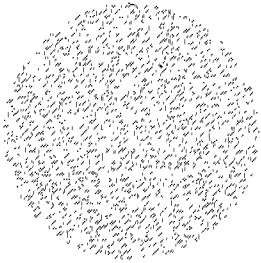


# 原電 安全施設の 設計에 關하여

## On the Design of Safety System in Nuclear Power Plant



閔 景 植

韓國電力技術株式會社 社長

### 1. 서 론

1979년 미국에서 발생한 트리마일 아일랜드(TM I) 원자력발전소 사고이후 원자력발전소의 안전성에 대한 전면적인 재검토가 이루어졌고 그 결과 여러가지 안전장치를 추가, 보완하는 등으로 거의 마무리단계에 와 있을 즈음 1985년 소련의 체르노빌 원자력발전소에서 대형사고가 발생함으로써 원자력발전소의 안전성에 대한 세계인의 관심을 또다시 불러 일으켰다.

그러나 미국 TMI사고의 경우에는 원자력 발전소의 결정적 안전장치는 거의 완벽하여 주민의 피해는 전혀 없었던 데 반하여 소련의 경우에는 그동안 누누히 지적되어 왔던 결정적 안전장치의 미비로 커다란 공공의 피해를 야기하고 말았다.

위의 두 사고는 원자력발전소에서 완벽한 안전장치를 마련하는 것이 얼마나 중요한가를 뚜렷하게 증명해 주고 있다.

본고에서는 총 9기의 원자력발전소를 보유하고 있고 2기를 추가 건설키로 되어 있어 본격적인 원자력발전시대에 진입해 있는 우리나라 원자력발전소의 안전성은 과연 어떠한가를 안전시설의 설계를 중심으로 기술하였다.

원자력발전소의 안전시설은 원자로형별로 서로 상이하게 설계되어 있으나 본고에서는 국내 다수의 원자로형인 가압경수로형(PWR) 원자력발전소를 중심으로 이를 소개하고자 한다.

### 2. 원전설계개념

원전은 우라늄의 연쇄 핵분열반응에서 발생하는 에너지를 이용하는 발전기술로서 화력발전과 다른 특징은 에너지원인 핵분열반응에서 방사성 물질이 생성된다는 점이다.

방사성물질이 미치는 피해 때문에 원전에는 정상 운전 및 가상사고시 외부로 방출되는 방사성물질의 양을 최소한으로 줄일 수 있도록 여러가지 안전시설이 마련되어 있다.

기본적으로 원자력발전소의 안전성을 보장하기위

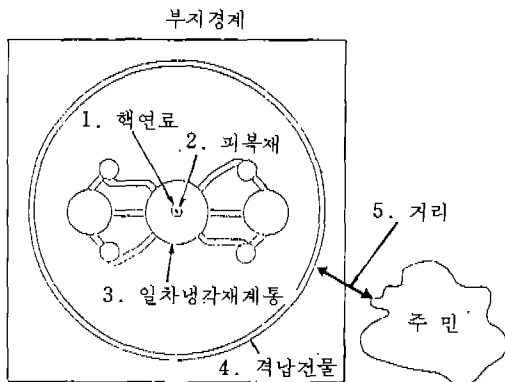
한 설계개념으로는 크게 두가지 개념 즉, 다중방어 개념 (Multiple-Barrier Concept)과 심층 방어개념 (Defence-in-Depth Concept)이 적용되고 있다.

### 2. 1 다중방어개념 (Multiple-Barrier Concept)

다중방어개념이란 방사성물질이 발전소 밖으로 방출되는 것을 최소화하기 위한 것으로 핵연료에서 핵분열시 생성된 방사성물질이 발전소 밖으로 방출되는 과정별로 동 물질의 방출을 억제할 수 있도록 여러단계의 장벽을 설치하는 설계개념을 말한다(그림 1 참조).

원자로 노심에 위치하는 핵연료는 금속피복재 내에 들어 있는데 이는 두 단계의 장벽을 이룬다. 핵연료가 녹지 않는 한 핵연료내 방사성물질이 외부로 나오는 양은 전체량의 1%미만으로 극히 작으므로 핵연료 자체가 1차 장벽의 역할을 수행하며, 방사성물질이 핵연료와 핵연료피복재 사이로 나왔을 경우에는 피복재가 2차 장벽을 이룬다.

또 다른 장벽으로는 핵연료가 장전되어 있는 원자로용기와 일차냉각재계통이 있으며, 이 계통은 원자로를 냉각시킴과 동시에 원자로에서 방출된 열을 발전기로 전달해 주는 역할을 한다. 또한 방사성물질이 발전소 밖으로 방출되지 못하도록 하기 위한 최종적인 장벽으로서 격납건물이 설치되어 있으며, 격납건물은 소련의 체르노빌사고로 인하여 그 중요성이 더 한층 강조되었다.



〈그림-1〉 다중방어설계 개념

이상의 장벽들은 모두 눈으로 볼 수 있는 즉, 물리적 장벽이며 이에 추가하여 개념적 장벽으로서 일반 주민을 발전소로부터 충분한 거리를 두어 거주케 하거나 발전소사고시 주민을 안전한 곳으로 긴급대피토록 하는 비상계획등이 마련되어 있다. 이상의 모든 장벽은 결국 원전의 운전으로부터 일반 대중에게 미치는 방사선영향을 최소화하기 위한 노력인 것이다.

### 2. 2 심층방어개념 (Defence-in-Depth Concept)

한편, 기기손상, 운전원의 실수, 자연재해 등의 사고로 인하여 2.1항에 기술된 여러장벽이 손상받지 않도록 하는 안전성개념을 심층방어라 한다. 이 개념은 사고자체의 예방, 사고확대 방지 그리고 방사성물질의 누출방지에 관한 세 단계로 구분되며

〈표-1〉 심층방어개념

단 계	개 념	목 표	방 어 방 법
1단계	사고예방 (Prevention)	설계, 건설 및 운전중 전반에 걸쳐 안전성을 고려하여사고를 미연에 방지	· 음온도, 음기포만 응도계수 · 발전소운 전상태하에서 안전한 재질 · 다중설계의 계속적 어설비 마련 · 건설및기기설치시 최고의 표준사용 · 기기설계및 설치시 연속 또는 주기적 인 감시, 검사 및 시험실시
2단계	사고확대방지 (Mitigation)	가상사고시사고의 확대를 방지 · 핵연료용융및 핵분열생성물 방출방지 · 원자로진급 정지	· 비상노심냉각계통 설치 · 원자로진급정지 · 비상전원공급
3단계	누출방지 (Containment)	가상설계기준 사고 (Design Basis Accident) 시규제요건만족	· 다수의 공학적안전 설비 (Engineered Safety Feature) 설치

각 단계별 설계목표 및 방어방법은 표 1에 나타난 바와 같다.

원전에서 사고가 발생할 경우 사고가 미치는 영향이 매우 광범위하고 지속적이므로 원전은 고도의 신뢰성을 갖추어야 한다.

이미 언급한 안전설계개념 외에도 원전에 대하여 고도의 신뢰성을 갖추도록 요구하는 단일사고기준 (Single Failure Criteria)이 마련되어 있으며 이는 원전의 안전시설이 정확하게 작동할 수 있도록 하기 위한 것이다. 단일사고기준을 만족하기 위해서 원전의 안전시설은 완전하고 동일한 기능을 수행할 수 있는 설비를 최소한 두 트레인 (Train) 이상 설치하며 두 트레인을 서로 다른 격실에 분리·설치하는 등 어떠한 경우라도 반드시 한 트레인은 작동하도록 다중설계 되어 있다. 또한 이들 안전계통트레인은 각기 서로 독립된 두개의 전력계통으로 부터 급전되며, 각 전력계통은 소외 (Offsite) 전원과 소내 (Onsite) 전원으로 구성된다. 이는 소외전원의 상실 시에도 소내비상전원을 가동시켜 안전시설을 작동시키기 위한 배려인 것이다.

### 3. 적용법규 및 기준

원전에 대한 안전설계개념은 설계뿐만 아니라 제작, 건설, 인허가, 운전, 보수의 전과정에 적용되고 있으며 이를 위하여 법규 그리고 동 법규를 만족시킬 수 있는 기준을 준비하고 있다.

국내의 경우 원자력 산업의 연륜이 일천하여 외국 즉 원자로 도입국가의 기준을 준용하고 있으며 이를 국가별로 비교하면 표 2와 같다.

상기 법규나 규격을 적용하기 위해서 원전의 모든 시설은 안전중요도에 따라 몇가지 등급으로 분류되며 가장 대표적인 분류방법으로는 안전등급에 의한 분류와 내진등급에 의한 분류가 있다.

#### 3. 1 안전등급 (Safety Class)

기계기기는 안전성에 미치는 중요도에 따라 표 3과 같이 4가지 안전등급으로 구분하여 설계하게 된다.

〈표-2〉 각국의 원자력관련 법규 및 기준

종류 \ 국가	한 국	미 국	프 랑 스
법 규 (Regulation)	원자력법	원자력법 10 CFR	안전성에 관한 일반 원칙
지 침 (Guide)	원자력법시행령 원자력법 시행 규칙	규제지침서 (R. G.)	안전기본규칙 (RFS)
기 준 (Code & Standard)	K. S.	ASME IEEE ANSI	설계 및 건설 규정 (RCC)

〈표-3〉 안전등급

등 급	기능 혹은 범위	해당계통 혹은 위치
안전등급 1 (Safety Class 1)	발전소수명기간동안 1회 미만으로 발생할사 고를 유발시킬 수 있는 기기	일차냉각재계통을구성 하는 주요기기
안전등급 2 (Safety Class 2)	안전등급 1이 아니면서 격납용기내에 위치한 안전계통	- 잔열제거계통, 화학 및 체적 제어계통, 비상노심냉각계통, 격납용기살수계통등 - 격납건물 및 격납건물 경계를 이루는 기기 - 격납건물 수소제어 계통
안전등급 3 (Safety Class 3)	안전등급 1, 2가 아니면서 손상되는 경우 방사성물질의 외부누출이 가능한 기기	- 방사성폐기물처리계통 - 화학 및 체적 제어 계통의 냉각 재경화에 필요한 기기 및 붕소 보충계통 - 기타 안전관련 계통
비원자력 안전등급 (Non Nuclear Safety Class)	안전등급 1, 2, 3에 해당 하지 않는 기기	

한편 전기기기는 안전성과 관련하여 1E급 (Class 1E)과 비 1E급 (Non-Class 1E)으로 구분되는데 1E급 기기는 원전사고후 일반대중을 보호하기 위해

〈표- 4〉 1E 급 설계요건 및 해당계통

설 계 요 건	해 당 계 통
· 다중성	· 원자로 긴급정지
· 소외전력상실시작동	· 비상노심냉각
· 사고시 및 지진에 전될 수 있게 설계	· 잔열제거 · 격납전물 열제거 · 방사성물질의 외부방출방지

작동되어야 하는 계통 및 관련기기로써 표 4의 사항을 만족한다.

### 3. 2 내진범주(Seismic Category) 분류

내진범주는 원전에서 사용되는 기기 및 구조물이 건설하고자 하는 부지에서 가상할 수 있는 최대지진인 안전정지지진 (SSE : Safe Shutdown Earthquake) 발생중 및 후에도 본래의 기능을 발휘해야 하느냐에 따라 내진범주 I 과 비내진범주 I로 분류된다. 내진범주 I에 속하는 설비의 기능과 이에 해당하는 설비는 표 5와 같다.

〈표- 5〉 내진범주 I

기 능	해 당 설 비
· 일차냉각재 계통 전 전성 유지	· 안전등급 1, 2, 3에 속하는 기기
· 원자로안전정지 및 안전정지상태유지	· Class 1E 전기기기 · 상기 기기를 수용하는 구조물
· 사고결과 완화	

## 4. 안전시설 및 안전시설보호

원전은 설계, 건설 및 운전시 사고발생 확률을 최대한으로 줄이고 있으나 가상되는 급박한 사고를 경보하고, 사고의 확대를 방지하며, 방어장벽의 건전성을 확고히 하기위해 사고진행을 신속히 제어 방출되는 방사성물질의 양을 줄일수 있도록 안전시설을 설치한다.

안전시설은 자동감지설비를 통해 발전소의 상황을 파악하고 안전기능을 수행할 수 있어야 하는데 이는 원자로운전 정지계통과 공학적안전설비로 구

성되며 이들을 간략히 소개하면 다음과 같다.

### 4. 1 안전시설

#### 가. 원자로운전정지계통

대부분의 사고상황에서 가장 중요하고도 신속해야 할 사고대응절차는 핵분열반응의 즉각적인 정지로서 이는 원전의 안전성 확보에 가장 필수적인 요소이다.

이를 통해 출력을 정상출력의 1%미만으로 감소시킬 수 있으며, 원자로 정지후에 계속 발생되는 에너지 즉, 붕괴열을 제거시킬 수 있게 된다. 이와같은 관점에서 본 계통은 사고와 동시에 신속히 작동하여 원자로를 즉각 정지시킨 다음 정지상태를 계속 유지할 수 있도록 설계되어 있다. 원자로가 운전정지된 후 붕괴열을 제거하지 못하면 에너지의 균형이 이루어지지 않아 노심의 용융도 가능하기 때문이다.

#### 나. 공학적안전설비 (ESF; Engineered Safety Features)

본 설비는 노심용융 및 방사성물질의 확산을 방지하기 위한 설비로서 발전소 수명기간(통상 40년) 동안 발생확률이 1회미만으로 극히 적은 대형사고가 발생할 경우 원자로를 보호하고 일차 냉각계통으로부터 누출된 방사성물질로부터 발전소 요원 및 일반주민의 안전도모에 필요한 기능을 수행케 되며 다음과 같은 기능을 갖는 부 계통들로 구성되어 있다.

##### 1) 비상노심냉각계통

(ECCS : Emergency Core Cooling System)

본 계통은 사고후 원자로 노심으로 부터 열을 제거하여 핵연료봉의 손상을 방지한다. 본 계통의 구성 및 기능은 표 6과 같다.

##### 2) 격납전물계통

본 계통은 일차냉각계통이 파손되어 방사성물질이 발전소 밖으로 방출될 가능성이 있을 때 이를 방지하기 위한 계통으로서 파손에 의한 격납 전물의 손상방지와 방사성물질의 방출량감소기능을 가지며 이를 위하여는 사고후 신속한 격납전물 격리와 격

〈표-6〉 비상노심 냉각계통의 기능

계 통	부 계 통	기 능
안전주입계통	고압안전주입계통 저압안전주입계통 안전주입탱크	· 봉산수를 노심에 주입하여 노심을 냉각시킨다.
잔열제거계통		· 대형사고시비상노심방각을 위한 저압 안전주입계통의 일부로 사용된다.

〈표-7〉 격납건물계통의 기능

계 통	기 능
격납건물격리계통	사고시공학적 안전설비 작동에 필요한 배관을 제외한 모든 배관을 차단한다.
격납건물살수계통	사고시 격납건물 상부에서 물을 살포하여 격납건물내 온도와 압력을 감소시키며 방사성요오드를 포획한다.
격납건물 열제거계통	사고시 격납건물내 공기를 냉각시켜 압력을 낮추고 격납건물내에 떠 있는 방사성기체의 누출 가능성을 줄인다.
격납건물공기정화 및 가연성 기체 제거계통	사고시발생되는 과도한 양의 수소를 제거하여 격납건물 내부에서의 수소 폭발을 방지한다.

납건물 감압이 필요하게 된다. 격납건물 계통별 주요기능은 표7에 나타난 바와 같다.

3) 기타계통

비상노심냉각계통과 격납건물계통 이외에도 공학적인안전설비로는 증기발생기에 비상급수를 하는 보조급수계통과 사고진행기간중 및 사고후의 발전소 제어를 위해 운전원이 제어실에 거주할 수 있도록 하는 제어실거주계통, 공학적인안전설비 여과계통 등이 있어 사고의 결과를 완화시킬 수 있도록 되어있다.

4. 2 안전시설 보호

원전내에서 고려될 수 있는 대표적인 재해로는 인화물질의 폭발 및 점화에 의한 화재, 고압계통 파열 또는 중하물 추락에 의한 비산물(missile), 그리

고 배관파단에 의한 재해를 들 수 있다. 안전시설이 이들 재해의 의해 그 기능을 상실한다면 원전의 안전성이 위협받게 된다. 그러므로 원전은 계통 자체가 재해를 받지 않도록 보호되어 있다.

원전설계시 안전시설을 재해로부터 보호하기 위한 가장 효과적인 방법으로는 재해유발이 가능한 계통 및 기기의 배치를 발전소설계 초기단계시 충분히 고려하는 것이다. 설계초기 단계에서 안전에 중요한 계통의 다중설비를 같은 곳에 배치하지 않는 즉, 외함(Enclosure)에 배치하거나 다른 격실에 또는 서로 다른 높이에 배치하는 등의 보호방법이 필요하다. 재해종류에 따라 보호방법도 달라질 수 있는데 비산물, 홍수현상, 습도, 과열 등의 재해에 대해서는 격실을 설치하며 분사현상, 충격, 화재에 의한 과열 등은 공간적으로 거리를 둬으로써 기기를 보호할 수 있다.

상세 보호방법으로는 기기배치, 장벽과 외함 설치, 공간적인 분리 및 기타 대안이 있는데 안전시설의 다중설비는 다른 격실에 위치하거나 다른 높이에 설치하는 기기 배치 방법에 의해, 장벽과 외함은 홍수현상, 배관휨, 분사, 비산물 등으로 부터 기기를 보호하는 데 사용될 수 있으며 해당 재해에 견딜 수 있게 설계되어야 한다. 이와같은 예로는 제어반, 전선관, 밀봉케이블, 트레이등의 설계를 들 수 있다. 어떤 재해는 적당한 거리를 유지함으로써 방어될 수 있다. 전기화재를 제외한 다른 재해에 대해서는 충분한 분석후 공간적으로 분리하여 재해를 방어한다. 특히 배관휨현상, 경첩을 중심으로 한 회전현상등 그 효과가 일정거리내에 미치는 재해에 대해서는 공간적 분리에 의한 보호방법이 효과적이다.

또한 상기 세가지 보호방법이 적용될 수 없는 경우에는 구속기(Constraint), 경화설계(Hardening Design), 사고조건하에서 계통의 일시격리방법들이 사용될 수 있다. 경화설계란 기기 재질을 바꾸거나 그 두께를 늘려 어느 정도의 재해에는 견딜 수 있도록 기기의 취약점을 보완하는 보호방법이다.

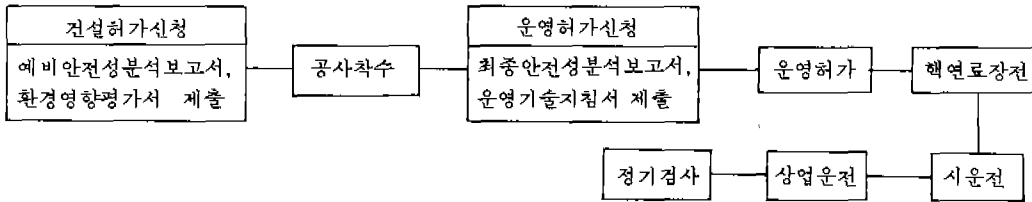
5. 안전규제

원자력발전 사업은 사고가 발생하였을 경우 발전소 종사자는 물론 인근주민에 대한 피해와 주변의 오염이라는 심각한 문제로까지 확대되어 국토의 손실을 초래할 가능성이 있어 원전을 건설·운영하기 위해서는 건설에서부터 준공 및 운전에 이르기까지

철저히 규제함으로써 사고의 가능성을 배제하고 있다.

우리나라 원전의 규제절차를 개략적으로 소개하면 그림2와 같다.

이러한 인허가 절차에서와 같이 전력사업자는 전



〈그림-2〉 인허가 절차

설, 운전단계에서 안전성분석 보고서를 제출하는 등 철저한 인허가 절차가 마련되어 있으며 가동전 검사(PSI) 및 가동후검사(ISI), 정기검사를 통해 사고를 예방하고 사고시에는 사고원인, 내용, 분석 결과를 규제기관에 보고하여 사고의 재발을 방지하는 등 원전의 안전성 향상에 박차를 가하고 있다.

## 6. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 원전의 설계는 다중 방어 및 심층방어 개념을 근간으로 방사성 물질의 외부 누출을 최소로 억제하는 한편 여러가지 적절

한 안전시설들을 설치하여 사고를 미연에 방지하고 또 최소화시킬 수 있도록 함으로써 견고한 안전성을 확보하고 있다. 아울러 중요한 안전시설 설계는 단일고장사고를 방지하기 위하여 다중설계개념을 적용하고 있으며, 사고시 동 시설들의 작동을 보장하기 위하여 각종 보호장치까지 마련되어 있어 원전의 안전성을 더욱 제고해 주고 있다. 그러나 이상의 안정장치 마련에도 불구하고 안전성분석기법 개발 및 시설보안등을 통한 끊임없는 원전의 안전성 제고 노력이 계속되고 있어 앞으로 원전의 안전은 더욱 더 공고해질 전망이다. \*

