고려하여 적용하도록 작성하였다. 본 대책(안)에서는 안전 목표의 설정 및 적용, 확률론적 안전성평가의 수행 및 취약점 보완대책 수립, 중대사고 예방 및 완화 성능의 확보, 중대사고관리 이행 체계의 정립 등을 주요 요소로서 고려하였고, 각 요소에 대한 조치사항은 기존 원전으로부터 향후 원전까지 점진적으로 안전성을 향상시키는 방향으로 설정하였다.

#### Abstract

Nuclear power plants should be designed, constructed, and operated properly so that the likelihood of occurrence of a severe accident and its consequence may be minimized. The Korea Institute of Nuclear Safety has been reviewing the Nuclear Safety Policy Statement and the preceding severe accident countermeasure plan and prepared a new draft plan in order to provide a reasonable regulatory position for severe accidents. This plan has been prepared by taking into account the different reactor types and the characteristics of operating plants, new plants using the existing design, and new ones including the next generation plants. The major elements included in the plan are: establishment and application of the safety goal, performance of the probabilistic safety assessment and establishment of countermeasure plans for the vulnerabilities, provisions for severe accidents prevention and mitigation capability, set-up of a severe accident management program implementation system. Each element has been set up to move progressively toward an upgrading in safety of currently operating plants and future ones.

#### 1. 서론

##### 가. 중대사고 고려의 필요성

우리나라는 부존 자원이 부족한 상태에서 에너지원을 확보하기 위해 70년대부터 원자력을 적극 추진해 왔으며, 그 결과 오늘날 원자력은 국가의 중추적인 에너지원으로 자리잡고 있다. 원

자력 산업은 국내의 다른 산업에 비해 앞서서 안전문화를 받아들이고 안전 기술을 적극 활용하여 높은 수준의 안전도를 추구하고 왔으며 지금까지 공중에 원자력발전소(이하 원전)의 가동에 따른 심각한 위험을 초래하거나 피해를 끼친 일이 없었다. 그러나 미국의 TMI-2나 구 소련의 체르노빌 원전에서 일어난 사고와 같이 설계기준을 초과하여 원자로심의 손상을 수반하거나 환경으로 다량의 방사능을 누출하고 다수 작업종사자의 희생을 초래한 중대사고는 비록 그 발생 가능성이 매우 낮지만 사고가 발생할 경우 사회적, 경제적 영향이 매우 심각한 것으로 나타났으며, 일반인들에게 원전은 매우 위험하다는 인식을 심어주었다.

그러므로 원자로 설치, 운영자는 원전에서 중대사고가 발생할 가능성이 희박하고 만약 중대사고가 일어날 경우에도 공중에 미치는 영향이 극소화될 수 있도록 설계, 건설, 운영하여야 한다. 중대사고가 발생할 경우 그 피해가 국내에만 국한되는 문제가 아니기 때문에 원전을 국내에서 설계할 경우 원자로 설계자는 중대사고에 대비한 원전의 안전성 수준을 국제적으로 인정되는 합리적인 정도로 고려해야 할 것이다.

#### 나. 대책 수립의 필요성

정부는 미국의 TMI-2 원전 사고를 계기로 유사사고의 방지를 위하여 1983년 12월 TMI 후속요건을 국내 원전에 전부 적용하도록 조치하였으며, 1989년 12월에는 영광 3A호기에 사고관리계획을 고려한 안전성 점검을 수행하도록 요구한 바 있다. 한국원자력안전기술원에서는 1990년 2월 중대사고정책에 관한 워크숍을 IAEA와 협동하여 개최하고, 이어 중대사고 대책수립을 위한 산학계의 Working Group을 조직, 운영하여 그 권고사항에 따라 중대사고대책(안)을 1991년 9월에 작성하여 원자력안전전문위원회에 상정한 바 있다. 이 중대사고대책(안)은 법적 효력을 갖지 못하였으나 산학계의 많은 논의를 거쳐 작성되었기 때문에 산업계가 자발적으로 중대사고 대처방안을 고려하는 분위기를 조성하였다.

정부에서는 1994년 9월 10일 원자력안전 정책성명을 공포하여 원자력 규제활동에 대한 일관성, 적절성 및 합리성을 추구하면서 원전 추가 건설에 따른 중 위험도의 배제 등과 같이 위험도를 근거로 한 안전규제 방향을 제시하였다. 이 정책성명에서는 특히 "정량적인 안전목표를 설정하고 중대사고 현상 규명과의 예방 및 완화를 위한 규제지침을 수립하여 장기적으로 기존의 원전을 포함하여 미래의 차세대 원전의 안전 규제에 적용해 나간다."는 정책 방향을 제시하였다.

한편 원자력 사업자는 이러한 규제방침에 맞추어 영광 3A호기에 대해 안전성 점검을 수행하고 급수완전상실사고에 대비하여 안전감압계통을 설치하였으며, 월성 2호기에 대해 외부기인사건을 포함하는 중대사고분석을, 고리 3A호기 및 영광 1,2호기 등에 1단계 확률론적 안전성 평가를 수행하였고, 울진 3A호기에 대해서는 중대사고시 수소제어능력 확보를 위한 수소점화계통 설치, PSA 결과를 활용한 사고관리계획 수립, 격납건물 직접 가열(DCH) 억제를 위한 원자로 공동설계, 격납건물 여과배기계통(CFVS) 설치를 대비한 전용 격납건물 관통부의 확보, 영광 5,6호기 저출력/정지중 PSA 수행 등과 같이 중대사고 대처 능력을 향상시켜 왔다.

이러한 원자력계의 중대사고에 대처하기 위한 노력은 국내 기술 기반이 취약하고 중감대가 성숙하지 못했기 때문에 정책으로 정형화되지는 않았다. 그러나 1990년대 말을 맞아 국내외의 관련 규제 입장이 좀더 구체화되었고, 국내 신규 건설 원전의 인허가시에 규제기관이 중대사고 현안별로 대책을 추진하는 데 대해 산학계는 규제 입장을 사전에 표명해 줄 것을 바라고 있다. 따라서 지금까지의 노력을 재조명하여 관련 국제 기준에 비추어 합리적인 수준의 중대사고 규제 원칙을 제시하는 것이 필요한 상황이다.

## 2. 중대사고 대책(안)의 내용

### 가. 중대사고 대책(안)의 목적

본 중대사고대책(안)은 국내 원전(이하 '원전')의 중대사고에 의해 공중에게 가해질 수 있는 위험을 감소시킬 수 있도록 원자력 산업계가 장기적인 전망을 가지고 대책을 수립하여 설계, 건설 및 운영에 반영하는 것을 촉진하기 위한 규제 입장을 명문화하는 데 있다.

#### 나. 적용원칙

본 대책(안)은 원자력안전 정책성명(1994. 9. 10)의 정책방향과 일관성을 가지고 있으며 공개성, 명확성, 효율성, 신뢰성을 추구하는 안전규제 원칙과 일치하도록 작성하고자 하였다. 본 대책(안)은 가동중 원전과 신규 원전의 안전 규제에 각 유형별 특성을 고려하여 적용하고자 하였다. 특히 신규 원전에 대해서는 기존 설계개념(한국표준형 원전 등)을 채택한 원전과 차세대 원전 등의 향후 원전 등 두 종류로 구분하여 적용함으로써 원자력안전 정책성명의 취지에 따라 점진적 안전성 향상을 도모하고자 하였다.

##### 1) 기본 고려사항

원전에서 중대사고의 발생 가능성이 희박함을 보장하고 중대사고가 일어나더라도 공중에게 가해질 수 있는 위험을 극소화하기 위해 원자로 설치, 운영자가 고려해야 할 것으로 평가된 주요 요소는 정량적인 안전목표의 설정 및 적용, 사고 발생 가능성 평가를 위한 확률론적 안전성평가의 수행과 취약점에 대한 보완대책 수립, 중대사고의 예방 및 완화 성능 확보, 그리고 중대사고관리 이행체계 정립 등이다. 각 사항에 대한 세부적인 적용기준은 별도 지침으로 정한다.

##### 가) 안전 목표 설정 및 적용

원전에서 심각한 방사능 영향을 초래할 수 있는 중대사고의 가능성이 극히 작아야 하며 만약의 경우 원전에서 중대사고가 발생하더라도 그 결과가 소외에 심각한 방사능 영향을 주지 않아야 한다. 이러한 안전 목표의 달성은 가동중인 원전의 평균노심손상빈도가 원자로 가동년 당  $10^{-4}$ 보다 작으며, 방사성 물질이 대규모로 환경에 방출되는 대량누출빈도가 원자로 가동년 당  $10^{-6}$ 보다 작음을 확인함으로써 보장할 수 있을 것으로 평가된다. 또한 새로 건설되는 원전의 평균노심손상빈도 및 방사능대량누출빈도는 가동중 발전소의 목표치에 비해 1/10 이하를 유지함으로써 중대사고의 발생 가능성과 추가적인 위험도 증가를 최소화할 수 있을 것이다. 또한 원전 주변의 주민 개인이 원전 운전에 의해 받을 수 있는 위험도가 기타 사고에 의한 사망이나 부상을 당할 수 있는 전체 위험도에 비해 극히 작아야 할 것이다. 그러나, 향후 수년내 건설허가를 신청하는 원전으로서 한국표준형 원전 등의 기존 설계개념을 채택한 원전에 대해서는 가동중인 원전의 안전목표를 준용하는 것이 현실적으로 필요할 것이다. 가동중 원전의 안전목표에서 고려해야 할 초기사건의 범위는 분석방법론에 포함된 불확실성 등 현재 기술수준을 반영하여 결정한다.

이러한 안전목표의 달성을 위해 원자로 설치, 운영자는 원전의 안전도를 파악하고 지속적으로 감시하여 안전목표를 달성하도록 노력하고 규제자는 인허가시 결정론적 분석 및 확률론적 보완평가에 의해 안전성을 확인한다. 그러나 규제 판단은 가능한 한 비용-편익의 평가에 기초하도록 노력한다.

##### 나) 확률론적 안전성평가 수행 및 취약점 보완대책 수립

국내외에서 수행된 많은 확률론적 안전성평가 결과로부터 원자로시설이 공중에게 과도한 위험을 가하지 않는 것으로 확인되었으나, IAEA, OECD/NEA 등 국제적인 원자력기구에서 권고하는 바와 같이 심층방어의 측면에서 발전소의 위험도를 가능한 한 낮출 수 있는 방안을 찾기 위하여 확률론적 안전성평가 방법을 적극적으로 활용하는 것이 바람직하다. 즉 발전소 손상을 초래할 가능성이 상대적으로 큰 사고 시나리오를 파악하여 이에 대해서는 발전소 설계나 운영절차에서 사고완화능력을 향상시킬 수 있는 사항들을 평가하고 비용-편익을 고려하여 보완하는 것이 필요하다. 이를 위해 원자로 설치, 운영자는 가동중 원전에 대해서는 최소한 발

전소별 안전성 점검을, 신규 원전에 대해서는 확률론적 안전성평가를 수행해야 할 것이다. 예측된 위험도에 대하여 안전목표를 고려하여 평가하고 공중보건과 안전에 과도한 위험이 없음을 적절히 보장할 수 없다면 필요시 설비 보완을 포함한 위험도 저감 방안을 수립, 시행해야 하며, 또한 운전중 안전관련 사건을 평가하고 발전소의 안전 관련 기기의 신뢰도를 재평가하며 위험도를 감시하기 위한 계획을 수립해야 할 것이다.

#### 다) 중대사고 예방 및 완화 성능 확보

원전의 중대사고 예방 및 완화 성능을 확보하고 이를 평가하여 다음 사항을 만족하는 것이 필요할 것이다. 설계기준사고시 원자로심을 보호하는 성능을 확보할 뿐만 아니라, 노심손상이 발생하더라도 단기간동안 중대사고 위험이 있는 상태에서 격납건물이 구조적 건전성을 유지하며 그 후에도 통제불가능한 핵분열생성물의 방출에 대한 방벽의 기능을 유지할 수 있음을 보장한다. 또한 중대사고후 단기간동안 공중 보건에 미치는 영향이 없도록 하고 장기간에도 공중 보건에 미치는 영향과 방사성물질의 방출량을 최소화한다.

중대사고 예방 및 완화 성능의 평가에 고려해야 할 초기사건은 설계기준사고와 안전계통의 동시 고장, 발전소 정전사고, 지진 등을 포함하되, 확률론적 안전성평가 결과에 근거한 사건발생빈도와 관련된 기존지식을 고려하여 결정한다. 이 평가에서는 출력 운전중 및 저출력, 정지중 노심 성능 저하, 핵연료 용융, 원자로용기 용융 관통과 수소 생성 및 연소, 노심용융물 고압 분출 및 격납건물 직접 가열, 노심용융물-콘크리트 상호작용 및 노심 파편 냉각 성능, 격납건물 기초 바닥 용융 관통, 격납건물 우회 누설, 핵분열생성물 이동 등의 현상을 고려해야 한다. 이러한 평가는 노심 손상 후 환경으로 방사능이 방출할 때까지 일어날 수 있는 제반 물리적 현상을 타당하게 모의할 수 있는 모델을 사용해야 할 것이다.

고려해야 할 중대사고 대처수단에는 100% 핵연료 피복재 금속물 반응에 의해 생성되는 수소의 제어, 고압노심용융사고에 대한 안전감압계통, 격납건물 직접 가열 억제를 위한 원자로공동 설계, 노심용융물과 냉각재 상호작용에 대해서는 비산물과 폭발 동하중에 대한 구조물의 건전성 유지, 노심용융물과 콘크리트 상호작용에 대해서는 원자로공동 면적 및 두께나 공동충수계통, 격납건물 우회누설에 대해서는 발생 가능성을 감소하고 대처하기 위한 설비, 격납건물 과압에 대한 여과 배기, 잔열제거계통 및 교류/직류 전원계통의 신뢰도 등을 포함해야 할 것이다. 중대사고 완화 기기에 대해서는 발전소정전사고에 대비한 비안전성 기기에 준하는 품질보증 및 규격을 적용하되 중대사고 환경을 고려하여 생존성을 보장해야 하며, 타당한 가동중 시험 및 검사 요건을 적용해야 할 것이다. 또한 설계기준사고에 대해 설치된 안전관련 기기를 중대사고 상황에서 사용해야 할 경우에는 기능 수행이 필요한 기간동안 중대사고 조건에서 생존할 수 있음을 보장해야 한다.

#### 라) 중대사고관리 이행 체계 정립

원자로 설치, 운영자는 원전의 중대사고 발생에 대비하여 노심 용융의 진행을 차단하고 방사성 물질의 환경 방출을 억제하기 위한 중대사고관리계획을 수립하여 이행해야 한다. 중대사고관리계획에는 사고관리전략의 개발, 사고관리지침서 및 절차서의 개발, 필수 기기의 이용 가능성 평가, 사고관리 수행 조직의 확립, 교육 및 훈련에 관한 사항을 포함해야 한다.

## 2) 원전 적용방안

위 고려사항에 대해 원전 유형별로 적용이 필요한 사항은 아래와 같다.

### 가) 가동중인 원전

- (1) 내, 외부사건에 대한 2단계 확률론적 안전성평가나 안전성 점검을 이미 수행한 원전을 제외한 모든 가동중 원전에 대하여 가동년수가 오래된 원전부터 발전소별 안전성점검을 수행하고, 향

후 5년 이내에 그 결과를 제출해야 한다.

- (2) 모든 가동중 원전에 대하여 안전 관련 계통 및 기기의 신뢰도 자료를 수집, 평가하고 위험도 재평가계획과 위험도 감시계획을 (1) 항 완료 후 2년 이내에 수립하여 제출하고 이를 이행해야 한다.
- (3) 이미 중대사고관리계획을 수립한 발전소를 제외한 모든 가동 중 원전에 대하여 향후 6년 이내에 중대사고관리계획을 수립하여 이행하되, 발전소별 가동년수가 오래된 발전소부터 시작해야 한다.
- (4) 위 (1) 내지 (3) 항의 요건을 이행한 결과로 예측된 위험도에 대하여 안전목표를 고려하여 평가하고 공중보건과 안전에 과도한 위험이 없음을 타당하게 보장할 수 없다면 필요시 설비 보완을 포함한 위험도 저감 방안 및 수행 일정을 위 가 내지 다 항 요건의 이행을 완료한 시점으로부터 1년 이내에 제출해야 한다.

#### 나) 기존설계개념을 채택한 신규 원전

- (1) 울진 3,4호기 설계를 근간으로 하는 한국 표준형 원전의 중대사고 예방 및 완화 성능을 최소한의 설계수준으로 확보해야 한다.
- (2) 내·외부사건에 대한 2단계 확률론적 안전성평가와 정지·저출력 확률론적 안전성평가를 수행하고 건설허가 신청시와 운영허가 신청시에 각각 예비 결과와 최종 결과를 제출해야 한다. 단 표준화된 원전의 반복적 설계시에는 공통사항에 대해 대표 원전의 평가 결과를 사용할 수 있다. 최종 확률론적 안전성평가지에는 예측된 위험도에 대하여 안전목표를 고려하여 평가하고 비용편익분석 등을 참조하여 주요 취약점에 대해서는 설계 보완을 포함한 중대사고 위험도 저감 조치를 이행해야 한다. 또한 운전중 안전 관련 계통과 기기의 신뢰도 자료 수집 및 위험도 재평가계획과 위험도 감시계획을 상업운전 전까지 수립하여 제출하고 운전 단계에서 이행해야 한다.
- (3) 중대사고관리계획을 상업운전 전까지 확립하여 제출하고 운전 단계에서 이행해야 한다.

#### 다) 차세대 원전 등의 신규 원전

- (1) 내·외부사건에 대한 3단계 확률론적 안전성평가와 정지·저출력 확률론적 안전성평가에 의해 원전 설계 및 부지의 타당성을 평가하여 안전목표를 만족함을 보여야 한다. 단 표준화된 원전의 반복적 설계시에는 공통사항에 대해 대표 원전의 평가 결과를 사용할 수 있다. 또한 원전 설계기간과 운전중 안전 관련 계통과 기기의 신뢰도 자료 수집 및 위험도 재평가계획과 위험도 감시계획을 상업운전 전까지 수립하여 제출하고 운전 단계에서 이행해야 한다.
- (2) 설계 단계에서 중대사고 예방 및 완화 성능 요건에 따라 수행한 종합적 평가에 근거하여 타당한 설비를 갖추어야 한다.
- (3) 중대사고관리계획을 상업운전 전까지 확립하여 제출하고 운전 단계에서 이행해야 한다.

### 3. 결론

국민의 신뢰가 뒷받침되는 원자력 산업을 추진하기 위해서는 중대사고 발생 가능성과 중대사고가 일어날 경우 공중에 미치는 영향이 극소화될 수 있도록 원전을 설계, 건설, 운영해야 한다. 원자력안전기술원에서는 정부의 원자력안전 정책성명에 제시된 정책방향과 과거에 작성한 중대사고대책(안)을 재조명하여 합리적인 수준의 중대사고 규제 원칙을 제시하기 위해 중대사고대책(안)을 마련하였다. 본 대책(안)은 가동중 원전과 기존 설계를 참조한 신규 원전 및 차세대 원전을 포함한 향후 원전의 유형별 특성을 고려하여 적용하도록 작성하였다. 본 대책(안)에서는 안전목표의 설정 및 적용, 확률론적 안전성평가의 수행 및 취약점 보완대책 수립, 중대사고 예방 및

완화 성능의 확보, 중대사고관리 이행 체계의 정립 등을 주요 요소로서 고려하였고, 각 요소에 대해 조치가 필요한 사항은 기존 원전으로부터 향후 원전까지 점진적으로 안전성을 향상시키는 방향으로 설정하였다. 중대사고대책(안)을 마련하여 원자력안전기술원의 내부 지침으로 활용하는 한편 산학계와 논의를 거쳐 정부에 보고하는 과정을 통해 중대사고대책에 대한 현재까지의 입장을 전반적으로 정리하고 앞으로의 규제방향을 제시하여 가동중 원전과 새로 건설할 원전의 안전성을 타당한 수준으로 유지하는 데에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

1. 원자력안전기술원, "국내 원전의 중대사고 대책수립을 위한 Working Group 기술검토 보고서", KINS/AR-053, 1991. 1.
2. 원자력안전기술원, "원전의 중대사고 대책(안)", 1991. 7.
3. 원자력안전기술원, "국내의 중대사고 대책 수립과 외국의 중대사고 규제정책에 대한 IAEA/KINS 주관 국제 Workshop 결과보고", KINS/AR-006, 1990. 6.
4. 과학기술처, "원자력안전 정책성명", 1994. 9. 10.
5. 원자력안전기술원, "차세대원자로 안전목표 및 안전원칙 개발", KINS/GR-115, 1996. 7. 20.
6. 원자력안전기술원, "원전 안전심사지침", 개정2, 1998.
7. 원자력안전기술원, "원전에 대한 안전성점검 수행 및 검토지침서", KINS-G-016, 1997. 7.
8. U.S.NRC, "Policy Statements on Severe Reactor Accidents Regarding Future Designs and Existing Plants," 50 FR 32138, August 8, 1985.
9. U.S.NRC, "Policy Statement: Safety Goal," 51 FR 30028, August 1986.
10. U.S.NRC, "Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Regulatory Activities; Final Policy Statement," 60 FR 42622, August 16, 1995.
11. U.S.NRC, "Individual Plant Examination for Severe Accident Vulnerabilities - 10 CFR 50.54(f)," GL-88-20, November 23, 1988.
12. U.S.NRC, "Policy, Technical, and Licensing Issues Pertaining to Evolutionary and Advanced Light-Water Reactor (ALWR) Designs," SECY-93-087, April 2, 1993.
13. U.S.NRC, "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis, Regulatory Guide 1.174, July 1998.
14. IAEA, "Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants," Safety Series No.75-INSAG-3, 1988. 6.
15. IAEA, "Probabilistic Safety Assessment," Safety Series No.75-INSAG-6, 1992.
16. IAEA, "The Role of Probabilistic Safety Assessment and Probabilistic Safety Criteria in Nuclear Power Plant Safety," Safety Series No.106, 1992.
17. IAEA, "Accident Management Programmes in Nuclear Power Plants," Technical Reports Series No.368, 1994.