

# 프랑스에 있어서 原子爐安全의 基本概念

## French PWR Safety Phcyosophy



Madeleine M. Conte

CEA/IPSN Dept of Safety Analysis

### 1. 序 文

1970년에 착수된 프랑스의 원전개발계획은 일련의 가압경수로형 원자로의 설계, 건설 및 운전에 관한 것인데, 이러한 원자로의 敷地特性에 관련된 부분적인 변경을 제외하고는 전체적으로 동일한 형태로 되어 있다.

최초로 900MWe급 원자로가 미국의 Westinghouse의 라이선스와 미국의 법규에 따라 건설된 이래 표준화된 원자로인 CP1 및 CP2 시리즈의 28기가 건설되었다.

프랑스에서 원자력발전소를 통해 얻어진 지식과 경험의 증가는 외국에서 얻어진 지식과 경험으로 보충되었으며, 가압경수로형 원자로의 설계 및 안전성에 관한 기본개념을 향상시키는데 크게 기여했다. 한편 1976년에는 이러한 경험을 토대로 프랑스의 원자력 안전기구인 EDF와 공동으로 계획중인 1,300MWe급 원자로 P4와 P4 시리즈의 안전성을 검토하게 되었다. 또한 1983년에는 계획예정인 1,400MWe급 N4 시리즈를 프랑스의 법규, 규칙 및 표준에 따라 프랑스에서 설계하였다.

프랑스에 있어서의 안전성해석은 規定論的 방법을 기초로 하고, 確率論的 방법으로 보완되었으며, 이들은 각기 장단점을 갖고 있다.

1977년에 전체적인 위험도목표가 확정됨에 따라, 안전성해석은 더욱 복잡한 事故를 평가하는데까지 확장되었으며, 그 후에 심각한 사고때의 所外 비상시 계획을 평가할 수 있을 정도로 확장되었다.

### 2. 規定論的 접근방법

#### 2.1 基本原理

원자력발전소에 대한 안전해석을 하는 주목적은 정상운전시는 물론이고 비정상상태 및 사고시에 발생하는 방사성 물질의 누출과 관련하여 공중보건과 환경에 대한 위험도가 허용수준을 넘지 않는다는 것을 확인하는 것이다.

따라서 안전해석은 잔여 위험수준을 허용치이내로 제한할 목적으로 설치된 장치의 이용도 및 효율뿐만 아니라, 잠재 위험도를 평가하기 위해 필요한 기술적 척도의 집합으로 정의될 수 있다.

안전성이라는 관점에서 보면, 잔여 위험도의 중요성과 그 본질에 관한 평가는 일반적으로 알려진 한정된 수의 운전조건에서 야기되는 방사선학적 결과에 대한 規定論的 방법을 기초로 한다.

이중에서 특히 고려되어야 할 몇가지의 상황들을 소위 深層放護(defence in-depth)라는 개념

을 적용하여 해석하고 있으며 핵연료 피복, 냉각계통, 압력계 및 격납용기 등의 방호벽과 여러가지 계통 및 구조의 특성을 평가한다.

## 2.2 深層防護 概念

안전성에 대한 접근방법은 다음과 같은 보호 단계에 의거한 심층방어 개념을 기본으로 한다.

— 제 1 단계 : 설계, 건설 및 운전단계에서, 정상운전조건하의 발전소 특성을 신뢰할 수 있도록 안전 여유도를 충분하게 준다.

— 제 2 단계 : 안전 및 보호계통은, 예측할 수 있는 모든 과도현상 및 사고를 겪은 후에도 발전소가 정상운전상태로 되돌아 갈 수 있도록 필요한 여분을 갖추어야 한다.

여유도나 안전 및 보호계통은 사고발생의 방지를 목적으로 한다.

— 제 3 단계 : 발생할 가능성이 있는 결함으로부터 파생되는 모든 사고 결과를 가정한다. 안전해석을 통해 안전보호계통이 필요한 여분을 갖추고 있고 정확히 작동되며, 지진 및 외부 전원실실을 가정한 사고에 대해서도 환경에 대한 위험도를 허용수준 이내로 유지할 수 있음을 입증해야 한다. 이 분석은 신중한 가정하에 사고 시나리오와 발전소 특성평가에 대해 모두 실시된다.

안전보호계통은 사고의 결과를 완화시키는 것을 목적으로 한다.

심층방호 개념은, PWR의 사고 및 이상상태의 해석을 포함하는 원자로 운전경험과 이론 및 기술적 지식이 축적됨에 따라 그 필요성이 더욱 명확해지고 있다.

## 3. 確率論的 接近方法

역사적으로 볼 때 확률론적 접근방법은 원자로를 설계할 때 고려해야 할 외부사고를 결정하는데 쓰였다. 일반적으로 발전소 부지가 선정되면 외부사고의 확률을 결정할 수 있다.

프랑스에 있어서 원자로 설계의 정당성은 본

질적으로는 規定論的 方法으로 해석되지만, 1977년 초반에 정부는 PWR에 대한 전체적인 위험도 기준을 다음과 같이 정의했다.

“일반적으로, PWR은 허용한계를 벗어나는 사고결과를 일으킬 확률이  $10^{-6}/\text{Reactor-Year}$ 를 초과하지 않도록 설계되어야 한다.”

“또한 이러한 원자로의 설계시에 일군의 사고를 고려해야 할지의 여부를 평가하는데 확률론적 접근방법을 이용한다면, 이러한 종류의 일련의 사고로 인해 야기될 수 있는 허용한계 이상의 사고확률이  $10^{-7}/\text{Reactor-Year}$ 보다 클 것인지를 반드시 고려해야 한다는 것이다. 일련의 사고가 발생할 확률이 검토되어, 이 값을 초과하지 않으면, 이러한 사고에 대해서는 확률을 계산하는 것이 무의미하다고 볼 수 있다.”

“EDF(Electricité de France)는 수많은 사고의 경우에 대해서 가능한 한 확률론적 방법을 이용할 필요가 있다고 본다.”

그렇지만 다음 사항을 유념할 필요가 있다.

“목표”로 생각하는 전체적인 확률은  $10^{-6}/\text{Reactor-Year}$ 이 되도록 하는 것이다. 안전규제 당국에서는 EDF가 이 값이 효과적으로 달성되었음을 증명할 것을 요구하지는 않았다.

“허용한계 이상의 사고”라고 표현되는  $10^{-7}/\text{Reactor-Year}$ 의 위험도 목표는, 公衆에 대한 방호나 부지선정에 있어서의 우발적인 피해를 고려할 때 반드시 짚고 넘어가야 할 수치이다.

외부적 요인의 사고에 대해서는, 사고의 종류를 항공기 추락 등 그 형태에 따라 분류·취급하여 위험도 목표값을 적용한다. 일반적으로 운항도중의 항공기 추락사고의 확률을 계산해보면, 프랑스의 모든 원자력발전소는 이러한 사고에 대해 근본적으로 방호능력을 갖추고 있다. 상업적인 운항만을 따지면, 항공기가 원자로에 추락할 확률은 매우 낮기 때문에 아무런 방호수단도 필요치 않으나 군사적 목적의 항공기 운항까지 감안하여 각 발전소의 위치에 따라 평가하고

있다.

900MWe 및 1,300MWe급의 원자로에 대해서 프랑스에서 채택하고 있는 설계시 운전조건은 ANSI 18.2와 같은데, EDF는 PWR에 대해서 다음과 같이 분류할 것을 제의하고 있다.

Frequency category	Estimated frequency per year	Maximum Radioactive consequences
1	1	Limited by radioactive
2	$10^{-2} - 1$	effluent releases authorizations
3	$10^{-4} - 10^{-2}$	5 mSV (entire organism) 15mSV (thyroid)
4	$10^{-6} - 10^{-4}$	0.15SV (entire organism) 0.45SV (thyroid)

제 1 카테고리와 제 2 카테고리의 사고시 방사능 값만이 범규에 의해 규제되고 있으며, 방사능 누출허용치는 각 발전소의 부지 및 그와 관련한 특성에 따라 결정된다. 한편, 제 3 카테고리 및 제 4 카테고리에 대한 값은 EDF가 제안하여, 안전규제 당국이 이를 채택하였다. 현재까지의 운전경험으로 볼 때, 이러한 값들은 신뢰할 만한 것으로 나타나고 있다.

잔여 위험도에 관하여, 1980년에 안전규제 당국은 로심용융을 포함하여 지금까지의 설계기준에서는 취급되지 않았던 사고에 대해서도 비상계획을 수립할 때 고려하도록 요구했다.

## 4. 安全解析의 開發

### 4.1 안전문제의 概要

深層放護 概念은 이를 적용하여 安全性 문제를 철저하게 조사하는데 있어서 매우 효과적인 역할을 한다.

安全性에 대한 평가는 사고의 표준화된 목록에 기준을 두고 있으나, 발생가능성이 있는 사고에 대한 목록이 철저하게 작성되었는지, 발전소의 설계가 발생가능한 모든 사고의 결과와 잘 일치되는지 등과 같은 몇가지 어려운 의문점들이 일찍부터 제기되었다.

현재까지 원자로 운전자가 겪은 복잡한 상황 중에서 가장 중요한 일례는 TMI 사고의 경우이다. 부품의 기계적 고장에 인간실수가 중복된 결과, 초기사고는 뜻하지 않게도 심각한 로심손상과 로심용융사고를 일으켰던 것이다.

### 4.2 安全性 向上

안전성 향상문제는 다음과 같이 두가지 방향으로 진척되어 왔다.

- 안전성에 관한 일관성의 추구
- 가혹한 사고에 관한 고찰

#### 4.2.1 안전성에 관한 일관성의 추구

##### (1) 상세한 설계검토

안전성과 관련한 일관성에 아무런 문제가 없음을 입증하기 위하여 "기존의 발전소"에 대한 상세한 검토가 이루어졌다. 이때의 접근방법은 순수하게 規定論에 입각하였으며, 축적된 운전경험이 포함되어 정상 운전조건 및 사고시 운전조건 등을 포함하는 전 범위에 걸친 검토를 통해 수정이 필요한 몇군데의 취약점을 찾아내었다.

##### - 안전관리 밸브류

원자로 건물안에 위치한 몇개의 안전밸브는 냉각재 상실사고후 접근이 불가능하거나 물에 잠길 가능성이 있었는데 이들의 위치를 변경하였다.

##### - 중복실패로서의 공통인자

원자력발전소의 실제 특성에 입각하여 高에너지 배관 파열 및 화재사고가 다음과 같이 면밀히 검토되었다.

高에너지 배관에 대해서는 가장 보수적인 파열을 가정했다. 각 건물에서 배관 Whipping 및 분사효과의 결과를 해석하였으며, 한 건물에서 배관의 위치를 변경하였다.

화재에 대한 검토에서도 똑같은 방법을 적용하였으며, 발전소내의 여러 장소에서 화재가 발생하는 것을 각기 가정했다. 배기계통, 화재감지기 및 소화장치를 고려하여 화재의 전파 및

결과를 평가하였다. 그 결과로 자동화재진압 장치가 필요한 것으로 나타났으며, 관련연구가 계속 진행되고 있다.

#### - 단일 증기발생기 배관과열의 분류

증기발생기 배관이 세계적으로 수많은 사고를 일으키는 점을 감안하여, 안전규제 당국에서는 N4 계획을 통해 단일 배관의 완전과열을 설계 기준의 제 3 카테고리, 두개의 배관 완전과열을 제 4 카테고리로 평가할 것을 요구했다. 900 MWe 및 1,300MWe급 원자로에 대해서 이러한 분류를 변경하기에는 너무 늦었지만 적용될 운전절차의 개선과 방출 및 예방적인 제어기술의 의존도향상을 위하여 이러한 사고에 대한 안전성 평가작업을 진행하고 있다.

#### (2) 발생가능한 사고목록

앞서 정의한 바 있는 위험도 목표와 관련하여, 몇몇 여분의 계통에 대한 완전상실사고의 확률 결과가 다음과 같이 평가되었다.

- 전원 공급 장치
- 증기발생기 급수계통
- 최종 heat sink
- ATWS

평가를 통해 다음과 같은 결론을 내렸다.

· 이때의 확률값은  $10^{-6}$ /Reactor-Year 보다 높다. 이러한 값은 제 4 카테고리의 운전조건과 관련된다.

· 이러한 초기사고는 수 시간내에 심각한 로심손상을 일으킬 수도 있다.

일찌기 1977년에 EDF는 1,300MWe급 원자로에 대해서 이러한 사고의 확률을 감소시키고, 사고의 결과를 완화시키기 위해 필요한 적절한 대책을 수립하도록 요청받았었다. 기존의 계통에 대한 새로운 운전절차뿐만 아니라 추가장비를 설치하는 것도 적절한 대책이 될 수 있다.

이러한 사고는 확률값이  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  정도이기 때문에, 보충적인 상황으로 고려되었으며 현실적인 가정과 방법으로 고찰되었다.



설비·장치가 만족시켜야 할 사고의 성질 및 안전성 요구에 대해서, 각각의 사고형태에 대해 경우에 따라 검토되었다. 이러한 형태의 사고에 대해 로심용융현상은 허용할 수 없는 결과를 초래하는 것으로 가정했다. 안전성의 관점에서 추가장치를 설치함으로써 위험도를 목표치인  $10^{-7}$ /Reactor-Year로 감소시키도록 했다.

이때 추가장치의 설치로 인한 최초 설계의 변경은 없었다. 1,300MWe 및 1,400MWe급의 원자로에 대해서는 설계단계에서 추가장치가 요구되었으며, 900MWe급 원자로에서는 기존의 설계에 맞도록 적용시켰으며 다음과 같은 절차와 주요장치로 앞서 언급한 상황들에 대처하게 된다.

#### - 전원의 완전 공급상실시 절차

터보발전기에 의해 전기를 공급받는 기존의 시험용 펌프에 의해 1차계통 펌프에 피드워터를 공급한다. 증기발생기의 증기를 공급받는 터보발전기는 몇몇 방호계통 및 계측계통에 전기를 공급할 수 있도록 한다. 다른 발전소의 디젤발전기 또는 소내부하 발전에 의해 전기의 재공급이 이루어진다.

-증기발생기 급수의 완전상실시 절차

급수후 방출(feed and bleed)에 의해 로심을 냉각시킨다. 운전자는 운전절차서에 따라 가압기 압력감벨브를 열고 수조작으로 안전주입계통을 동작시키며, 1차계통 펌프를 정지시킨다.

-최종 heat sink의 완전상실시 절차

조정실에서 heat sink의 상실에 대해 조기에 감지한다. 전원공급계통의 완전상실시와 마찬가지로 1차계통 펌프에 피드워터를 공급한다. 소내의 가능한 또다른 급수원으로부터 원자로에 물을 공급한다.

-ATWS시 절차

터빈 트랩을 일으키는 신호 및 보조급수계통을 동작시키는 신호를 다양화한다.

냉각재 상실사고후에 잔여열을 제거하기 위해 필요한 살수계통 및 저압 안전주입계통에 대한 長期 信賴度研究가 수행되었다. 이러한 연구의 결과로 주입장치의 실제 의존성은 요구되는 기능을 확보하기에 충분치 않은 것으로 나타났다. 위의 두 계통에 필요한 주입장치는 여분을 갖고 있으며 동일한 것이기 때문에 열제거기능의 신뢰도를 향상시키기 위해 미리 조절된 연결관을 통해 이용가능한 펌프로 하여금 요구되는 기능을 충족시키도록 하여 열제거기능의 신뢰성을 향상시키는 방법도 가능할 것으로 믿어진다.

(3) 심각한 사고에 관한 고찰

深層放護 概念에 따라 심각한 사고에 관한 고찰은 다음과 같이 두개의 과제를 목적으로 한다.

-로심 손상의 방지

-환경에 대한 방사선피해의 지연 및 완화

비정상의 운전조건에서, 원자력발전소의 안전성은 운전자의 조작뿐만 아니라 자동화된 명령이나 계통의 올바른 동작여부에 크게 의존한다.

초기 사고단계에서 적절한 대책을 취하지 않을 경우에 로심손상을 일으키는 심각한 사고로 확산되는 것을 막기 위해 EDF는 로심에서 가능한 모든 냉각상태의 특성에 근거한 새로운 운

전절차서를 제안했다.

연속적인 시나리오에 근거한 標準運轉節次書와는 달리, 이 절차서에 따르면 사고를 유발할 가능성이 있거나 사고를 번지게 할 수 있는 것에는 손상을 주지 않는다. 이것은 인간 혹은 기계에서 기인하는 중복실패의 경우에도 적용될 수 있다. 이 운전절차서에는 원자로의 실제상태를 나타내 주는 자료-수위측정치, 비등여유도, 격납용기내의 온도측정치 등-에 따라 상황을 회복시킬 수 있도록 운전자가 취할 행동이 서술되어 있다.

사고상황중에 운전규칙의 부적당한 범위나 표현을 포함하여, 발생할 수 있는 운전자 실수를 最小化하기 위해 I. S. R. 이 발전소의 상태 및 진전상황을 독자적으로 해석하여 운전자를 뒷받침한다. 초기사고가 비정상적으로 전개될 경우, I. S. R. 은 로심 냉각상태에 근거하여 적절한 운전절차를 거치도록 한다.

爐心熔融의 경우에 격납용기는 환경에 대한 방사능의 누출을 방지하거나 적어도 누출의 정도가 비상시 계획과 일치하는 수준으로 낮추기 위한 최종 방어벽이 된다.

심각한 사고에 대한 安全解析의 결과 격납용기 차단 실패에 대비한 운전절차와 기반용응의 경우에 환경에 대한 직접 누출경로의 차단 및 여과기를 통한 격납용기내의 壓力輕減에 대한 특별한 운전절차가 필요한 것으로 나타났다.

5. 結 論

원자로를 운전함으로써 얻은 지식과 경험의 증가는 프랑스에 있어서 안전성에 관한 基本概念을 향상시키는데 크게 기여했다.

극히 적은 확률의 사고를 고려하고, 안전성에 관한 일관성있는 설계를 추구하고, 確率論的 방법에 의해 規定論的 방법을 보충함으로써 深層放護 概念을 안전성 평가에 적용될 새로운 方法論으로 개발하였다.