

KAERI/TR-2730/2004

국내 표준형 원전과 중수로형 원전의 가상  
중대사고 리스크 평가

(An Assessment of Hypothetical Severe Accident  
Risks for KSNP and PHWR Plants in Korea)

*KAERI*

2004년 2월

한국원자력연구소

Korea Atomic Energy Research Institute

# 제 출 문

## 한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2003년도 원자력 연구개발 중장기 사업 과제 “발전원별 종합 위험도 비교평가 연구”의 기술보고서로 제출합니다.

기술보고서명 :

국내 표준형 원전과 중수로형 원전의 가상 중대사고 리스크 평가

(An Assessment of Hypothetical Severe Accident Risks for KSNP and PHWR Plants in Korea)

2004년 2월

주 저 자 : 정 종 태

공 저 자 : 김 태 운

하 재 주

# 요 약 문

## I. 제목

국내 표준형 원전과 중수로형 원전의 가상 중대사고 리스크 평가

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

원전에 대한 대국민 수용성을 높이기 위해서는 의사결정의 민주성과 투명성을 제고시키는 한편 발전원별 안전성에 관한 정보가 공개되어야 하는데, 이를 위해서는 발전원별 사고로 인한 리스크의 비교, 평가가 필요하다. 수력 발전의 경우에는 댐의 붕괴로 인한 대형 인명사고의 가능성이 있으며 화석연료 발전의 경우에는 연료 채굴 및 수송단계에서 인명 및 재산손실 사고가 가끔 발생한다. 그러나 원자력 발전의 경우에는 1986년 체르노빌 사고를 제외하고는 인명사상을 동반한 사고는 없었다. 따라서 본 연구의 목적은 국내 경수로형과 중수로형 원자력 발전소의 가상 중대사고로 인해 주변주민에게 미치는 리스크를 평가하고 비교하고 타 발전원과 리스크 측면에서 비교분석하는 것이다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 한국 표준형 원전인 울진 3,4호기와 중수로형 원전인 월성 1호기의 가상 중대사고시 대기 중으로 방출되는 방사성 물질로 인한 주변 주민의 인체 건강에 미치는 영향을 평가하고 서로 비교하였다. 방사성 물질로 인한 발전소 주변 주민의 인체에 미치는 영향의 지표로서 조기사망율과 장기적인 암사망율을 선정하였으며 평가 결과는 사고 발생빈도를 고려한 리스크로 표현하고 상보누적 함수(CCDF; Complementary Cumulative Distribution Function) 곡선군으로 도시하였다. 또한, 외국의 원자력 발전소의 사고로 인한 리스크 평가 결과뿐만 아니라 다른 발전원의 사고로 인한 리스크와도 비교하였다.

## IV. 연구개발 결과

경수로형 원전에 비해 중수로형 원전이 주변 인구가 많은데도 불구하고 사망자 수나 리스크가 적게 나타나는데 이는 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 가상 중대사고로 인해 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 적기 때문이다.

두 발전소 모두 최대 리스크를 보이는 방사선원 방출군의 대표적인 초기사건은 증기발생기 세관파손 사고이다. 따라서 경수로형 및 중수로형 발전소 모두 사고로 인한 주변 주민에게 미치는 리스크를 최소화하기 위해서는 증기발생기 세관파손 사고빈도와 이로 인한 대기 중으로의 방사성 물질의 방출을 최소화하기 위한 방안이 강구되어야 한다.

중대사고로 인한 방사성 물질 누출 빈도와 치사율 측면에서 볼 때, CCDF 곡선군으로 표현한 분석 결과는 미국에서 분석한 원자로 안전성 연구(WASH-1400) 결과와 비슷한 결과를 보인다. 그러나 연료의 채굴 및 수송단계에서 인명사고가 많이 발생하는 화석연료(석유, LNG, 석탄) 발전시스템과 댐의 붕괴로 대형 인명사고를 가져오는 수력 발전시스템에 비해서는 인명사고를 야기하는 중대사고 발생빈도 측면에서 원자력발전시스템은 1/100 ~ 1/1000의 빈도를 나타내었다.

## V. 연구개발 결과의 활용계획 및 건의사항

평가 결과는 향후 원자력 이외 다른 발전원의 사고로 인한 리스크와 비교함으로써 원자력발전의 대국민 수용성 증대를 위한 자료로 이용될 수 있을 뿐만 아니라 모든 발전원의 전력생산으로 인한 환경영향 평가 결과를 함께 고려한 발전원별 대국민 수용성 평가를 위한 기초 자료로 이용될 수 있다.

# SUMMARY

## **I. Project Title**

An Assessment of Hypothetical Severe Accident Risks for KSNP and PHWR Plants

## **II. Objective and Importance of the Project**

The information for the safety of nuclear power plants should be open to the public and enhancement of the democratic and transparent decision making should be made in order to increase the public acceptance of nuclear power plants. The objective of this study is to estimate and compare the risks resulting from the severe accidents of PWR(Pressurized Light Water Reactor) and PHWR(Pressurized Heavy Water Reactor) plants.

## **III. Scope and Contents of the Project**

The risks resulting from hypothetical severe accidents of the typical 1,000MWe KSNP(Korea Standard Nuclear Plant) and the typical 600MWe CANDU(PHWR) plant were estimated and compared. The risk measures considered in this comparison study are early and cancer fatality risks. The results are presented as CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function) curves considering the occurrence frequency of each STC(Source Term Category). Also, the results were compared with the risks of foreign nuclear power plants and risks of various power plants such as coal, oil, LNG, and hydro power systems.

## **IV. Result of Project**

The early and cancer fatality risks of a PHWR plant are lower than those of a KSNP plant in spite of the fact the total population of the PHWR site are larger than that of the PWR plant. This is attributed to the fact that the amount of radioactive materials that released to the atmosphere resulting from

the postulated severe accidents of a PHWR plant is smaller than that of a PWR plant. And, the dominant initiating event of the STC that shows maximum early and cancer fatality risk is SGTR(Steam Generator Tube Rupture) for both plants. Therefore, the appropriate actions must be taken to reduce the occurrence probability and the amounts of radioactive materials released to the environment in order to protect the public for both PWR and PHWR plants.

From the aspects of the release frequency of radioactive materials and fatalities, the results of this study presented as CCDF curves show similar results of the Reactor Safety Study(WASH-1400). But, from the respect of occurrence frequency of severe accidents that cause fatalities, the nuclear power system shows the frequency of  $1/100 \sim 1/1000$  comparing with the fossil fuel systems(coal, LNG, oil) that cause many fatalities during the mining and transport stage and hydro plants that causes large fatalities due to dam failure.

## **V. Proposal to Applications**

The results of this study can be used for the enhancement of public acceptance of nuclear power plants by comparing with risks of other power plants. Also, they can be used as basic data for the estimation of public acceptance if they are combined with the environmental impacts of other fuels.

# CONTENTS

Chapter 1. Introduction .....	1
Section 1. Background of the study .....	1
Section 2. Objective of the study .....	1
Section 3. Scope of the study .....	2
Chapter 2. Contents and Results of the Study .....	3
Section 1. Methodology of the study .....	3
1. Overview of Level-3 PSA .....	3
2. Overview of MACCS2 Code .....	4
Section 2. Major Input Data .....	7
1. Source Term Data .....	7
2. Meteorological Data .....	17
3. Population Distribution Data .....	21
4. Exposure Estimation Data .....	26
Section 3. Estimation and Comparison of Risks .....	27
1. Estimation and Comparison of Risks for Domestic Nuclear Power Plants .....	27
2. Comparison with Foreign Research Results .....	36
Chapter 3. Conclusions and Recommendations .....	40
Section 1. Conclusions .....	40
Section 2. Recommendations .....	41
Chapter 4. References .....	42

# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구 목적 .....	1
제 3 절 연구 범위 .....	2
제 2 장 연구개발 내용 및 결과 .....	3
제 1 절 연구수행 방법 .....	3
1. 3단계 PSA 개요 .....	3
2. MACCS2 코드 개요 .....	4
제 2 절 주요 입력 자료 .....	7
1. 방사선원 자료 .....	7
2. 기상 자료 .....	17
3. 인구분포 자료 .....	21
4. 피폭 영향 평가 자료.....	26
제 3 절 리스크 평가 및 비교 .....	27
1. 국내 원전 리스크 평가 및 비교 .....	27
2. 외국 연구결과와의 비교 .....	36
제 3 장 결론 및 건의사항 .....	40
제 1 절 결론 .....	40
제 2 절 건의사항 .....	41
제 4 장 참고문헌 .....	42



## 표 목차

표 1.	시범분석 대상 원전 현황 .....	2
표 2.	해외 비교 분석 자료 현황 .....	2
표 3.	울진 3,4호기 및 월성 1호기의 노심재고량 .....	8
표 4.	울진 3,4호기의 방사선원 방출군 특성 .....	13
표 5.	월성 1호기의 방사선원 방출군 특성 .....	14
표 6.	MACCS2 코드에서 활용되는 9개 그룹별 방사성 동위원소 .....	15
표 7.	울진 3,4호기의 방사선원 방출군별 방출분율 .....	16
표 8.	월성 1호기의 방사선원 방출군별 방출분율 .....	16
표 9.	울진 및 월성 부지의 풍속 분포 .....	18
표 10.	울진 및 월성 부지의 대기안정도 빈도 .....	19
표 11.	울진 및 월성 부지의 풍향별 빈도 .....	20
표 12.	울진 및 월성 부지의 거리별 인구분포 .....	21
표 13.	각 발전소에 대한 방사선원 방출군별 방출분율 .....	31
표 14.	각 발전소별 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양 .....	32
표 15.	증기발생기 세관파손 사고의 경우 사망자 수의 변화 .....	34
표 16.	적용 방사선원항 및 적용 부지에 따른 최대 사망자 수의 변화 .....	34
표 17.	외국 연구결과와의 원전 중대사고 리스크 비교 .....	39
표 18.	다른 발전원과의 리스크 비교 .....	39

## 그림 목차

그림 1.	3단계 PSA의 기본 요소 및 입력자료 .....	4
그림 2.	표준형과 중수로형 원전의 노심 핵분열 생성물 재고량 비교 ...	9
그림 3.	울진 3,4호기의 방사선원향 방출군 논리도 .....	11
그림 4.	울진 3,4호기의 방사선원향 방출군 논리도 .....	12
그림 5.	표준형과 중수로형 원전의 방사선원향 방출범주별 중대사고 발생빈도 .....	14
그림 6.	울진 및 월성 부지의 풍속 분포 .....	18
그림 7.	울진 및 월성 부지의 풍향 분포 .....	19
그림 8.	울진 및 월성 부지의 대기안정도 분포 .....	20
그림 9.	울진 및 월성 부지 근처 80km 반경 거리별 누적 인구분포 .....	21
그림 10.	울진 부지의 인구분포 (0-16km) .....	22
그림 11.	울진 부지의 인구분포 (16-80km) .....	23
그림 12.	월성 부지의 인구분포 (0-16km) .....	24
그림 13.	월성 부지의 인구분포 (16-80km) .....	25
그림 14.	울진 3,4호기의 방사선원 방출군별 조기사망 리스크 .....	28
그림 15.	월성 1호기의 방사선원 방출군별 조기사망 리스크 .....	28
그림 16.	울진 3,4호기의 방사선원 방출군별 암사망 리스크 .....	29
그림 17.	월성 1호기의 방사선원 방출군별 암사망 리스크 .....	29
그림 18.	최대 리스크를 보이는 방사선원 방출군에 대한 리스크 비교 ...	30
그림 19.	증기발생기 세관과단 사고의 경우 방사선원 방출분율 .....	31
그림 20.	증기발생기 세관과단 사고의 경우 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양 .....	33
그림 21.	경수로와 중수로의 방사선원 방출자료를 울진부지에 적용한 경우의 리스크 곡선 분포 .....	35
그림 22.	경수로와 중수로의 방사선원 방출자료를 월성부지에 적용한 경우의 리스크 곡선 분포 .....	35
그림 23.	미국의 100기 원전 운전으로 인한 리스크와 타 인공재해로 인한 리스크 곡선 .....	37
그림 24.	최근 30년간 에너지 사용으로 인한 여러 가지 발전원별 리스크 곡선군 .....	38

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 배경

우리나라의 에너지 부문은 지난 40여 년간 에너지 소비의 급속한 양적 팽창과 함께 새로운 에너지원의 지속적인 도입으로 질적 고도화를 경험하였으며 이는 우리나라의 고도성장을 뒷받침하고 국민의 삶의 질을 증진하는데 크게 기여하였다. 이 중 원자력은 지속가능한 발전을 위해 불가피한 선택이라는 평가를 받을 뿐만 아니라 1986년 이후 최대 전력공급원의 위치를 유지해오고 있으며 이로 인하여 원자력이 에너지수급 안정화와 에너지 다변화 및 에너지 안보에 크게 기여함에도 불구하고 국민의 이해를 충분히 얻지 못하고 있는 실정이다[1].

또한, 최근에는 유럽을 중심으로 전통적인 연료주기에 대한 경제성 평가에서 무시되어온 에너지 사용으로 인한 사회나 환경에 부과되는 외부비용 평가가 수행되고 이를 정량화하여 에너지 정책 결정 과정에 반영하려는 움직임이 매우 활발하게 진행되고 있다[2]. 특히, 국제적으로 지구온난화 방지를 위한 기후협약과 교토의정서는 선진국 및 우리나라의 에너지 개발 정책에 커다란 변혁을 요구하고 있는 실정이다. 따라서 이러한 국내외 환경변화를 고려한 에너지 정책결정을 뒷받침하기 위해서는 발전원별로 환경에 미치는 영향과 함께 사고로 인한 리스크를 평가하여 서로 비교함으로써 원자력에 대한 국민 수용성을 높일 필요가 있다.

## 제 2 절 연구 목적

국내의 여건변화와 전력산업의 경쟁도입에 따라 원자력 산업은 다른 발전원과 경쟁이 불가피해질 뿐만 아니라 안전의 확보와 국민수용성 증대, 발전소 입지 문제, 방사성 폐기물의 효율적 관리 등과 같은 많은 도전에 직면하고 있다. 특히, 원전에 대한 국민 수용성을 높이기 위해서는 의사결정의 민주성과 투명성을 제고시키는 한편 안전성에 관한 정보가 공개되어야 한다. 이를 위해서는 기본적으로 원전의 안전성에 대한 국민의 신뢰가 바탕이 되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 현재 국내에서 운전되고 있는 경수로형과 중수로형 원자력 발전소의 가상 중대사고로 인해 발전소 주변 주민의 건강영향에 미치는 리스크를 평가하고 비교하는데 목적이 있다.

### 제 3 절 연구 범위

국내 경수로형과 중수로형 원자력 발전소의 가상 중대사고로 인해 대기 중으로 방출 가능성이 있는 방사성 물질로 인한 주변 주민의 인체에 미치는 조기사망과 암사망 리스크를 MACCS2[3] 코드를 이용하여 평가하고 서로 비교하였다. 경수로형 원전은 한국 표준원전인 울진 3,4호기를, 중수로형 원전은 월성 1호기를 시범분석 대상 발전소로 선정하였다. 분석된 결과는 외국의 원자력발전소의 리스크 평가 결과와 비교하였고 외국에서 수행한 다른 발전원(석탄, 석유, LNG, 수력)의 경험적인 리스크 평가 결과와도 비교하였다.

표 1. 시범분석 대상 원전 현황

원전 형태	가압경수로	가압중수로
대상 원전	울진 3,4호기	월성 1호기
노심 중량	78톤 UO <sub>2</sub>	92톤 UO <sub>2</sub>
노심 연소도	37.5 MWth/톤UO <sub>2</sub> X 1,095일	24.4 MWth/톤UO <sub>2</sub> X 272일
핵연료 농축도	3.5 w/o 농축우라늄	0.7 w/o 천연우라늄
80km 반경내 인구 분포	50만명	685만명
방사선원향 참고자료	울진 3,4호기 확률론적 안전성평가 (PSA) 보고서	월성 1호기 확률론적 안전성평가 (PSA) 보고서
기상자료 참고자료	울진 3,4호기 최종 안전성 분석 보고서 (FSAR)	월성 2,3,4호기 최종 안전성 분석 보고서 (FSAR)

표 2. 해외 비교 분석 자료 현황

참고 자료	미국 WASH-1400 보고서	스위스 PSI 연구소 보고서
대상 재해 (타 산업)	타 산업 및 인공재해	화석연료 발전 및 수력발전 30년간 운전으로 인한 경험적 리스크
대상 재해 (원자력 발전)	미국 원전 100기 운전	스위스 Muhleberg 원전 운전으로 인한 리스크

## 제 2 장 연구개발 내용 및 결과

### 제 1 절 연구수행 방법

#### 1. 3단계 PSA 개요

가상 중대사고로 인한 인체건강에 미치는 리스크를 비교, 평가하기 위하여 국내 대표적인 경수로형 원자력 발전소인 1,000MWe 한국형 표준원전과 중수로형 원자력발전소인 600MWe CANDU형 발전소를 선정하였다. 각각의 발전소에 대한 가상 중대사고로 인한 리스크는 3단계 확률론적 안전성 평가 기법 (PSA, Probabilistic Safety Assessment)을 활용하였으며 평가 도구로는 MACCS2를 이용하였다. 참고로 PSA 1단계에서는 노심손상사고 발생확률을 분석하고 PSA 2단계에서는 격납건물의 건전성 상실 확률과 방사선원항의 외부 누출량을 분석한다.

원자력 발전소에서 중대사고가 발생하여 격납건물 파손 혹은 격납건물 우회(bypass)가 발생하면 방사성 물질이 대기 중으로 방출되며 방사성 물질은 바람에 의해 이동하면서 주변 주민의 건강뿐만 아니라 주변 환경에 영향을 미치게 된다. 이러한 방사성 물질로 인한 건강에 미치는 영향이나 경제적 영향은 리스크로써 표현되는데 이는 특정 사고의 발생 확률에 사고로 인한 결말 효과를 곱한 값으로 정의된다. 이러한 원자력 발전소의 중대사고로 인한 영향은 3단계 확률론적 안전성 평가를 이용하여 평가한다. 이 3단계 PSA를 통한 영향 평가는 공중 위험도(Public Risk)로 표현되며 이 공중 위험도는 조기사망 및 암 사망, 조기상해 및 암 상해, 유전적 영향, 농경지 및 토양, 농작물, 건축물, 물 등의 방사능 오염 등을 포함한다. 이 3단계 PSA의 주요 응용 분야로는 위험도 평가, 설계 특성 평가, 환경 영향 평가, 법 제정 및 규제 절차, 비상 계획 및 대응, 위험도 수용 기준 개발, 연구 대상 개발, 사고 발생의 책임 규명, 예측 필요성 및 선량 평가 등이 있다[5].

3단계 PSA를 수행하기 위한 주요 계산 단계와 각 단계별로 필요한 필수 자료들은 그림 1에 도시된 바와 같다. 그림 1의 왼쪽 자료들은 계산하고자 하는 발전소의 방사선원 및 부지 관련 자료들이다. 일반적으로 기상 자료는 발전소 주변의 기상탑에서 측정되고 기록되는 자료로써 3단계 PSA에서는 시간별로 저장된 최소 일년간의 자료가 이용된다. 방사선원 자료는 2단계 PSA의 결과로써 주어지는

자료로 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 종류와 양뿐만 아니라 방출고도, 열 함량 등과 같은 방출과 관련된 변수와 방출 확률 등의 자료를 포함한다. 인구 및 토지 이용 자료와 경제 자료는 건강영향 평가와 경제적 영향 평가를 위해 필요한 자료로써 계산을 위해 나누어진 계산 격자별로 저장되어 이용된다. 선량변환 인자는 대표적인 피폭경로별 피폭선량 계산을 위해 필요한 자료로써 3단계 PSA에서 고려하는 방사성 동위원소별로 인체 건강에 영향을 미치는 주요 장기(organ) 별로 주어진 자료를 이용한다. 위험도 변환 인자는 건강영향 평가 모델을 이용하여 피폭선량으로 인한 인체 사망이나 상해, 혹은 암 발생 등으로의 변환을 위해 필요한 자료이다.

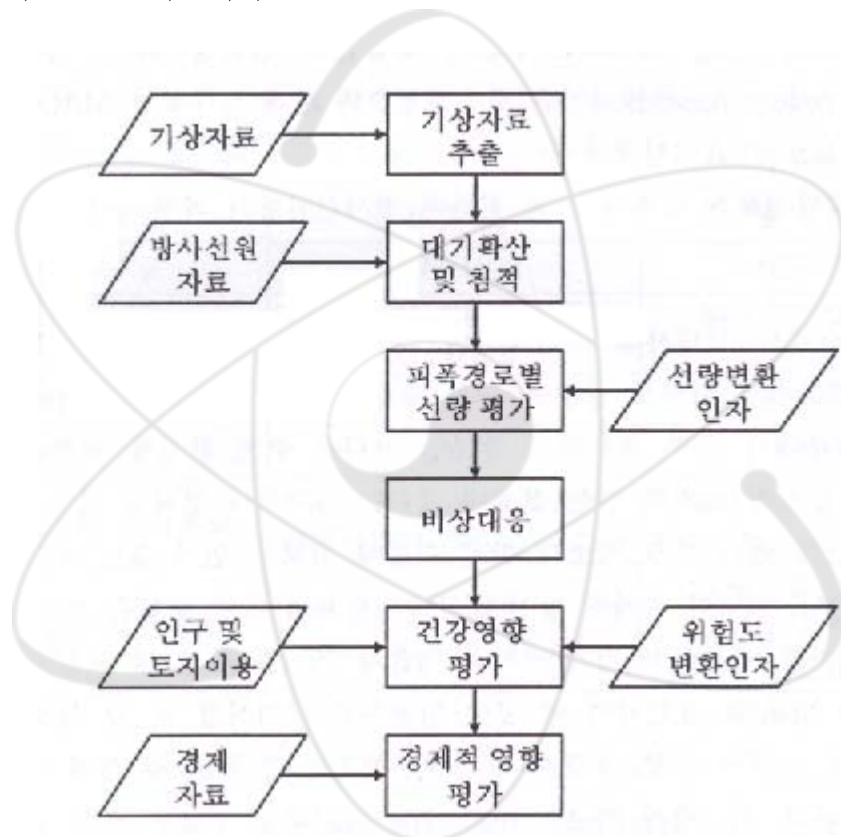


그림 1. 3단계 PSA의 기본 요소 및 입력자료

## 2. MACCS2 코드 개요

MACCS2 코드는 기존의 원자력 발전소의 중대사고로 인한 리스크 평가용으로 활용되던 MACCS 코드를 모든 형태의 원자로뿐만 아니라 비원전의 방사성 물질의 누출로 인한 리스크 평가가 가능하도록 개선한 코드이다. 이 코드의 주요 응용 분야로는 확률론적 안전성 평가, 대량방출의 정의와 같은 규제분야, 비상대응

수단의 비용/편익 분석, 환경영향 평가 뿐만 아니라 불확실성 및 민감도 분석 등이 있다.

MACCS2 코드는 3개의 주요 모듈로 구성되어 있는데 이는 ATMOS, EARLY, CHRONC이다. ATMOS는 대기확산 및 침적을 다루며 EARLY는 사고 후 약 일주일 정도의 기간에 해당하는 비상단계(Emergency Phase) 동안의 피폭선량 및 리스크 계산이 이루어지며 CHRONC는 비상단계 이후 약 1년 정도의 기간인 중간단계(Intermediate Phase)와 중간단계 이후 약 50년 동안의 장기간에 걸친 영향을 평가한다. 각각의 모듈에서 다루는 현상들은 다음과 같다.

ATMOS 모듈:

- Source Term Specification
- Weather Data
- Risk-Dominant Plume
- Initial Plume Dimensions
- Representative Weather Point
- Downwind Transport
- Plume Rise
- Dispersion-Gaussian Plume Model
- Overview of Plume Depletion
- Depletion by Radioactive Decay
- Depletion by Dry Deposition
- Depletion by Wet Deposition
- Centerline Air and Ground Concentrations

EARLY 모듈:

- Overview of Exposure Pathways
- Off-Centerline Correction Factor
- Cloudshine
- Groundshine
- Direct Inhalation
- Resuspension Inhalation
- Emergency-Phase Relocation Costs
- Evacuation
- Sheltering
- Dose-Dependent Relocation

- Acute Health Effects: Early Fatality and Early Injury Models
- Cancer Health Effect Models

CHRONC 모듈:

- Overview of Exposure Pathways
- Off-Centerline Correction Factor
- Groundshine
- Resuspension Inhalation
- COMIDA2 Model for Food Ingestion
- MACCS Model for Food Ingestion
- Water Ingestion
- Mitigative Action Models
- Economic Costs from Intermediate Phase
- Economic Costs from Long-Term Phase

MACCS2 코드의 ATMOS, EARLY, CHRONC 모듈을 통하여 계산이 이루어지는 항목들은 다음과 같다.

- Atmospheric Results at Specified Downwind Distances
- Cases of Specified Health Effect
- Early Fatality Radius
- Population Exceeding Dose Threshold
- Average Individual Risk of Health Effects
- Total Collective Dose from Material Deposited Within Region
- Centerline Dose versus Distance
- Centerline Risk versus Distance
- Population-Weighted Safety Goal Risk
- Maximum Observed Dose at a Specified Distance Ring ( $r$ )
- Maximum Observed Dose at a Specified ( $r, \theta$ ) Location
- Breakdown of CHRONC Population Dose by Pathway
- Economic Costs from Long-Term Phase



## 제 2 절 주요 입력자료

### 1. 방사선원 자료

3단계 PSA의 시작은 2단계 PSA의 결과로써 주어지는 가상 중대사고로 인한 방사성 물질의 대기 중으로의 방출이며 이는 방사선원항(source term)으로 불린다. 이 방사선원은 단순히 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 종류와 양만을 의미하는 것이 아니라 물리, 화학적 특성, 방출 고도, 열 함량, 방출과 관련된 시간 변수들, 그리고 방출 확률까지도 포함하는 포괄적인 개념으로 정의된다.

방사선원항에 관한 기본적인 자료는 노심재고량(core inventory)과 방출 분율(release fraction)이다. 원자로 내 핵분열생성물 (fission products)의 노심 재고량은 ORIGEN2[4] 전산코드에 의한 계산결과를 이용하였다. 이 노심 재고량은 가장 보수적인 방사선 영향 평가 결과를 얻기 위하여 핵분열 생성물의 양이 최대가 되는 시점에서의 노심재고량을 이용하였다. 원자력발전소의 핵연료는 경수로의 경우에는 최대 3년 동안 원자로에서 연소된 후 사용후 핵연료 저장수조로 이동하여 임시 저장된다. 매년 원자로 전체의 3분의 1씩의 핵연료가 교체된다. 따라서 한 주기 말 (1년 연소 후)에는 1년, 2년, 3년 동안 연소된 핵연료가 원자로에 평균 3분의 1씩 존재하게 된다. 중수로형 원전의 원자로는 380개의 채널로 구성되어 있고 각 채널은 12개의 핵연료 다발로 구성되어 있다. 평균 3분의 2채널의 8개 핵연료 다발이 매일 교체된다. 중수로의 핵연료는 최소로는 50일, 최대로는 300일 원자로에서 연소되어 평균적으로는 200일 가량 원자로에서 연소된다.

경수로형 원전의 경우는 주기말의 결과 즉,  $UO_2$  톤당 37.5 MWth 열출력으로 1,095일 연소된 시점에서의 핵분열생성물의 양, 중수로형 원전의 경우는 핵연료의 최대 노심 체류 기간(Channel Dwell Time)인 272일 동안  $UO_2$  톤당 24.41 MWth 열출력으로 연소된 시점에서의 핵분열생성물의 양을 이용하였다. 경수로 및 중수로 원전의 노심에는 각각 78톤, 92톤의  $UO_2$ 가 존재하는 것으로 가정하였다. 참고로 중수로형 원전은 천연우라늄(0.72 w/o  $U^{235}$ )을 연료로 사용하고 경수로 원전은 농축우라늄(3.5 w/o  $U^{235}$ )을 연료로 사용한다. 표준형 원전과 중수로형 원전에 대한 노심재고량 계산결과는 표 3과 그림 2에 요약된 바와 같다. 그림 2에서 보면 표준형 원전과 중수로형 원전은 핵연료의 농축도와 연소도의 차이에도 불구하고 노심 핵분열 생성물 재고량에 있어서는 별반 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 핵연료가 200일 이상 연소되면 핵분열 생성물의 양이 포화상태에

이르기 때문인 것으로 판단된다. 단지 핵분열 생성물 재고량은 원자로 내 전체 핵연료 량에 비례하나 전체 핵연료 량은 경수로와 중수로가 비슷한 중량이 사용되기 때문에 핵분열 생성물 재고량이 비슷하게 존재하였다.

표 3. 울진 3,4호기 및 월성 1호기의 노심재고량 (1/2)

방사성 동위원소	반감기(Sec)	PWR(Bq)	PHWR(Bq)
Co-58	6.16E+06	4.72E+13	9.36E+12
Co-60	1.66E+08	6.40E+14	6.55E+14
Kr-85	3.39E+08	5.52E+16	8.49E+15
Kr-85m	1.61E+04	3.75E+17	6.28E+17
Kr-87	4.56E+03	6.65E+17	1.16E+18
Kr-88	1.01E+04	9.23E+17	1.65E+18
Rb-86	1.61E+06	1.40E+16	2.14E+15
Sr-89	4.49E+06	1.18E+18	2.36E+18
Sr-90	8.87E+08	4.43E+17	6.56E+16
Sr-91	3.41E+04	1.69E+18	2.86E+18
Sr-92	9.76E+03	1.98E+18	3.20E+18
Y-90	2.31E+05	4.71E+17	7.46E+16
Y-91	5.08E+06	1.69E+18	3.18E+18
Y-92	1.27E+04	1.99E+18	3.22E+18
Y-93	3.64E+04	2.52E+18	3.88E+18
Zr-95	5.66E+06	3.09E+18	4.48E+18
Zr-97	6.05E+04	3.46E+18	4.74E+18
Nb-95	3.03E+06	3.08E+18	4.47E+18
Mo-99	2.38E+05	4.00E+18	5.22E+18
Tc-99m	2.17E+04	3.50E+18	4.57E+18
Ru-103	3.42E+06	4.25E+18	4.86E+18
Ru-105	1.60E+04	3.45E+18	3.74E+18
Ru-106	3.19E+07	2.47E+18	8.86E+17
Rh-105	1.28E+05	3.12E+18	2.60E+18
Sb-127	3.28E+05	3.00E+17	3.51E+17
Sb-129	1.56E+04	8.10E+17	1.03E+18
Te-127	3.37E+04	2.99E+17	3.33E+17
Te-127	9.42E+06	4.14E+16	3.57E+16
Te-129	4.20E+03	8.10E+17	1.01E+18
Te-129	2.89E+06	1.20E+17	1.52E+17
Te-131	1.08E+05	3.47E+17	4.66E+17
Te-132	2.81E+05	3.20E+18	4.19E+18
I-131	6.95E+05	2.31E+18	2.99E+18
I-132	8.23E+03	3.26E+18	4.30E+18
I-133	7.49E+04	4.38E+18	5.88E+18
I-134	3.16E+03	4.77E+18	6.33E+18
I-135	2.37E+04	4.15E+18	5.49E+18

표 3. 울진 3,4호기 및 월성 1호기의 노심재고량 (2/2)

방사성 동위원소	반감기(Sec)	PWR(Bq)	PHWR(Bq)
Xe-133	4.57E+05	4.42E+18	5.74E+18
Xe-135	3.30E+04	8.58E+17	2.61E+17
Cs-134	6.50E+07	1.67E+18	8.79E+16
Cs-136	1.12E+06	3.66E+17	7.56E+16
Cs-137	9.50E+08	9.05E+17	9.75E+16
Ba-139	4.99E+03	3.76E+18	5.05E+18
Ba-140	1.11E+06	3.59E+18	4.91E+18
La-140	1.45E+05	4.02E+18	5.12E+18
La-141	1.42E+04	3.37E+18	4.66E+18
La-142	5.72E+03	3.19E+18	4.34E+18
Ce-141	2.81E+06	3.38E+18	4.72E+18
Ce-143	1.19E+05	3.98E+18	4.20E+18
Ce-144	2.46E+07	2.59E+18	2.01E+18
Pr-143	1.17E+06	2.95E+18	4.10E+18
Nd-147	9.50E+05	1.44E+18	1.85E+18
Np-239	2.03E+05	5.84E+19	8.35E+19
Pu-238	2.81E+09	4.64E+16	2.36E+14
Pu-239	7.70E+11	8.45E+14	5.44E+14
Pu-240	2.13E+11	1.62E+15	8.56E+14
Pu-241	4.61E+08	5.34E+17	1.11E+17
Am-241	1.37E+10	5.65E+14	3.25E+13
Cm-242	1.41E+07	3.70E+17	8.79E+15
Cm-244	5.71E+08	2.44E+17	1.10E+14

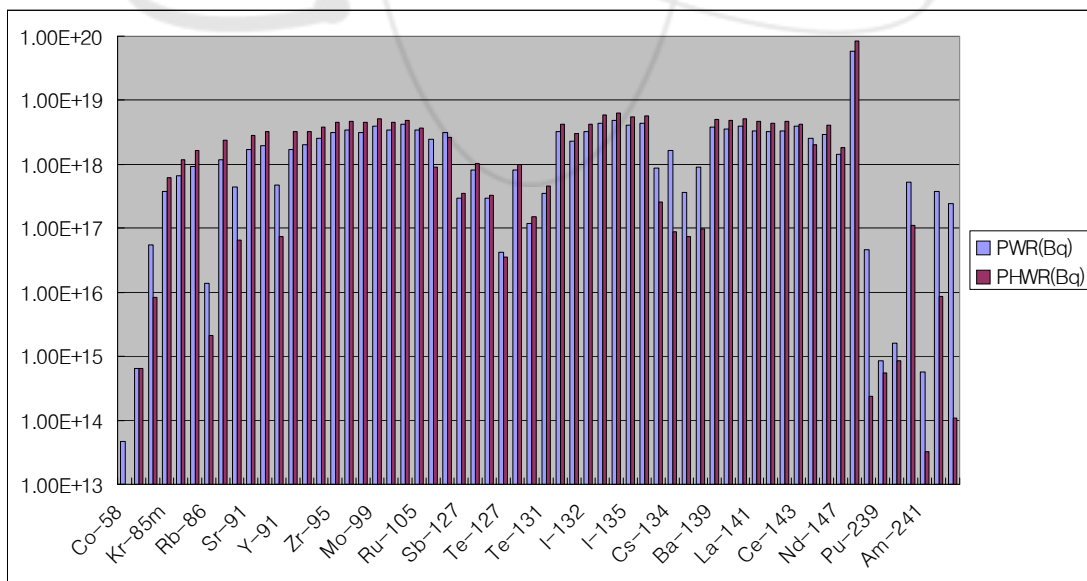


그림 2. 표준형과 중수로형 원전의 노심 핵분열 생성물 재고량 비교

또한, 격납건물 파손으로 인해 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양은 격납건물의 건전성과 방사선원항의 방출량을 분석하는 2단계 확률론적 안전성평가 (Level-2 PSA)[6,7]의 결과로 주어지는 방사선원 방출군(STC, Source Term Category)별 핵분열생성물 방출 분율을 이용하였다. 울진 3,4호기 및 월성 1호기 방사선원 방출군 논리도는 그림 3과 그림 4에 각각 도시된 바와 같으며 방사선원 방출군별 방출 특성은 표 4와 표 5에 각각 요약된 바와 같다. 그림의 맨 왼쪽 첫 번째 사건은 노심손상사고 (core damage accident)를 의미하고 각 가지(branch)는 그림의 맨 위에 표시되어 있는 격납건물 안전계통의 가용여부(availability)를 나타낸다. 그림과 표의 맨 오른쪽 수치는 각 중대사고 종류(방사선원 방출군)의 원자로 운전 년당 발생빈도를 나타낸다. 격납건물을 우회하는 증기발생기 세관 파손 사고의 발생빈도는 울진 3,4호기(STC-19)와 월성 1호기(STC-9)의 경우 각각 1백만년 및 1천만년에 1번 발생하는 것으로 나타나 사고 발생빈도가 매우 낮음을 알 수 있다.

	CONTAINMENT BYPASS	CONTAINMENT ISOLATION STATE	CORE MELT STOP BEFORE RV RUPTURE	NO ALPHA MODE CONT. FAILURE	TIME OF CONTAINMENT FAILURE	MODE OF CONTAINMENT FAILURE	DEBRIS COOLED EXCESSIVELY	NO REGR SHWAYS FAILURE	ST C #	FREQ
Events	CONBYPASS	CONISOLAT	MELTSTOP	NO-ALPHA	TMC-CF	MODE-CF	EXCESSIVELY	NO-REGRSP		
			MELTSTOP 2.332E-06						1	3.302E-08
				NO CF 3.40E-06					2	3.434E-06
				EARLY 3.13E-06		LEAK 1.502E-06			3	1.003E-08
						RUPTURE 1.796E-06			4	1.796E-08
							COOLED 2.902E-07	NO FAILURE 9.89E-09	5	
								FAILURE 2.902E-07	6	2.902E-07
						LEAK 4.527E-07		NO FAILURE 4.105E-08	7	4.105E-09
							NOT COOLED 1.643E-07	FAILURE 1.643E-07	8	1.643E-07
		ISOLATED 7.100E-06		NO ALPHA CF 4.277E-06	LATE 5.862E-07			NO FAILURE 5.00E-09	9	
								FAILURE 1.458E-07	10	1.458E-07
						RUPTURE 2.262E-07		NO FAILURE 1.396E-08	11	1.396E-08
							NOT COOLED 7.821E-08	FAILURE 7.791E-08	12	7.791E-08
	NO BYPASS 7.711E-06				DMT 1.816E-07				13	1.816E-07
					ALPHA CF 7.827E-06				14	7.827E-08
									15	4.917E-07
									16	5.401E-09
									17	2.756E-09
									18	1.29E-08
									19	1.194E-08

그림 3. 울진 3,4호기의 방사선원 방출군 논리도[6]

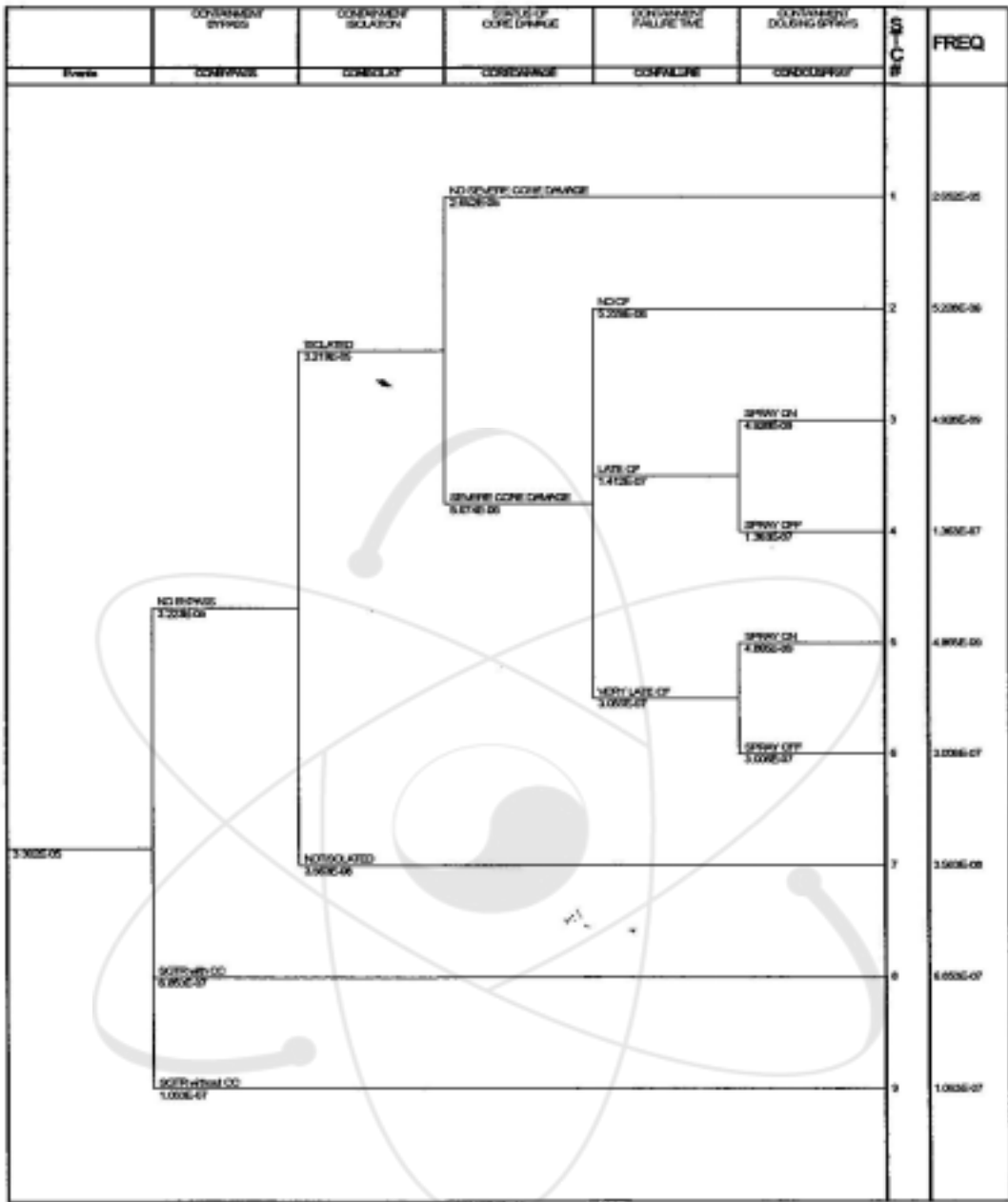


그림 4. 월성 1호기의 방사선원 방출군 논리도[7]

표 4. 울진 3,4호기의 방사선원 방출군 특성

STC No.	지배적인 초기사건	격납건물 파손 형태	중대사고 발생빈도 (/년)
1	Large LOCA	Core melt stopped before Reactor Vessel failure	$4.87 \times 10^{-5}$
2	Loss of Feedwater	Reactor Vessel failed, Containment do not failed	$1.44 \times 10^{-5}$
3	Loss of Feedwater	Early Containment failure, Leak	$1.71 \times 10^{-7}$
4	Small LOCA	Early Containment failure, Rupture	$5.39 \times 10^{-8}$
6	Small LOCA	Late Containment failure, Leak	$1.71 \times 10^{-6}$
7	N/A	Late Containment failure, Leak	$6.57 \times 10^{-9}$
8	Station Blackout	Late Containment failure, Leak	$1.60 \times 10^{-6}$
10	Small LOCA	Late Containment failure, Leak, Rupture	$8.58 \times 10^{-8}$
11	N/A	Late Containment failure, Leak, Rupture	$2.19 \times 10^{-9}$
12	Station Blackout	Late Containment failure, Leak, Rupture	$7.87 \times 10^{-7}$
13	Loss of Feedwater	Basemat Melt-through	$1.22 \times 10^{-6}$
14	Loss of Feedwater	Alpha mode failure	$3.22 \times 10^{-8}$
15	Large LOCA	Containment failure before RV failure	$6.05 \times 10^{-7}$
16	Large LOCA	Isolation Failure	$1.18 \times 10^{-8}$
17	Large LOCA	Isolation Failure	$1.97 \times 10^{-8}$
18	V-sequence	V-sequence (Bypass)	$1.20 \times 10^{-9}$
19	SGTR	Steam Generator Tube Rupture (Bypass)	$1.43 \times 10^{-6}$

표 5. 월성 1호기의 방사선원 방출군 특성

STC No.	지배적인 초기사건	격납건물 파손 형태	중대사고 발생빈도 (/년)
1	No Severe Core Damage	No Containment Failure	$2.652 \times 10^{-5}$
2	Small LOCA	No Containment Failure	$5.228 \times 10^{-6}$
3	Small LOCA	Late Containment Failure	$4.928 \times 10^{-9}$
4	Loss of Service Water	Late Containment Failure	$1.363 \times 10^{-7}$
5	Small LOCA	Very Late Containment Failure	$4.865 \times 10^{-9}$
6	Total Loss of End Shield Cooling	Very Late Containment Failure	$3.006 \times 10^{-7}$
7	Dual Control Computer Failure	Containment Isolation Failure	$3.563 \times 10^{-8}$
8	Multiple SGTR	Containment Bypass	$6.853 \times 10^{-7}$
9	Multiple SGTR	Containment Bypass	$1.063 \times 10^{-7}$

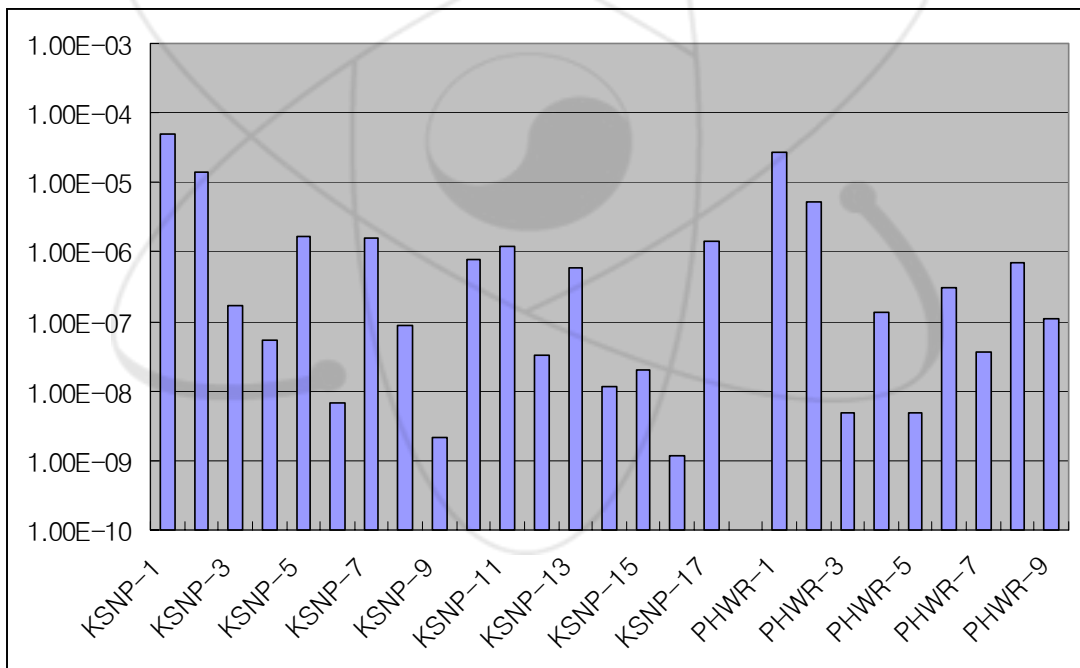


그림 5. 표준형과 중수로형 원전의 방사선원 방출범주별 중대사고 발생빈도 (단위; 1/년)



원자력 발전소의 중대사고시 주변 주민의 인체건강에 많은 영향을 미치는 주요 방사성 동위원소는 60개로 알려져 있다. 원자력발전소의 중대사고로 인한 리스크 평가 시 MACCS2 코드에서는 이들 방사성 동위원소를 물리, 화학적 특성에 따라 9개의 그룹으로 구분하여 입력 자료로 활용하는데, 9개의 그룹별 방사성 동위원소들은 표 6에 나타난 바와 같다. 경수로형 및 중수로형 원자력발전소의 방사선원 방출군별 방출 분율은 MAAP 코드로 계산한 각 발전소의 확률론적 안전성 평가 보고서에 나와 있는 12개 그룹의 산화물 형태의 방출 분율을 MACCS2 코드에서 활용 가능하도록 9개 그룹의 방출 분율로 가정하여 이용하였다. 각각의 발전소에 대한 방사선원 방출그룹별 방출 분율은 표 7과 표 8에 요약된 바와 같다.

표 6. MACCS2 코드에서 활용되는 9개 그룹별 방사성 동위원소

그룹 No.	주요 원소	방사성 동위원소
1	Noble Gases (Xe/Kr)	Xe, Kr
2	Iodine (I)	I, Br
3	Cesium (Cs)	Cs, Rb
4	Tellurium (Te)	Te, Sb, Se
5	Strontium (Sr)	Sr
6	Ruthenium (Ru)	Ru, Rh, Pd, Mo, Tc
7	Lanthanium (La)	La, Zr, Nd, Eu, Nb, Pm, Sm, Y
8	Cerium (Ce)	Ce, Pu, Np
9	Barium (Ba)	Ba

표 7. 울진 3,4호기의 방사선원 방출군별 방출분율

	Xe/Kr	I	Cs	Te	Sr	Ru	La	Ce	Ba
STC-3	9.5x10 <sup>-1</sup>	1.3x10 <sup>-1</sup>	1.3x10 <sup>-1</sup>	4.9x10 <sup>-1</sup>	8.6x10 <sup>-4</sup>	4.6x10 <sup>-2</sup>	1.9x10 <sup>-4</sup>	7.1x10 <sup>-4</sup>	1.4x10 <sup>-2</sup>
STC-4	1.0	3.0x10 <sup>-2</sup>	3.6x10 <sup>-2</sup>	1.0x10 <sup>-1</sup>	1.9x10 <sup>-4</sup>	9.3x10 <sup>-4</sup>	8.7x10 <sup>-5</sup>	4.1x10 <sup>-4</sup>	4.1x10 <sup>-4</sup>
STC-6	9.4x10 <sup>-1</sup>	2.4x10 <sup>-3</sup>	1.7x10 <sup>-3</sup>	1.6x10 <sup>-2</sup>	4.4x10 <sup>-4</sup>	1.1x10 <sup>-3</sup>	1.5x10 <sup>-4</sup>	4.3x10 <sup>-4</sup>	1.0x10 <sup>-3</sup>
STC-8	9.4x10 <sup>-1</sup>	1.7x10 <sup>-3</sup>	2.3x10 <sup>-3</sup>	2.5x10 <sup>-3</sup>	3.0x10 <sup>-5</sup>	6.9x10 <sup>-6</sup>	3.5x10 <sup>-6</sup>	9.7x10 <sup>-6</sup>	2.4x10 <sup>-5</sup>
STC-10	1.0	4.9x10 <sup>-3</sup>	5.6x10 <sup>-3</sup>	2.7x10 <sup>-2</sup>	4.6x10 <sup>-4</sup>	2.5x10 <sup>-3</sup>	2.7x10 <sup>-4</sup>	8.0x10 <sup>-4</sup>	1.9x10 <sup>-3</sup>
STC-12	9.6x10 <sup>-1</sup>	8.9x10 <sup>-4</sup>	2.1x10 <sup>-3</sup>	2.5x10 <sup>-3</sup>	3.1x10 <sup>-5</sup>	6.9x10 <sup>-6</sup>	3.5x10 <sup>-6</sup>	9.8x10 <sup>-6</sup>	2.5x10 <sup>-5</sup>
STC-13	9.2x10 <sup>-1</sup>	9.7x10 <sup>-4</sup>	6.8x10 <sup>-4</sup>	1.3x10 <sup>-2</sup>	1.7x10 <sup>-5</sup>	4.2x10 <sup>-6</sup>	3.0x10 <sup>-6</sup>	5.5x10 <sup>-6</sup>	1.7x10 <sup>-5</sup>
STC-14	9.6x10 <sup>-1</sup>	9.4x10 <sup>-1</sup>	9.4x10 <sup>-1</sup>	1.4x10 <sup>-1</sup>	1.6x10 <sup>-3</sup>	1.1x10 <sup>-1</sup>	4.0x10 <sup>-4</sup>	5.9x10 <sup>-3</sup>	1.9x10 <sup>-2</sup>
STC-16	1.0	2.6x10 <sup>-2</sup>	2.7x10 <sup>-2</sup>	1.5x10 <sup>-2</sup>	2.3x10 <sup>-5</sup>	3.8x10 <sup>-4</sup>	1.8x10 <sup>-5</sup>	2.6x10 <sup>-5</sup>	1.4x10 <sup>-4</sup>
STC-17	9.5x10 <sup>-1</sup>	1.3x10 <sup>-1</sup>	1.3x10 <sup>-1</sup>	7.7x10 <sup>-2</sup>	7.6x10 <sup>-4</sup>	1.6x10 <sup>-2</sup>	4.6x10 <sup>-4</sup>	1.1x10 <sup>-3</sup>	6.3x10 <sup>-3</sup>
STC-18	3.0x10 <sup>-1</sup>	2.4x10 <sup>-3</sup>	3.2x10 <sup>-3</sup>	1.6x10 <sup>-3</sup>	1.2x10 <sup>-5</sup>	2.9x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-6</sup>	4.3x10 <sup>-6</sup>	1.4x10 <sup>-5</sup>
STC-19	9.5x10 <sup>-1</sup>	1.3x10 <sup>-1</sup>	1.3x10 <sup>-1</sup>	4.9x10 <sup>-1</sup>	8.6x10 <sup>-4</sup>	4.6x10 <sup>-2</sup>	1.9x10 <sup>-4</sup>	7.1x10 <sup>-4</sup>	1.4x10 <sup>-2</sup>

표 8. 월성 1호기의 방사선원 방출군별 방출분율

	Xe/Kr	I	Cs	Te	Sr	Ru	La	Ce	Ba
STC-2	1.2x10 <sup>-4</sup>	7.2x10 <sup>-6</sup>	7.2x10 <sup>-6</sup>	0.0	2.9x10 <sup>-9</sup>	3.8x10 <sup>-9</sup>	0.0	0.0	1.3x10 <sup>-9</sup>
STC-3	1.0	7.7x10 <sup>-3</sup>	8.5x10 <sup>-3</sup>	5.2x10 <sup>-3</sup>	2.6x10 <sup>-4</sup>	1.2x10 <sup>-6</sup>	4.7x10 <sup>-6</sup>	2.5x10 <sup>-8</sup>	1.3x10 <sup>-4</sup>
STC-4	9.9x10 <sup>-1</sup>	4.3x10 <sup>-3</sup>	4.0x10 <sup>-3</sup>	2.0x10 <sup>-3</sup>	2.4x10 <sup>-4</sup>	4.0x10 <sup>-7</sup>	3.7x10 <sup>-6</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	1.2x10 <sup>-4</sup>
STC-5	9.9x10 <sup>-1</sup>	6.4x10 <sup>-3</sup>	5.7x10 <sup>-3</sup>	4.1x10 <sup>-3</sup>	3.0x10 <sup>-4</sup>	1.6x10 <sup>-7</sup>	5.3x10 <sup>-6</sup>	2.8x10 <sup>-5</sup>	1.4x10 <sup>-4</sup>
STC-6	7.1x10 <sup>-1</sup>	7.5x10 <sup>-3</sup>	7.0x10 <sup>-3</sup>	3.3x10 <sup>-3</sup>	6.0x10 <sup>-4</sup>	1.2x10 <sup>-7</sup>	1.0x10 <sup>-5</sup>	5.3x10 <sup>-5</sup>	2.8x10 <sup>-4</sup>
STC-7	8.1x10 <sup>-1</sup>	5.0x10 <sup>-2</sup>	5.0x10 <sup>-2</sup>	2.9x10 <sup>-3</sup>	3.2x10 <sup>-4</sup>	9.0x10 <sup>-6</sup>	5.4x10 <sup>-6</sup>	2.5x10 <sup>-5</sup>	1.7x10 <sup>-4</sup>
STC-8	9.6x10 <sup>-1</sup>	1.2x10 <sup>-2</sup>	1.3x10 <sup>-2</sup>	4.2x10 <sup>-3</sup>	2.7x10 <sup>-4</sup>	5.3x10 <sup>-7</sup>	4.0x10 <sup>-6</sup>	2.1x10 <sup>-5</sup>	1.3x10 <sup>-4</sup>
STC-9	4.6x10 <sup>-1</sup>	4.9x10 <sup>-2</sup>	4.9x10 <sup>-2</sup>	3.6x10 <sup>-3</sup>	5.4x10 <sup>-6</sup>	7.8x10 <sup>-5</sup>	0.0	0.0	2.6x10 <sup>-5</sup>

## 2. 기상 자료

경수로형 및 중수로형 분석 대상 발전소로 선정된 울진 및 월성 부지별 기상자료는 발전소 인근의 기상탑에서 2002년도 1년 동안 측정된 자료를 수집하여 8,760개의 시간별로 정리한 풍속, 풍향, 강수량, 대기안정도로 구성된 기상자료를 이용하였다. 각 부지의 연간 기상자료를 분석하여 풍속, 풍향, 대기안정도에 대한 분포를 요약한 결과는 각각 표 9, 10, 11과 같다.

울진 및 월성 부지의 풍속분포 분석결과 (표 9 및 그림 6)에서 보듯이 월성 부지의 풍속 (2.86m/s)이 울진 부지의 풍속 (1.87m/s) 보다는 큰 것으로 나타났다. 기상자료가 건강영향에 미치는 연구결과[10]에 의하면 풍속이 증가함에 따라 조기사망 및 암사망 리스크는 그 값이 감소한다. 풍속이 증가하면서 리스크가 감소한다는 것은 풍속이 약할수록 사고결말 효과에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 의미하며 이는 풍속이 증가할수록 대기난류 영향에 의한 대기확산이 크게 나타나면서 방사성 플룸에 의해 영향을 받는 지역은 넓어지지만 상대적으로 방사능 농도는 줄어들기 때문이다.

울진부지와 월성부지의 풍향분포 분석 (표 10 및 그림 7)에 의하면 울진부지의 경우, 가장 빈도가 큰 풍향은 서풍과 남서풍이며 월성부지의 경우에는 북서풍과 서북서풍이다. 따라서 사고로 인해 방사성 물질이 대기 중으로 방출이 되더라도 인구가 적은 동해 쪽으로 방사성 물질이 이동할 확률이 크다.

대기안정도 분포 (표 11 및 그림 8)를 보면 울진부지의 경우에는 중립(neutral)이, 월성부지의 경우에는 약간 안정(slightly stable)이 가장 빈도가 크다. 대기안정도가 건강영향에 미치는 연구결과[10]에 의하면 조기사망과 같은 조기 건강영향은 대기가 안정할수록 크게 나타나며 불안정할수록 적게 나타난다. 이는 대기가 불안정하면 대기난류의 영향으로 인해 방사성 구름의 팽창이 크게 나타나기 때문에 방사성 물질에 의해 영향을 받는 지역이 넓어지지만 그 농도는 감소하기 때문이다. 그러나 대기안정도가 암사망에 미치는 영향에 의하면 대기가 중립일 경우에 암사망에 미치는 영향이 가장 적게 나타나며 안정이나 불안정일 경우에는 중립상태보다 약간 크게 나타나지만 그 차이는 크지 않다.

표 9. 울진 및 월성 부지의 풍속 분포

풍속 (m/sec)	울진 부지		월성 부지	
	빈도	백분율(%)	빈도	백분율(%)
1.0 이하	2,654	30.3	1,208	13.8
1.0 ~ 2.0	3,376	38.5	2,059	23.5
2.0 ~ 3.0	1,351	15.4	2,114	24.1
3.0 ~ 4.0	703	8.0	1,498	17.1
4.0 ~ 5.0	376	4.3	884	10.1
5.0 ~ 6.0	185	2.1	507	5.8
6.0 이상	115	1.3	1,698	19.4
합	8,760	100.0	8,760	100.0
평균	1.87 m/sec		2.86 m/sec	

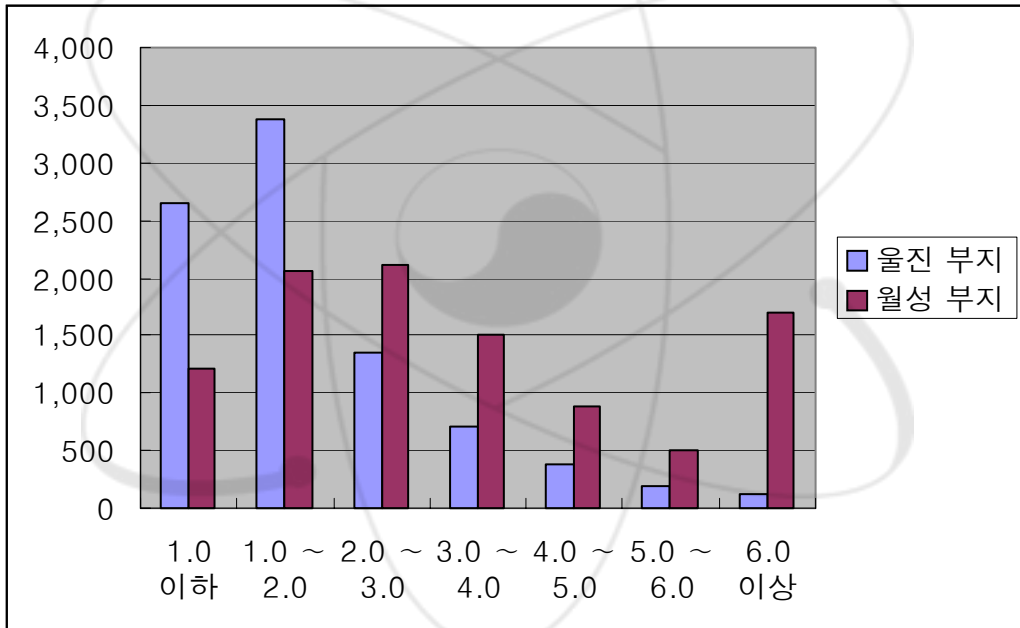


그림 6. 울진 및 월성 부지의 풍속 분포

표 10. 울진 및 월성 부지의 풍향 분포

풍향	울진 부지		월성 부지	
	빈도 수	백분율(%)	빈도 수	백분율(%)
N	228	2.6	895	10.2
NNE	403	4.6	840	9.6
NR	401	4.5	429	4.9
ENE	444	5.0	172	2.0
E	295	3.3	130	1.5
ESE	222	2.5	117	1.3
SE	383	4.3	191	2.2
SSE	314	3.5	299	3.4
S	300	3.4	308	3.5
SSW	274	3.1	411	4.7
SW	450	5.1	448	5.1
WSW	1,754	20.0	516	5.9
W	2,088	23.8	862	9.8
WNW	796	9.0	1,242	14.2
NW	225	2.5	1,127	12.9
NNW	183	2.0	773	8.8
합계	8,760	100.0	8,760	100.0

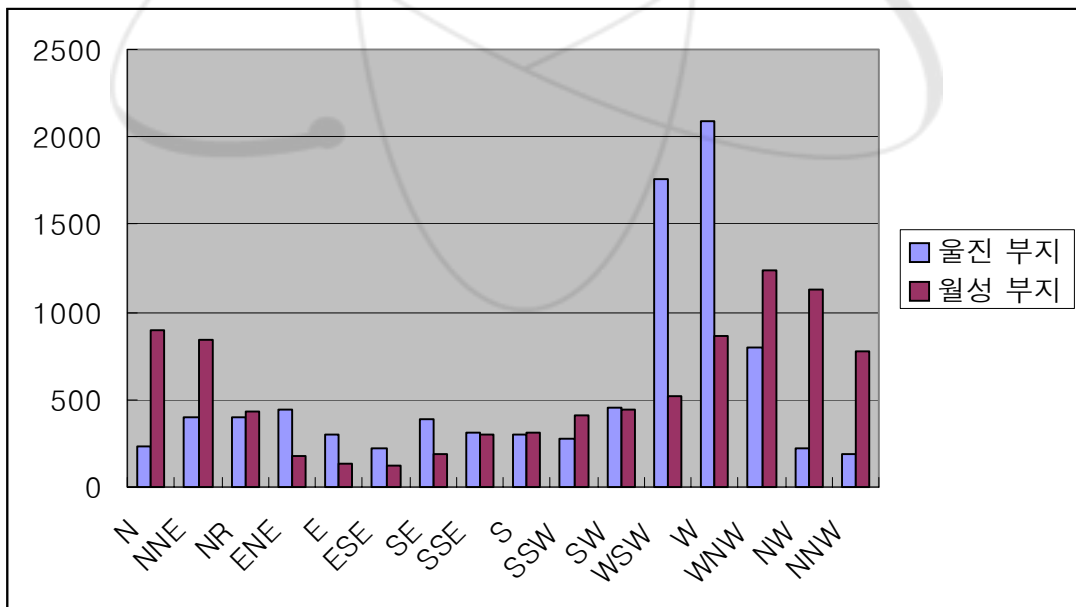


그림 7. 울진 및 월성 부지의 풍향 분포

표 11. 울진 및 월성 부지의 대기안정도 분포

대기안정도	울진 부지		월성 부지	
	빈도 수	백분율(%)	빈도 수	백분율(%)
Extremely Unstable(A)	2,069	23.6	879	10.0
Moderately Unstable(B)	338	3.9	299	3.4
Slightly Unstable(C)	370	4.2	285	3.3
Neutral(D)	2,409	27.5	2,031	23.2
Slightly Stable(E)	1,654	18.9	3,574	40.8
Moderately Stable(F)	945	10.8	1,253	14.3
Extremely Stable(G)	975	11.1	439	5.0
합계	8,760	100.0	8,760	100.0

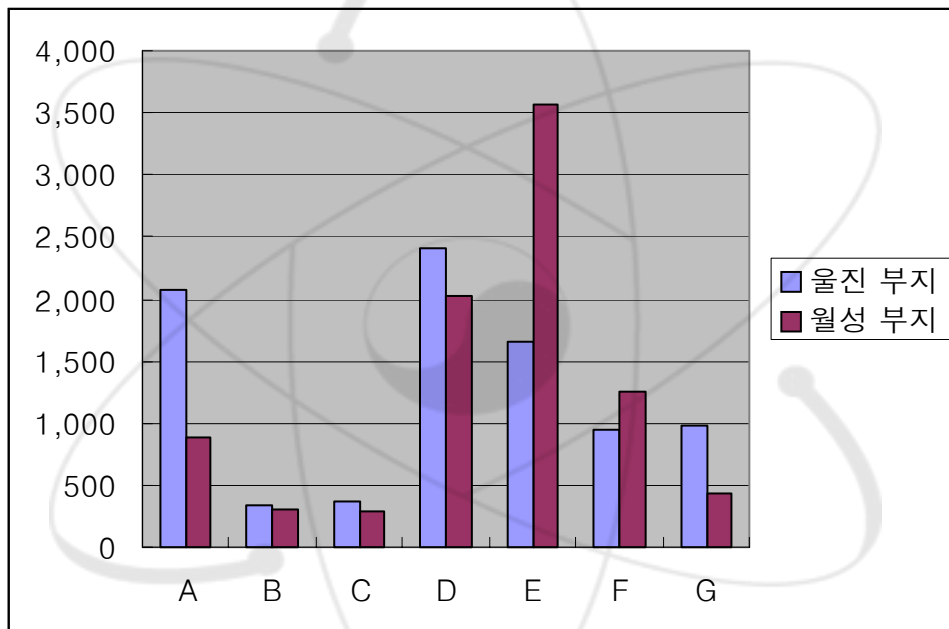


그림 8. 울진 및 월성 부지의 대기안정도 분포

### 3. 인구분포 자료

대기확산 계산을 위해 각각의 발전소 부지를 중심으로 16개의 방위각으로, 반경 80km 까지 10개의 격자로 구분하여 격자별 인구분포를 고려하였다. 울진 3,4호기 및 월성 2,3,4호기 원자력발전소의 최종 안전성 분석 보고서 [8, 9] 자료에 요약되어 있는 1998년 인구분포 자료를 이용하였다. 거리별 인구분포는 표 12에 요약된 바와 같으며 표에서 알 수 있듯이 반경 80km 내의 인구분포 자료를 이용하였다. 울진 부지 근처 80km 반경내에는 약 50만명의 인구가 거주하고 월성 원전 부지 근처에는 685만 명의 인구가 거주하여 월성 근처가 울진 근처보다 13배의 인구가 더 거주하는 것으로 되어있다. 또한, 각각의 부지에 대한 계산격자별 인구 분포는 그림 10 ~ 13에 도시된 바와 같다.

표 12. 울진 및 월성 부지 주변의 반경별 인구분포[8, 9]

거리 (km)	면적 (km <sup>2</sup> )	울진 부지			월성 부지		
		총인구	누적인구	인구 밀도	총인구	누적인구	인구 밀도
0.0 - 1.6	8	283	283	35	848	848	105
1.6 - 3.2	24	1,717	2,000	71	2,762	3,610	114
3.2 - 4.8	40	4,569	6,569	114	2,449	6,059	61
4.8 - 6.4	56	4,383	10,952	78	2,338	8,397	42
6.4 - 8.0	72	3,094	14,046	43	2,738	11,135	38
8.0 - 16.0	603	17,714	31,760	29	59,288	70,423	98
16.0 - 32.0	2,413	38,667	70,427	16	1,090,499	1,160,922	452
32.0 - 48.0	4,021	141,595	212,022	35	558,491	1,719,413	139
48.0 - 64.0	5,630	182,667	394,689	32	639,866	2,359,279	114
64.0 - 80.0	7,238	106,455	501,144	15	4,492,820	6,852,099	621
합계 (명)	20,106	501,144		25	6,852,099		341

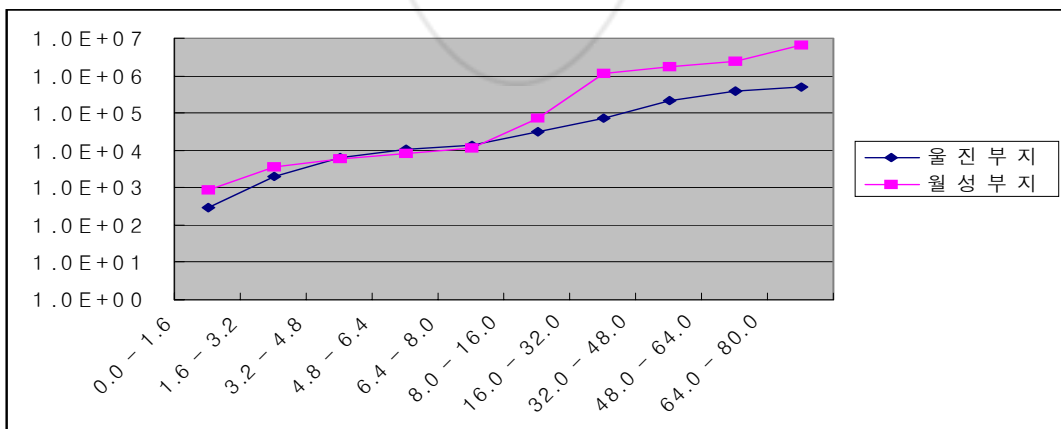


그림 9. 울진 및 월성 부지 근처 80km 반경내 누적 인구분포

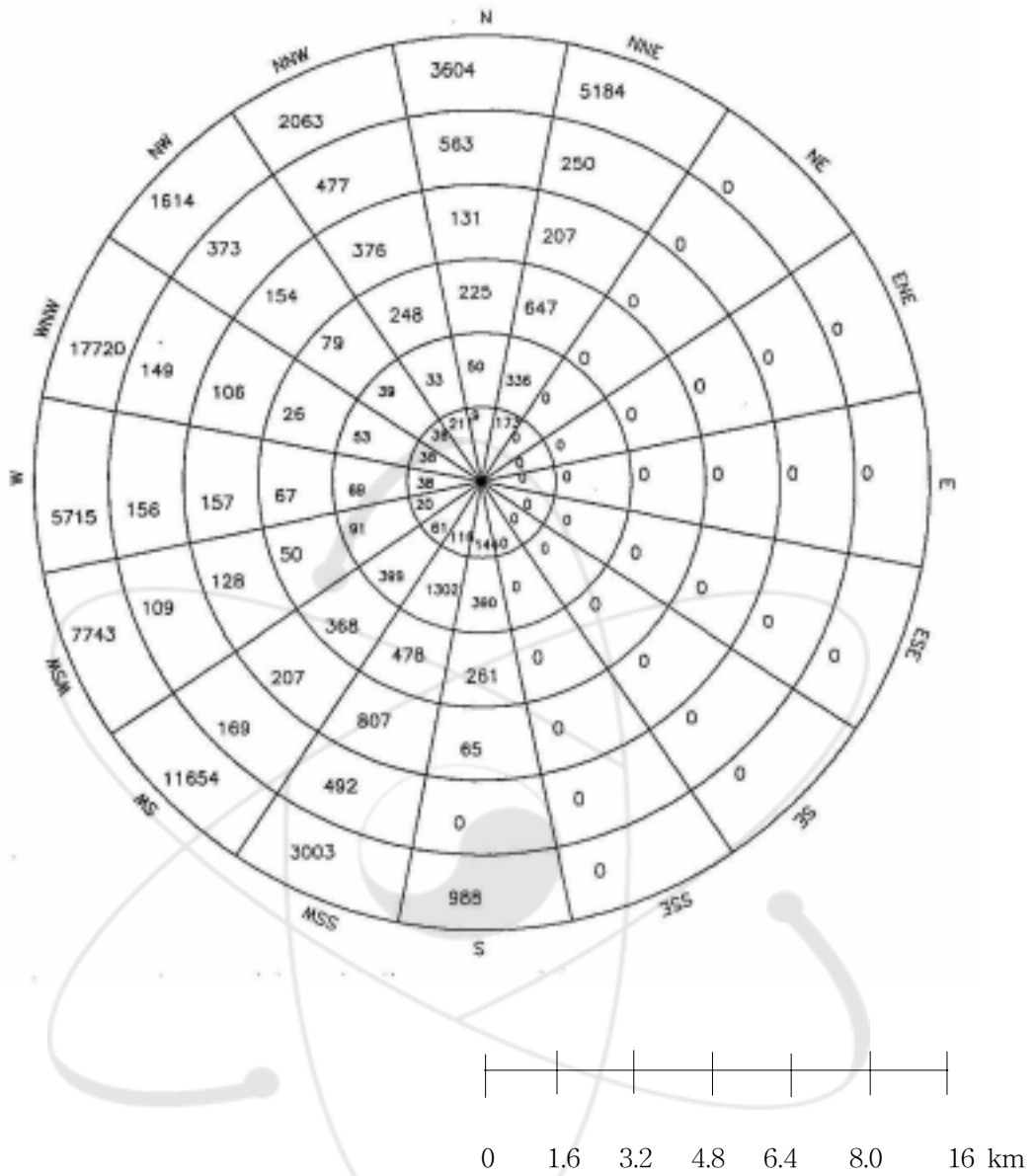


그림 10. 울진 부지 주변의 인구 분포 (0-16km)



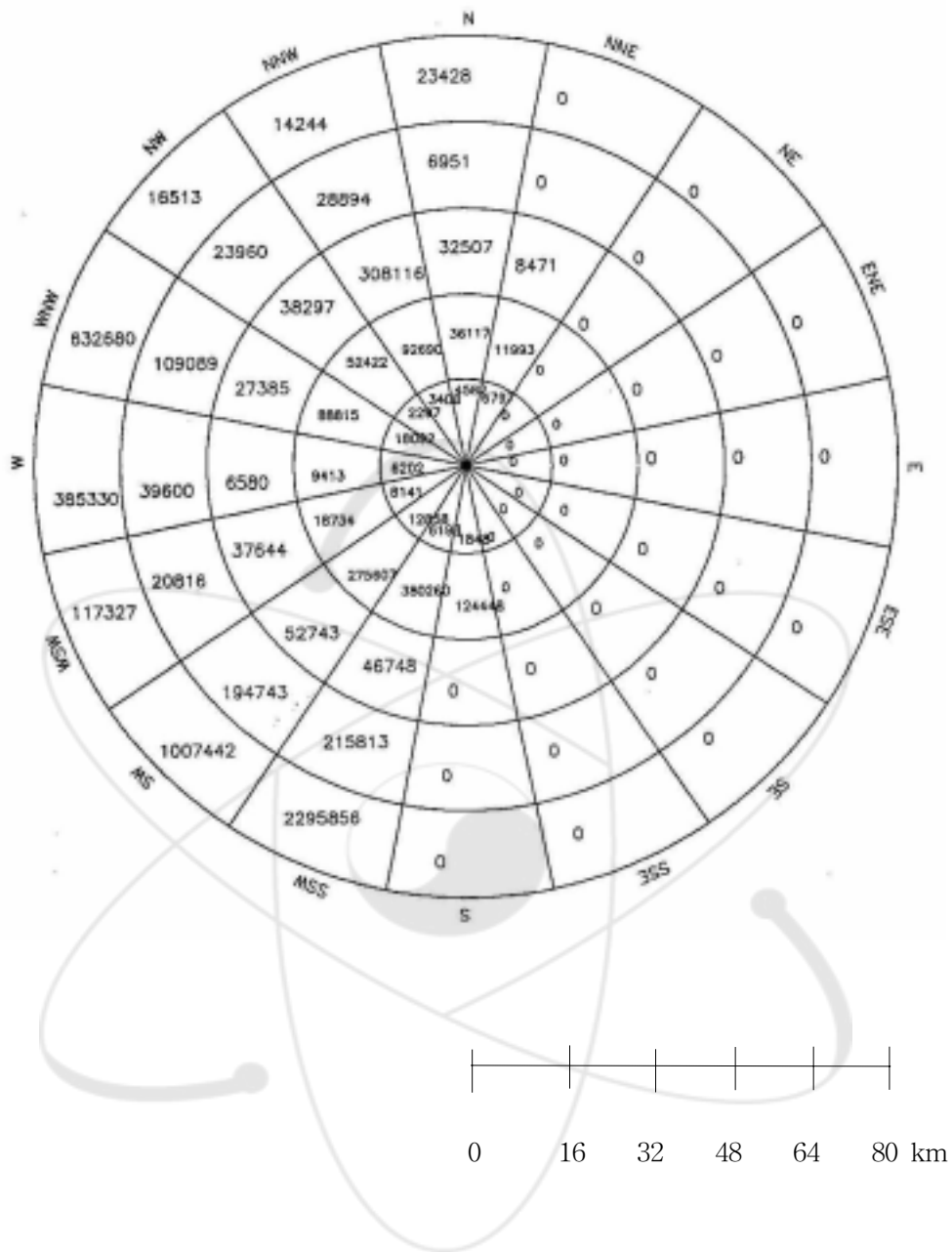


그림 11. 울진 부지 주변의 인구 분포 (16-80km)

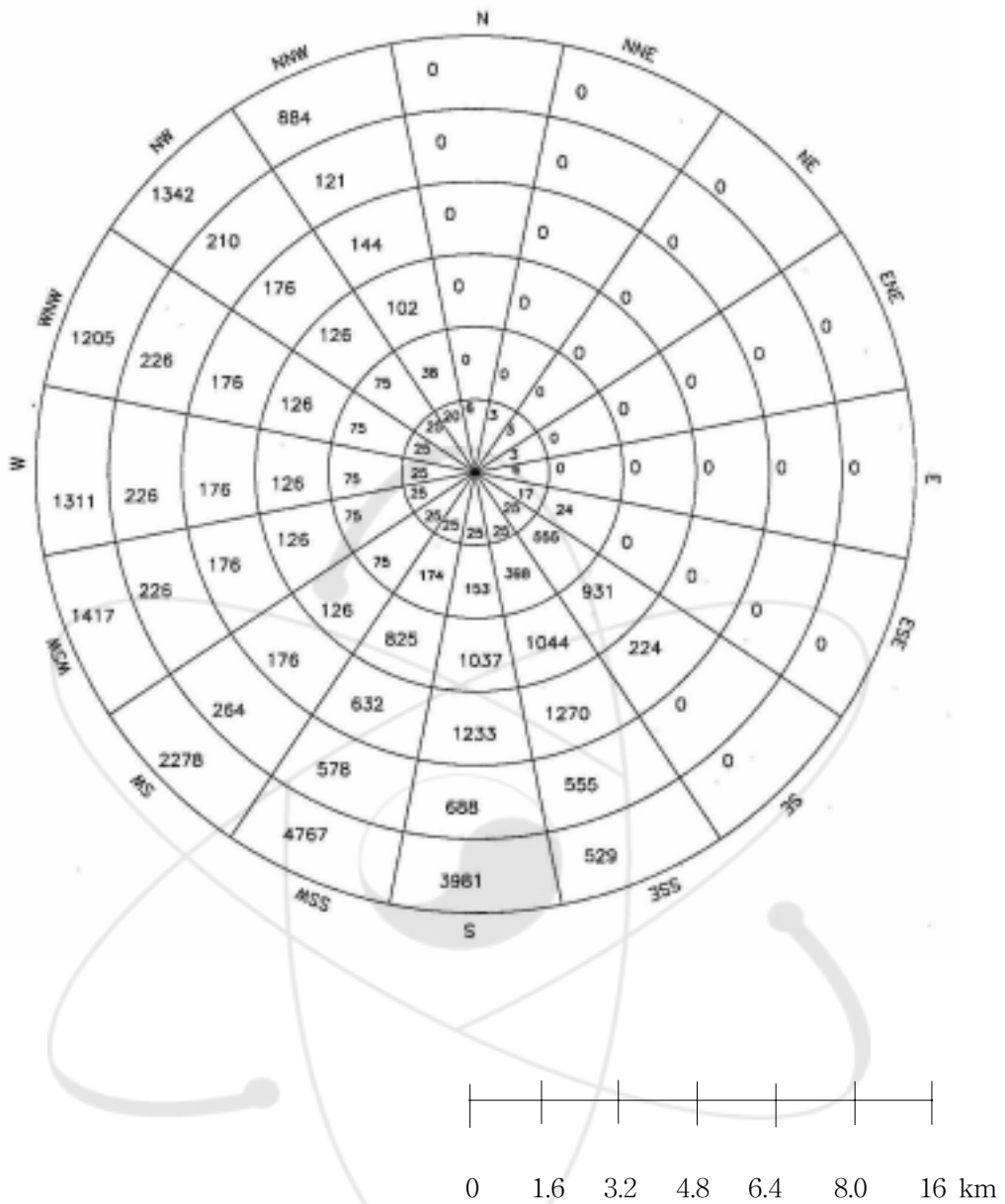


그림 12. 월성 부지 주변의 인구 분포 (0-16km)

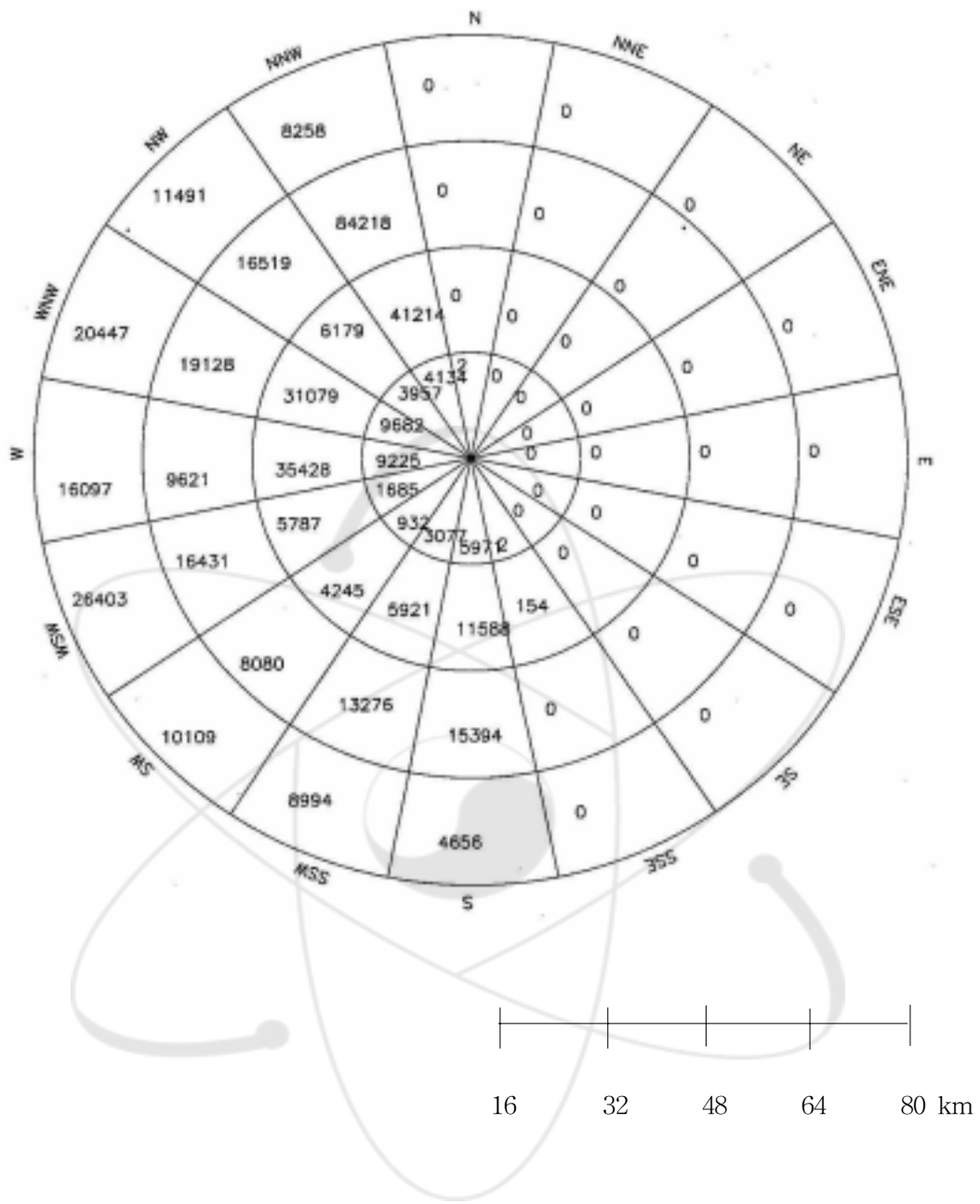


그림 13. 월성 부지 주변의 인구 분포 (16-80km)

#### 4. 피폭 영향 평가 자료

MACCS2 코드에서 조기건강 영향은 사고 발생 후 1년 이내에 발생하는 사망이나 상해이며 암사망이나 암 상해는 사고 발생 후 50년 동안 받게 되는 예탁선량을 이용하여 계산이 이루어진다. 이를 위한 성인의 호흡율, 차폐계수, 리스크 계산을 위한 모델 변수 등과 입력 자료는 향후 외국 연구결과와의 비교를 위해 MACCS2 사용자 지침서에 나와 있는 기본 값들을 사용하였는데 이는 NUREG-1150[11] 연구에서 이용한 값들과 같다.

MACCS2 코드에서 사고 발생 후 약 1주일 정도인 비상기간 동안 방사선 피폭으로 인해 인체에 미치는 영향을 감소시키기 위해 고려하는 비상대응 조치는 차폐(sheltering), 소개(evacuation), 임시 이주이다. 본 연구에서는 소개와 임시이주를 비상대응 조치로 선정하였으며 차폐 지역은 고려하지 않았는데, 이는 NUREG-1150 연구에서 사용한 방법으로 비교가 용이하기 때문이다. 소개는 발전소로부터 16km (10 마일) 바깥의 지역으로 소개하는 것으로 가정하였으며 소개 속도는 1.8 m/sec라고 가정하였다. 소개시 반경 16km 이내의 주민들 중 95%는 16km 이외의 지역으로 소개되고 나머지 5%는 방사성 구름이 통과한 이후 이주하는 것으로 가정하였다.

### 제 3 절 리스크 평가 및 비교

#### 1. 국내 원전 리스크 평가 및 비교

울진 3,4호기와 월성 1호기를 시범분석 발전소로 선정하여 부지 인구 및 기상자료와 사고발생빈도 및 방사선원항 누출량 자료를 이용하여 중대사고로 인하여 원전 부지주변 주민의 건강에 미치는 영향을 분석한 결과를 그림 14 ~ 17에 도시하였다. 그림 14 및 그림 15에 의하면 두 발전소 모두 최악의 중대사고 발생시 최대 약 1천명의 조기 치사율(early fatality)을 나타내었고, 그림 16 및 그림 17에 의하면 두 발전소 모두 최악의 중대사고 발생시 최대 약 1만명의 장기적인 암 치사율(cancer fatality)을 나타내었다.

두 발전소의 조기사망 및 암사망 리스크 평가 결과에 의하면 조기사망이나 암사망 모두 인구밀도가 높은 중수로형 원전인 월성 부지가 인구밀도가 낮은 경수로형 원전인 울진부지에 비해 적은 값을 나타낸다. 특히 월성의 경우, 반경 80km 이내에 거주하는 전체 인구가 울진 주변 인구의 10배 이상인데도 불구하고 주변 주민의 건강영향에 미치는 리스크가 적게 나타나는데 이는 울진 부지의 평균 풍속은 1.87 m/sec, 월성 부지의 평균 풍속은 2.86 m/sec로 월성 부지의 평균 풍속이 울진에 비해 빠르며 또한 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 월성이 울진에 비해 10배 이상 적기 때문이다.

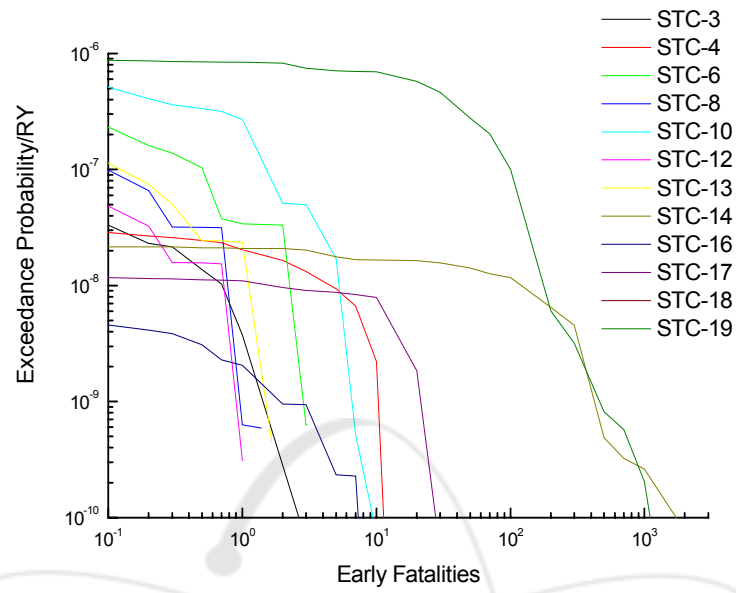


그림 14. 울진 3,4호기 원전에 대한 방사선원 방출군별 조기사망 리스크

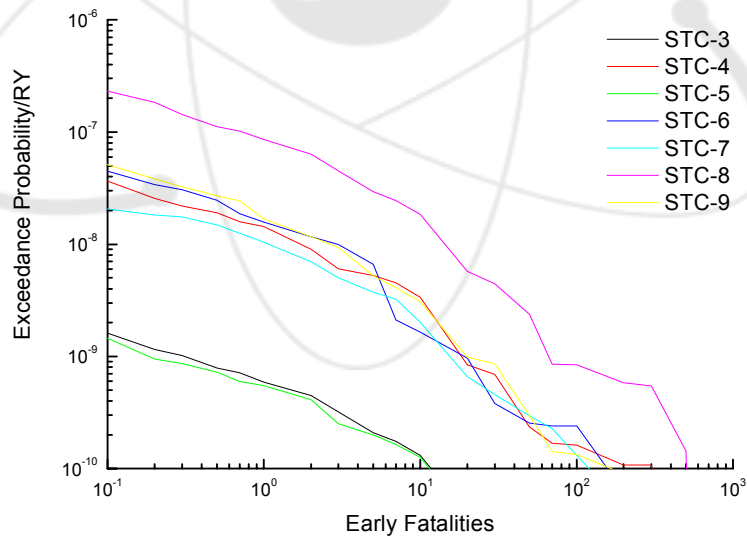


그림 15. 월성 1호기 원전에 대한 방사선원 방출군별 조기사망 리스크

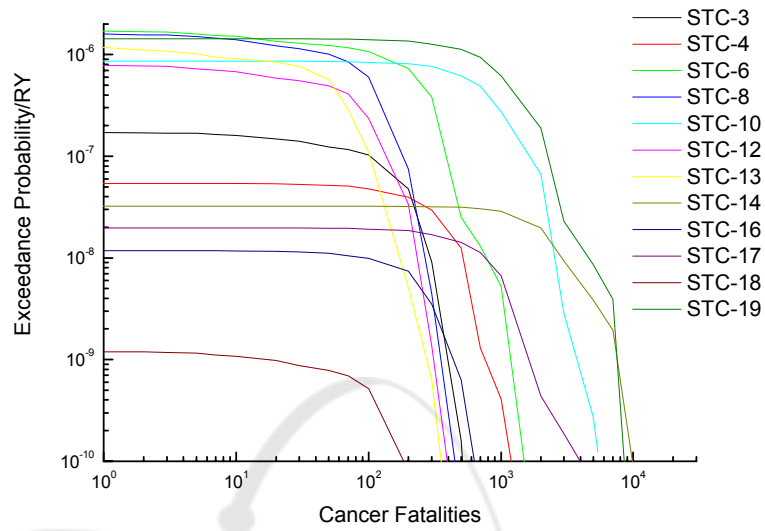


그림 16. 울진 3,4호기 원전에 대한 방사선원 방출군별 암사망 리스크

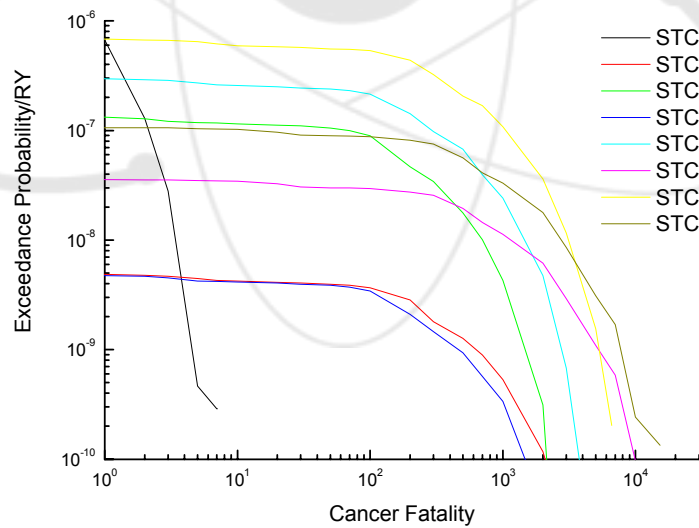


그림 17. 월성 1호기에 대한 방사선원 방출군별 암사망 리스크

경수로형 및 중수로형 원전 모두 가장 큰 리스크 값을 나타내는 방사선원 방출  
 균인 STC-19와 STC-8의 주요 초기사건은 증기발생기 세관파손 사고(STGR)이  
 다. 경수로형 및 중수로형 원전의 증기발생기 세관파손 사고에 대한 리스크 평가  
 결과 비교는 그림 18에 도시된 바와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 중수로형 발전  
 소가 경수로형 발전소에 비해 10배 이상의 인구분포에도 불구하고 조기 사망 및  
 암사망 리스크가 적게 나타난다. 이는 방사선원항 방출량에 있어서 중수로형 원  
 전이 경수로형 원전에 비해 10배 이상 적기 때문이다.

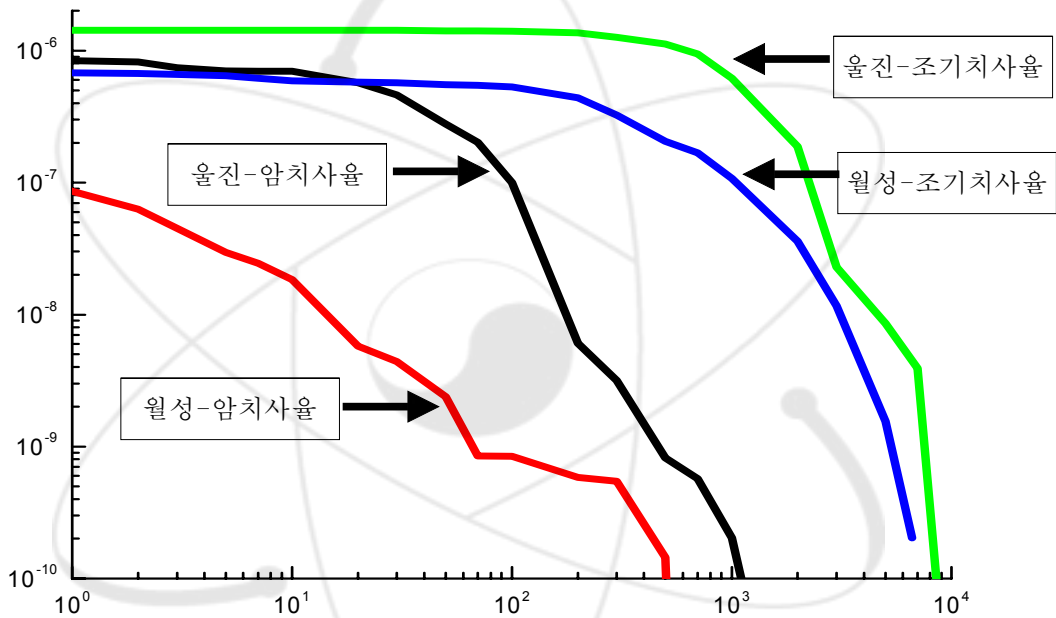


그림 18. 최대 리스크를 보이는 방사선원 방출균 (증기발생기 세관파손 사고)에  
 대한 표준형 및 중수로형 원전 리스크 비교  
 X 축 : 치사율 (명), Y 축 : 발생빈도 (1/년)

WASH-1400[10]의 연구결과에 의하면 조기 건강영향에 가장 많은 영향을 미치  
 는 방사성 동위원소들은 요오드(I)와 텔루륨(Te)이며 후기 건강영향에 가장 많은  
 영향을 미치는 방사성 동위원소들은 반감기가 비교적 긴 세슘(Cs) 등이다. 또한,  
 같은 양의 방사성 물질이 방출된다는 가정하에 방사성 동위원소들의 건강영향에  
 미치는 상대적 중요도를 파악한 D. J. Alpert 등의 연구결과[13]에 의하면 조기  
 건강영향의 경우, 요오드와 텔루륨 다음으로는 골수 피폭선량에는 스트론튬(Sr)



및 바륨(Ba)이, 폐 피폭선량에는 루테튬(Ru)이 많은 영향을 미치며 암 사망에 많은 영향을 미치는 방사성 동위원소로는 세슘 다음으로 텔루륨이다.

증기발생기 세관파단 사고(울진 STC-19, 월성 STC-8)의 경우 조기 사망 및 암 사망에 가장 많은 영향을 미치는 이들 방사성 동위원소들의 방출 분율은 표 13 및 그림 19에 요약하였다. 요약된 바와 같이 중수로형 원전의 방사성 동위원소들의 방출 분율은 경수로형 원전에 비해 10배 이상 적다. 핵분열 생성물의 노심 내 재고량과 방출 분율을 고려한 대기 중으로 방출되는 방사성 동위원소의 절대량(단위 ; Bq)은 표 14 및 그림 20에 요약되어 있다.

표 13. 증기발생기 세관파단 사고의 경우 방사선원 방출분율

	방사성 동위원소 그룹				
	I	Te	Kr	Cs	Ru
KSNP (STC-19)	$1.3 \times 10^{-1}$	$4.9 \times 10^{-1}$	$9.5 \times 10^{-1}$	$1.3 \times 10^{-1}$	$4.6 \times 10^{-2}$
PHWR (STC-8)	$1.2 \times 10^{-2}$	$4.2 \times 10^{-3}$	$9.6 \times 10^{-1}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$5.3 \times 10^{-7}$

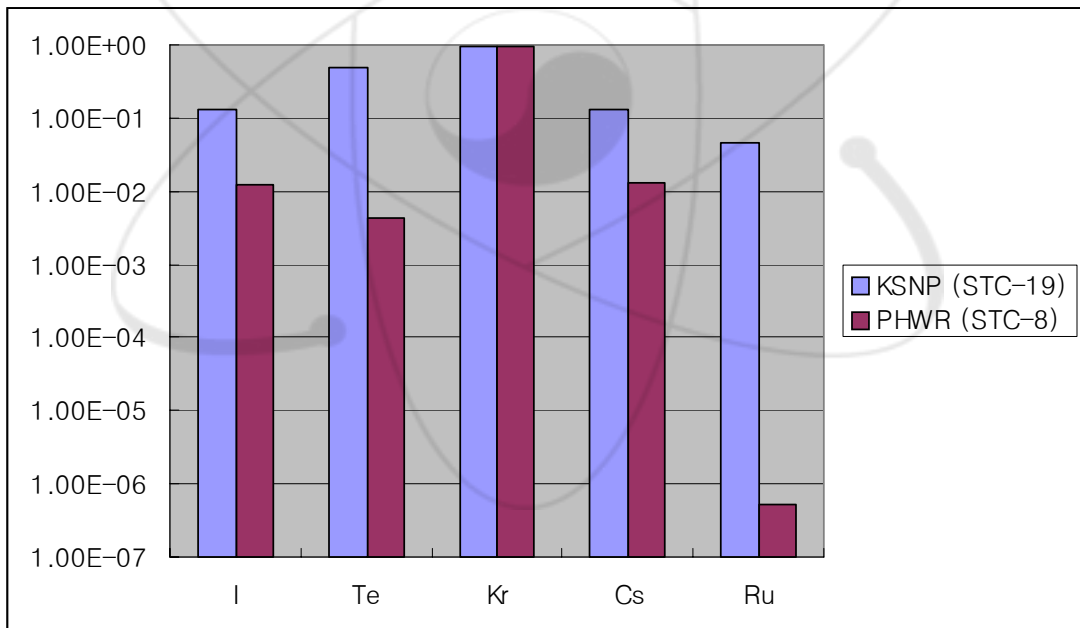


그림 19. 증기발생기 세관파단 사고의 경우 방사선원 방출분율

표 14 및 그림 20에서 보듯이 중대사고로 인해 대기 중으로 방출되는 방사성 동위원소 중 크립톤 동위원소 일부를 제외하고는 모든 방사성 동위원소의 대기 중으로의 방출량이 중수로형 발전소의 경우가 경수로형 발전소에 비해 매우 낮다.

즉, 조기 건강영향에 많은 영향을 미치는 동위원소 중 요오드와 크립톤은 중수로형 발전소가 경수로형 발전소에 비해 약간 낮은 정도이지만 텔루륨과 크립톤은 1/10 이하의 양이다. 또한, 루테튬은 중수로형 발전소가 경수로형 발전소에 비해 현저히 낮아 무시할 정도의 수준의 양이다. 또한, 암 사망이나 상해에 많은 영향을 미치는 세슘과 텔루륨은 중수로형 발전소가 경수로형 발전소에 비해 1/10 이하의 값을 보여준다. 따라서, 가상 중대사고로 인해 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양을 결정하는 STC별 방출 분율이 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 적으며 이로 인해 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 적기 때문에 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 사고로 인해 인체건강에 미치는 리스크가 적다.

표 14. 증기발생기 세관과단 사고의 경우 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양

방사성 동위원소	반감기(sec)	울진 3,4호기(Bq)	월성 1호기(Bq)
Kr-85	$3.39 \times 10^8$	$5.24 \times 10^{16}$	$8.32 \times 10^{15}$
Kr-85m	$1.61 \times 10^4$	$3.56 \times 10^{17}$	$5.53 \times 10^{17}$
Kr-87	$4.56 \times 10^3$	$6.32 \times 10^{17}$	$1.04 \times 10^{18}$
Kr-88	$1.01 \times 10^4$	$8.76 \times 10^{17}$	$1.49 \times 10^{18}$
Ru-103	$3.42 \times 10^6$	$1.96 \times 10^{17}$	$3.12 \times 10^{12}$
Ru-105	$1.60 \times 10^4$	$1.59 \times 10^{17}$	$2.47 \times 10^{12}$
Ru-106	$3.19 \times 10^7$	$1.14 \times 10^{17}$	$6.45 \times 10^{11}$
Te-127	$3.37 \times 10^4$	$1.47 \times 10^{17}$	$2.07 \times 10^{15}$
Te-127m	$9.42 \times 10^6$	$2.03 \times 10^{16}$	$2.31 \times 10^{14}$
Te-129	$4.20 \times 10^3$	$3.97 \times 10^{17}$	$6.29 \times 10^{15}$
Te-129m	$2.89 \times 10^6$	$5.88 \times 10^{16}$	$9.54 \times 10^{14}$
Te-131m	$1.08 \times 10^5$	$1.70 \times 10^{17}$	$2.93 \times 10^{15}$
Te-132	$2.81 \times 10^5$	$1.57 \times 10^{18}$	$2.65 \times 10^{16}$
I-131	$6.95 \times 10^5$	$3.01 \times 10^{17}$	$5.37 \times 10^{16}$
I-132	$8.23 \times 10^3$	$4.24 \times 10^{17}$	$7.75 \times 10^{16}$
I-133	$7.49 \times 10^4$	$5.69 \times 10^{17}$	$1.06 \times 10^{17}$
I-134	$3.16 \times 10^3$	$6.19 \times 10^{17}$	$1.15 \times 10^{17}$
I-135	$2.37 \times 10^4$	$5.39 \times 10^{17}$	$1.01 \times 10^{17}$
Cs-134	$6.50 \times 10^7$	$2.16 \times 10^{16}$	$2.10 \times 10^{15}$
Cs-136	$1.12 \times 10^6$	$4.76 \times 10^{16}$	$1.61 \times 10^{15}$
Cs-137	$9.50 \times 10^8$	$1.18 \times 10^{16}$	$2.15 \times 10^{15}$

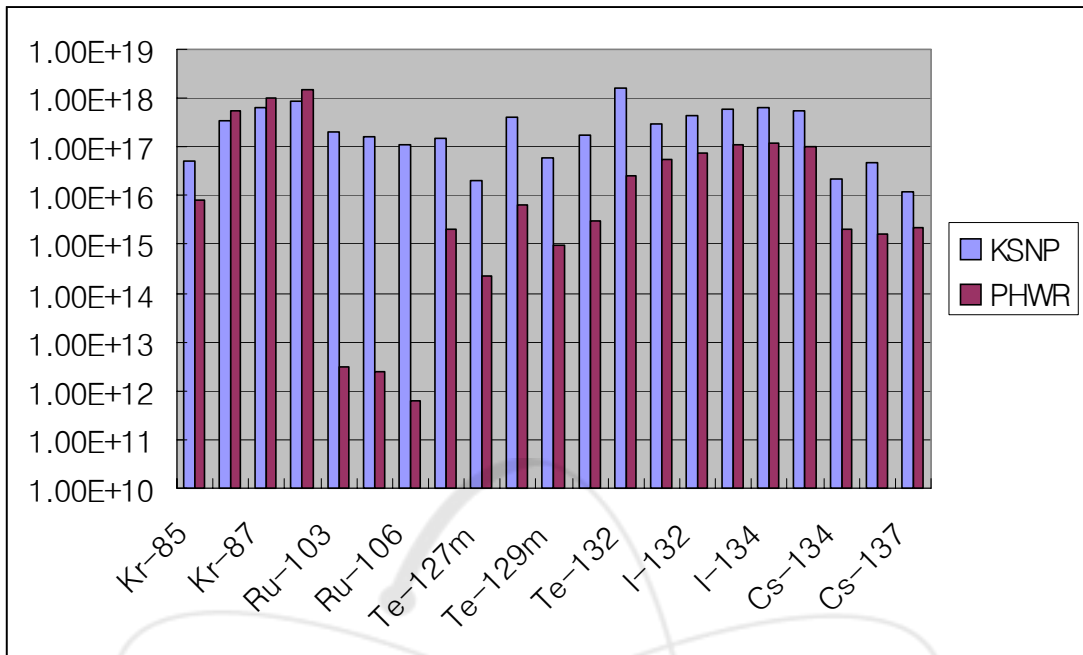


그림 20. 증기발생기 세관파단 사고의 경우 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양 (단위: Bq)

본 연구에서 채택한 비상대응 조치인 1.8 m/sec의 소개 (evacuation) 속도로 반경 16km 이내의 주민들 중 95%는 16km (10 마일) 바깥의 지역으로 소개되고 나머지 5%는 방사성 구름이 통과한 이후 이주하였을 경우에 대해 각각의 발전소의 최대 리스크를 나타내는 방사선원 방출준인 STC-19와 STC-8에 대한 조기 사망 및 암 사망 자 수의 변화는 표 15에 요약되어 있다. 표 15에서 알 수 있듯이 조기사망 및 암 사망 모두 소개가 이루어졌을 경우, 사망자 수가 감소함을 알 수 있다. 그러나 비 소개(no evacuation)에 비해 소개시켰을 경우 사망자 수의 감소가 예상보다는 크지 않음을 알 수 있었다. 사망자 수에 있어서 월성 1호기의 경우가 울진 3,4호기에 비해 10배 정도 낮은 것으로 분석되었다. 이는 월성 부지 근처의 인구밀도는 10배 이상 높은 데도 불구하고 중수로의 사고발생빈도와 방사선원 방출량이 표준형 경수로에 비해 각각 10배 이상 적기 때문인 것으로 분석되었다.

표 15. 소개와 비소개의 경우 평균 사망자 수의 변화 (평균)

방사선원항 자료 적용 부지 자료	울진 3,4호기(경수로) 울진부지		월성 1호기(가압중수로) 월성부지	
사고형태 최대 리스크 STC 지배적인 초기사건 형태 격납건물 파손형태	STC-19 증기발생기 세관파손 사고 격납건물 우회		STC-8 증기발생기 세관파손 사고 격납건물 우회	
사고발생빈도(/년)	$1.43 \times 10^{-6}$		$6.85 \times 10^{-7}$	
소개 여부	비 소개	소개	비 소개	소개
조기사망자 수 (평균)	28.4	27.8	1.38	1.32
암사망자 수 (평균)	579	491	73.7	51.0

그림 21과 22는 경수로와 중수로의 방사선원 방출량을 울진부지와 월성부지에 적용한 민감도 분석 결과이다. 예를 들면 경수로의 방사선원 방출 분율이 울진부지에 적용되었을 경우에는 최대 암 사망율이 약 1만명 정도 되었으나 월성부지에 적용되었을 경우에는 최대 암 사망율이 약 4만명 정도로 분석되었다. 한편 중수로의 방사선원항 방출자료를 울진부지에 적용하였을 경우에는 최대 암 사망율이 약 300명 정도 되었으나 월성부지에 적용하였을 경우에는 최대 암 사망율이 약 3000명 정도 되었다. 이는 경수로의 방사선원항 방출량이 중수로에 비해 10배 가량 많고 또한 월성부지의 인구밀도가 울진부지에 비해 10배 정도 높기 때문이다.

표 16. 적용 방사선원항 및 적용 부지에 따른 최대 사망자 수의 변화 (최대)

방사선원항 자료	울진 3,4호기 방사선원항 (표준형 경수로)		월성 1호기 방사선원항 (가압중수로)	
최대 리스크 STC 지배적인 초기사건 형태 격납건물 파손형태	STC-19 증기발생기 세관파손 사고 격납건물 우회		STC-8 증기발생기 세관파손 사고 격납건물 우회	
사고발생빈도(/년)	$1.43 \times 10^{-6}$		$6.85 \times 10^{-7}$	
적용 부지	울진 부지	월성 부지	울진 부지	월성 부지
조기사망자 수 (최대)	1천명	2천명	10명	5백명
암사망자 수 (최대)	1만명	4만명	3백명	3천명

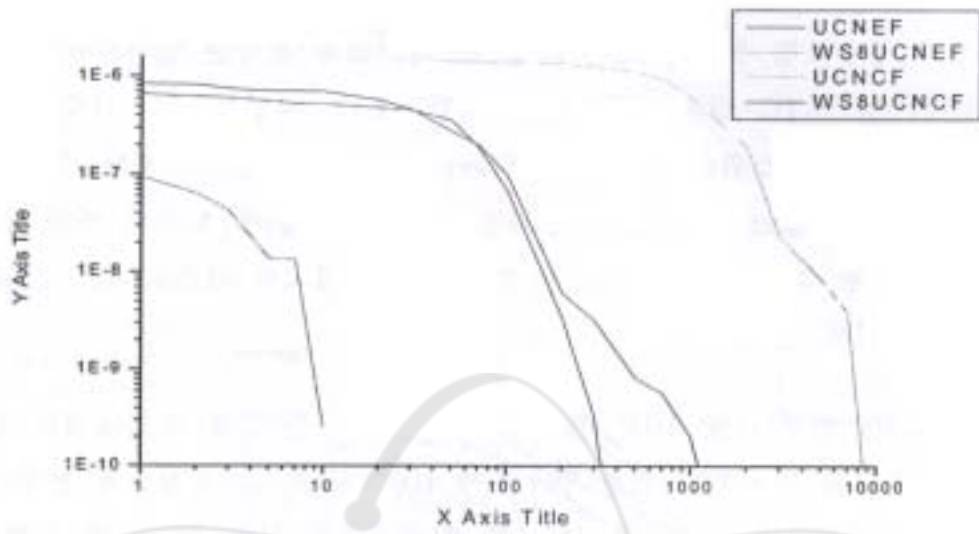


그림 21. 경수로와 중수로의 방사선원항 방출자료를 울진부지에 적용한 경우의 민감도 분석결과

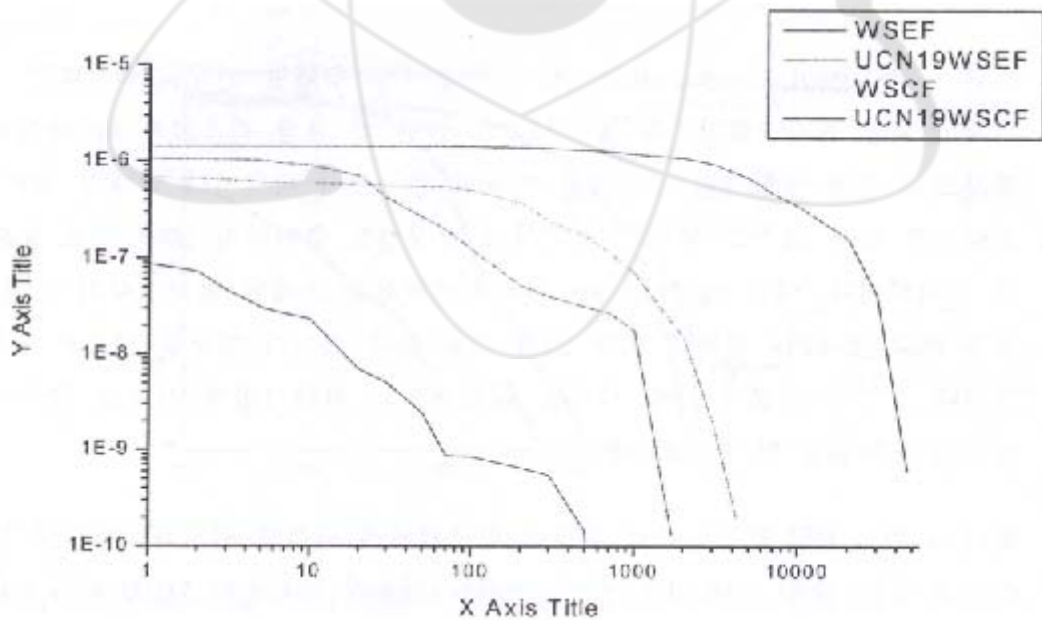


그림 22. 경수로와 중수로의 방사선원항 방출자료를 울진부지에 적용한 경우의 민감도 분석결과

## 2. 외국 연구결과와의 비교

경수로형과 중수로형 원전에 대해 가장 큰 리스크를 보이는 방사선원향 방출 사고범주(STC)인 STC-19와 STC-8에 대한 조기 사망과 암 사망 리스크를 WASH-1400[12]과 스위스 PSI(Paul Sherrer Institut) 연구소에서 수행한 연구 결과[14]와 비교하였는데 두 연구 결과는 그림 23과 24에 도시된 바와 같다. 본 연구에서 수행한 리스크와 외국의 두 연구결과를 비교한 리스크 비교는 표 17과 18에 요약된 바와 같다.

WASH-1400의 연구(그림 23)는 원자력과 비원자력 산업 및 인공재해로 인한 여러 가지 리스크를 비교하기 위한 연구로서 100기의 원자력발전소의 운영으로 인한 조기사망 리스크가 비원자력 산업 및 인공재해로 인한 리스크에 비해 100배 이상 낮다는 것을 보여줌으로써 원자력의 상대적인 안전성을 보여준다. 원자력발전소 1기의 운영으로 인한 리스크는 타 산업 및 인공재해에 비해 10,000배 이상 낮게 된다. 국내의 원전 1기의 운영으로 인한 리스크는 WASH-1400의 결과와 비슷한 결과를 갖는 것으로 분석되었다.

스위스 PSI(Paul Sherrer Institut) 연구소에서 수행한 연구(그림 24)는 스위스 Muehleberg 원자력발전소의 중대사고로 인한 암 사망 리스크와 타 발전원의 중대사고로 인한 경험적인 리스크를 비교한 연구로서 미국이나 국내의 원전 1기의 운영으로 인한 리스크 보다는 중대사고 발생빈도 측면에서 10배 정도 높은 것으로 분석되었다. 이는 Muehleberg 원자력발전소가 오래된 발전소여서 노심손상빈도가 미국 및 국내 원전에 비해 10배 정도 높을 것이기 때문일 것으로 유추된다. 그러나 중대사고 발생시 암 사망률 측면에서는 최대 1만명 정도로 국내 결과와 비슷한 결과임을 알 수 있었다.

또한, 스위스 PSI 연구소에서 수행한 연구결과에 의하면 원자력발전으로 인한 리스크는 석탄, 오일, 천연가스, 수력 발전의 경우와 비교하면 1/100 이하로서 현저히 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다. 화석연료 발전원에 대한 리스크는 최근 30년간 전력생산에 따른 연료 채굴, 수송 단계에서 주로 발생한 사망률 자료이며 수력의 경우에는 댐 붕괴에 따른 사망률 자료이다. 화석연료의 경우에는 중대사고 발생빈도는 높으나 사고발생시 사망자 수가 수백명 이하로 제한되나 댐 붕괴의 경우에는 한번 사고가 발생하면 수천명 이상의 인명 손실을 유발하는 사고도 있었다. 일례로 중국에서는 1975년 양쯔강 반취오 댐의 붕괴로 23만명의 인명을 앗아가는 사고가 발생하였다[15]. 따라서 본 분석 및 미국과 스위스의 연구결과를

보면 원자력발전으로 인한 리스크는 중대사고 발생빈도나 결과 (사망자 수) 측면에서 타 발전원에 비해 훨씬 안전함을 알 수 있다.

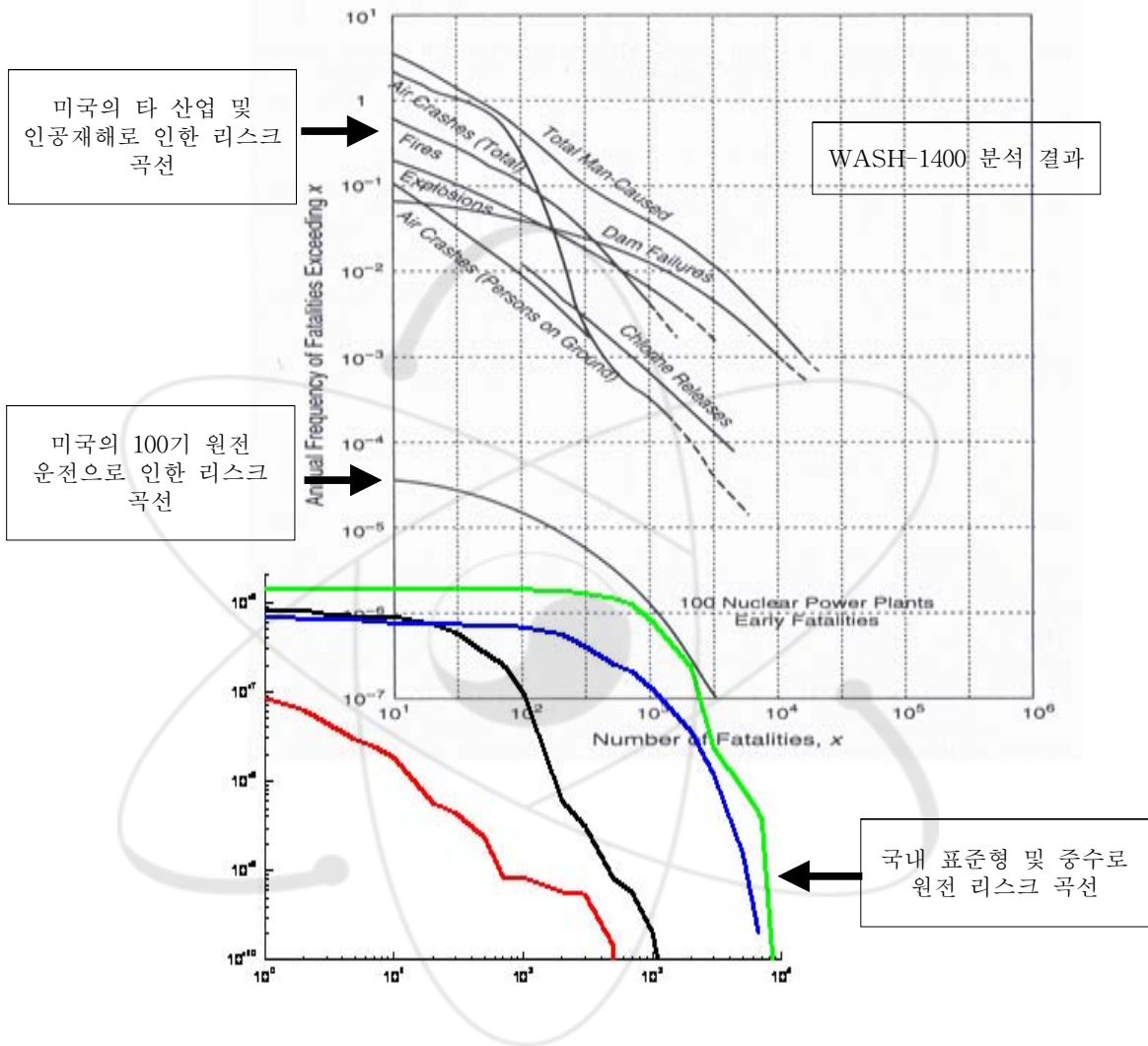


그림 23. WASH-1400 분석 결과와 국내 원전 리스크 분석 결과와의 비교

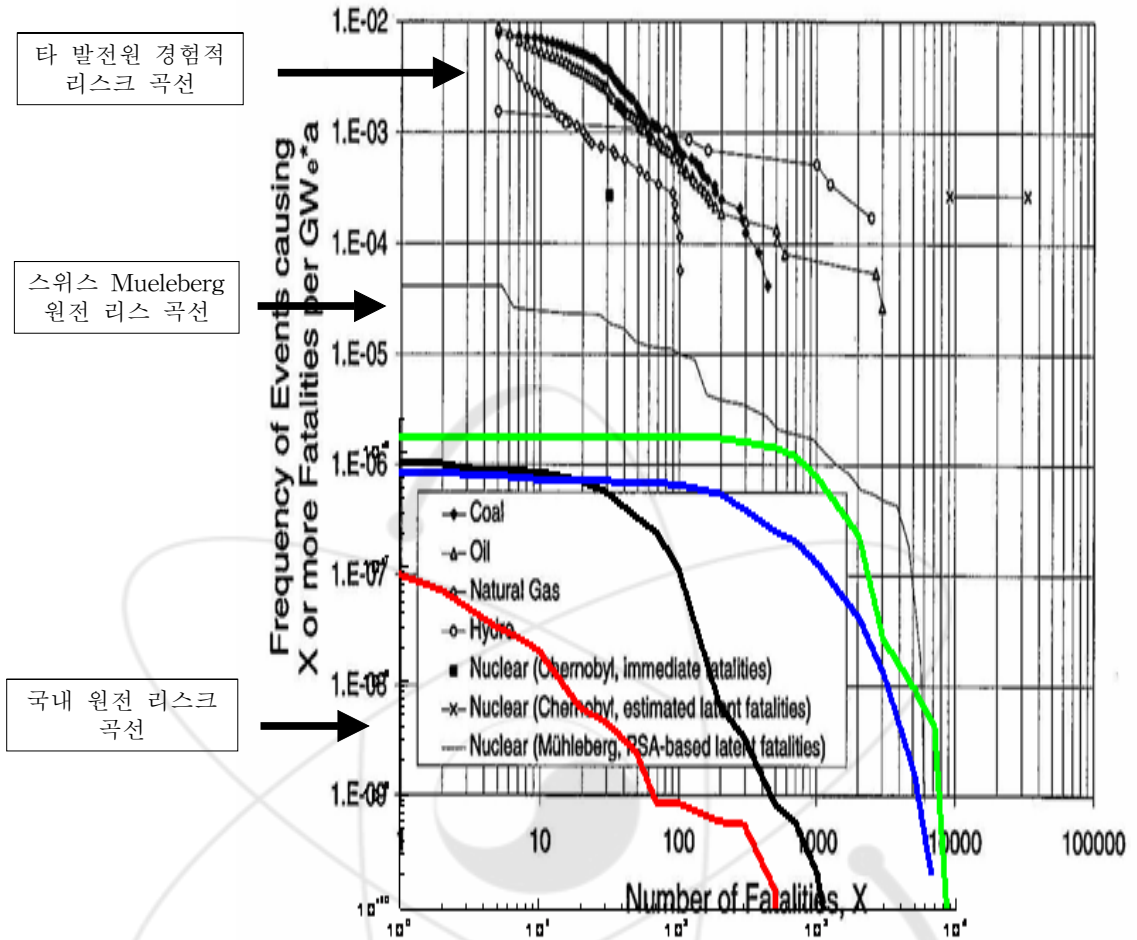


그림 24. 스위스 PSI 연구소 분석 결과와 국내 원전 리스크 분석 결과와의 비교



표 17. 외국 연구결과와의 원전 중대사고 리스크 비교

	WASH-1400	PSI (Muhleberg)	PWR		PWRH	
			조기사망	암사망	조기사망	암사망
사망자 ≥ 10	$4.0 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-7}$
사망자 ≥ 100	$2.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-6}$	$8.4 \times 10^{-10}$	$5.3 \times 10^{-7}$
사망자 ≥ 1000	$1.2 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-10}$	$6.2 \times 10^{-7}$	-	$1.1 \times 10^{-7}$

표 18. 다른 발전원과의 리스크 비교

	원자력				다른 발전원			
	PWR		PWRH		석탄	석유	천연가스	수력
	조기사망	암사망	조기사망	암사망				
사망자 ≥ 10	$7.0 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-7}$	$8.0 \times 10^{-2}$	$6.0 \times 10^{-2}$	$3.0 \times 10^{-2}$	$2.0 \times 10^{-2}$
사망자 ≥ 100	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.5 \times 10^{-6}$	$8.4 \times 10^{-10}$	$5.3 \times 10^{-7}$	$8.0 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$9.0 \times 10^{-4}$
사망자 ≥ 1000	$2.0 \times 10^{-10}$	$6.2 \times 10^{-7}$	-	$1.1 \times 10^{-7}$	-	$8.0 \times 10^{-5}$	-	$1.0 \times 10^{-4}$

## 제 3 장 결론 및 건의사항

### 제 1 절 결론

원자력에 대한 대국민의 수용성을 높이기 위한 기초자료 제공을 위해 경수로형과 중수로형 원자력 발전소의 중대사고시 대기 중으로 방출되는 방사성 물질로 인한 주변 주민의 인체에 미치는 영향을 평가하여 비교하였다. 방사성 물질로 인한 인체에 미치는 영향은 조기사망과 암 사망을 선정하였으며 평가 결과는 사고 발생빈도를 고려한 리스크로써 나타내고 서로 비교하였으며 외국의 원자력 발전소의 사고로 인한 리스크 평가 결과뿐만 아니라 다른 발전원의 사고로 인한 리스크와도 비교하였다.

국내 울진 3,4호기 및 월성 1호기를 대상으로 한 경수로형 원전과 중수로형 원전에 대한 가상 중대사고 발생으로 인한 부지주변 주민에 대한 리스크 분석결과 울진 3,4호기의 리스크가 월성 1호기의 리스크에 비해 높게 나타났다. 월성 부지주변 반경 80km 내의 인구가 울진 부지에 비해 10배 이상 많은 데도 불구하고 사망자 수나 적게 나타나는데 이는 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 가상 중대사고의 발생빈도가 10배 이상 낮고 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 10배 이상 적기 때문이다.

두 발전소 모두 최대 리스크를 보이는 방사선원 방출군의 대표적인 초기사건은 증기발생기 세관파손 사고이다. 따라서 경수로형 및 중수로형 발전소 모두 사고로 인한 주변 주민에게 미치는 리스크를 최소화하기 위해서는 증기발생기 세관파손 사고빈도와 이로 인한 대기 중으로의 방사성 물질의 방출을 최소화하기 위한 방안이 강구되어야 한다.

원자력발전소에서 중대사고가 발생하였을 경우 원전 부지 주변 주민에 대한 리스크 관점에서 볼 때 소개가 효과적인 비상대책 수단인 것으로 예상하였으나 환경영향분석결과 소개가 반드시 효과적인 비상대책 수단인 것만은 아닌 것으로 분석되었다.

중대사고로 인한 방사성 물질 누출 빈도와 치사율 측면에서 볼 때, CCDF 곡선군으로 표현한 분석 결과는 미국에서 분석한 원자로 안전성 연구(WASH-1400) 결과와 비슷한 결과를 보였다. 그러나 스위스의 Muhleberg 원전에 대한 중대사

고로 인한 리스크 분석 결과보다는 중대사고 발생빈도 측면에서 볼 때 국내 원전의 결과가 10배 정도 낮은 것으로 분석되었다. 이는 스위스 Muhleberg 원전이 오래되어서 중대사고 발생빈도(노심손상사고 발생빈도)가 최근에 건설된 국내 원전보다는 10배 정도 높기 때문인 것으로 유추된다.

연료의 채굴 및 수송단계에서 인명사고가 많이 발생하는 화석연료(석유, LNG, 석탄) 발전시스템과 댐의 붕괴로 인하여 대형 인명사고를 가져오는 수력 발전시스템에 비해서는 인명사고를 야기하는 중대사고 발생빈도 측면에서 원자력발전시스템은 1/100 ~ 1/1,000의 빈도를 나타내었다.

외국의 연구결과인 석탄, 오일, 천연가스, 수력 등과 같은 다른 발전원의 사고로 인한 리스크와 비교해 보면 원자력 발전소의 중대사고로 인한 리스크가 발생빈도 측면에서 볼 때 현저히 낮은 값을 나타내기 때문에 다른 발전원에 비해 원자력이 매우 안전하다는 것을 알 수 있다. 그러나 원자력과 수력과 같은 발전시스템은 한 번 사고가 발생하게 되면 수천 내지 수만명의 인명을 앗아갈 가능성은 배제할 수 없으므로 중대사고 발생 가능성을 최대한으로 낮추어야 한다.

## 제 2 절 건의 사항

본 연구의 결과인 경수로형과 중수로형 원자력 발전소의 중대사고로 인한 리스크 평가 결과는 원자력의 안전성을 입증하는 자료로써 활용이 가능하다. 특히, 외국의 원자력 발전소의 사고 리스크와 비교하여 매우 안전하다는 것을 입증하였기 때문에 이는 원자력에 대한 국민 수용성 증대를 위한 기초 자료로써의 활용성이 매우 크다. 또한, 비록 외국의 결과이긴 하지만 원자력이 아닌 다른 발전원의 사고로 인한 리스크와 비교했을 때 국내 원자력 발전소의 리스크가 현저히 낮은 값을 나타내기 때문에 국민 수용성 증대를 위한 자료로써의 활용 가치가 매우 크다.

앞으로 국내 원자력을 제외한 다른 발전원의 사고로 인한 리스크 평가가 이루어진다면 서로 비교함으로써 원자력의 상대적 안전성을 입증할 수 있을 뿐만 아니라 원자력을 포함한 모든 발전원의 전력생산으로 인한 환경영향 평가 결과를 함께 고려한다면 발전원별 국민 수용성에 관한 정량적인 평가가 가능하다. 이를 위하여 국내 다른 발전원에 대한 사고 리스크 평가와 환경영향 평가가 이루어져야 한다.

## 제 4 장 참고문헌

1. 이상곤, “전환기의 에너지 정책과 원자력산업의 미래”, 17차 KAIF/KNS 연차대회, 2002.
2. Rainer Friedrich, “ExternE, Externalities of Energy,” European Commission, 1995.
3. D. I. Chanin, and Mary Young, “Code Manual for MACCS2, Volume 1, User’s Guide, SAND97-0594, Sandia National Laboratories, 1997.
4. A. G. Croff, “A User’s Manual for the ORIGEN2 Computer Code: ORNL/TM-7175,” Oak Ridge National Laboratory, 1980.
5. L. T. Ritchie et al., “Probabilistic Risk Assessment Course Document, Volume 7: Environmental Transport and Consequence Analysis,” NUREG/CR-4350/7 of 7, 1985.
6. 한국전력공사, “Ulchin Units 3&4 Final Probabilistic Safety Assessment Report,” 1997.
7. 한국수력원자력(주), “월성 1호기 확률론적 안전성 평가”, 2003.
8. 한국전력공사, “울진 원자력 3,4호기 최종안전성분석보고서“, 1995.
9. Korea Electric Power Corporation, “Wolsong Nuclear Power Plant Units No. 2/3/4, Final Safety Analysis Report,” 1995.
10. 정종태, 하재주, “기상자료가 인체 건강에 미치는 영향 평가”, 한국원자력연구소, KAERI/TR-1230/99, 1999년, 한국원자력연구소 기술보고서.
11. USNRC, “Severe accident risks: an assessment of five nuclear power plants,” NUREG-1150, 1990.
12. USNRC, “Reactor Safety Study Appendix VI: Calculation of Reactor Accident Consequences, WASH-1400,” NUREG 75/014, USNRC, 1975.
13. Daniel J. Alpert, David I. Chanin, and Lynn T. Ritchie, “Relative Importance of Individual Elements to Reactor Accident Consequences Assuming Equal Release Fractions,” NUREG/CR-4467, USNRC, 1986.
14. S. Hirshberg, G. Spiekerman, R. Dones, P. Burgherr, “Comparison of Severe Accident Risks in Fossil, Nuclear, and Hydro Electricity Generation,” Paul Scherrer Institute, CH-5232, Switzerland, 2000.
15. 민경란, 김태운, 하재주, “국내외 에너지사용 관련 중대사고 발생현황 분석”, KAERI/TR-2450/2003, 2003년 3월, 한국원자력연구소 기술보고서.

16. 정중태, 하재주, “방사선원 방출변수가 인체 건강에 미치는 영향 평가”, KAERI/TR-1110/98, 1998년 8월, 한국원자력연구소 기술보고서.
17. 전인영, 이재기(한양대학교), “한국표준형 원전에 대한 방사선 비상계획구역 범위 평가”, 방사선방호학회지, Vol. 28, No.3, pp.215-223, 2003년 9월호
18. 황석원, 제무성(한양대학교), “한국표준형 원전의 중대사고시 MACCS 코드를 이용한 위험성 평가”, 방사선방호학회지, Vol. 28, No.3, pp.189-197, 2003년 9월호
19. 이경진(조선대학교), 원자로시설 위치제한 규정 개선 연구, 2003-2004, 한수원(주) 용역과제



## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 과제의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다. 본 보고서를 발간하기까지는 많은 전문가 분들의 협조가 절대적으로 필요하였습니다. 먼저 울진 및 월성 발전소 부지의 기상자료를 제공하여준 한국수력원자력주식회사 울진원자력본부와 월성원자력본부에 감사의 뜻을 전합니다. 한국표준형 가압경수로와 가압중수로의 방사선원항 방출군 논리도와 관련 자료를 제공하고 자문에 응하여 주신 한국원자력연구소 김동하 박사님과 한국방사선연구소 조성원 박사님께 감사의 뜻을 전합니다. 원자로 핵분열생성물 재고량 분석을 위한 ORIGEN 코드 입력파일을 제공하여준 한국원자력연구소 송태영 박사님과 (주)액트의 한병섭 박사께도 감사의 뜻을 전합니다.



서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-2730/2004					
제목 / 부제	국내 경수로형과 중수로형 원자력발전소의 가상 중대사고 리스크 평가				
연구책임자 및 부서명	정 종 태 (신형원자로개발단, 종합안전평가부)				
연구자 및 부서명	김 태 운 (신형원자로개발단, 종합안전평가부) 하 재 주 (신형원자로개발단, 종합안전평가부)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2004
페이지	43 p.	도표	있음( 0 ), 없음( )	크기	210x297 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개( 0 ), 대외비( ), 급비밀		보고서종류	기술보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)					
<p>경수로형인 1,000MWe 한국형 표준원전과 중수로형인 600MWe CANDU 원자력 발전소의 가상 중대사고시 대기 중으로 방출되는 방사성 물질로 인한 인체 건강영향에 미치는 리스크를 평가하고 비교하였다. 시범 분석 대상 원전으로는 확률론적 안전성 평가가 수행된 울진 3,4호기와 월성 1호기를 선정하였다. 두 발전소의 방사선원항 방출량은 2단계 PSA의 결과로 주어지는 방사선원 방출군별 방출 분율과 핵분열 생성물의 노심 재고량을 이용하였다. 부지 반경 80km까지의 인구분포 자료는 최종안전성분석보고서에서 제공된 자료를 이용하였으며 부지의 기상자료는 발전소 기상탑에서 측정된 2002년도 1년간의 기상자료를 이용하였다. 평가 도구로는 미국 원자력규제위원회에서 개발된 MACCS2라는 컴퓨터 프로그램을 이용하였다. 주변 주민의 건강에 미치는 영향의 척도로는 조기사망율과 암사망율 리스크 척도로서 선정하였으며 평가 결과는 사고 발생빈도를 고려한 리스크를 CCDF 곡선(발생빈도 대 사망률을 복합적으로 표시한 곡선)으로 나타내었다. 평가 결과에 의하면 경수로형 원전에 비해 중수로형 원전이 10배 이상의 인구분포에도 불구하고 리스크가 적게 나타나는데 이는 중수로형 원전이 경수로형 원전에 비해 가상 중대사고로 인하여 대기 중으로 방출되는 방사성 물질의 양이 10배 이상 적기 때문이다. 국내 원전을 대상으로 분석한 중대사고 리스크는 미국과 스위스에서 수행된 결과와 비슷함을 알 수 있었으며 스위스에서 분석한 타 발전원의 리스크보다는 100배 이상 낮은 것으로 분석되었다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)	리스크, 중대사고, 가압경수형 원자로, 가압중수형 원자로, 건강영향				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/TR-2730/2004					
Title / Subtitle		An Assessment of Hypothetical Severe Accident Risks for PWR and PHWR Plants in Korea			
Project Manager and Department		Jongtae Jeong (Integrated Safety Assessment Division)			
Researcher and Department		Tae Woon Kim (Integrated Safety Assessment Division) Jaejoo Ha (Integrated Safety Assessment Division)			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2004. 3
Page	43 p.	Ill. & Tab.	Yes(0), No ( )	Size	210x297 Cm.
Note					
Classified	Open( 0 ), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 Lines)					
<p>The risks resulting from hypothetical severe accidents of 1,000MWe KSNP(Korea Standard Nuclear Plant) and typical 600MWe CANDU(CANada Deuterium Uranium) plants were estimated and compared. The population distribution of the site extending to 80km for both site were considered. The release fraction for various source term categories(STC) and core inventories were used in the estimation of the risks by using the MACCS2(MELCOR Accident Consequence Code System) code. Individuals are assumed to be evacuated beyond 16km from the site. The health effects considered in this comparison study are early and cancer fatality risk, and the results are presented as CCDF(Complementary Cumulative Distribution Function) curves considering the occurrence probability of each STC's. According to the results, the early and cancer fatality risks of PHWR plants are lower than those of KSNP plants. This is attributed to the fact that the amount of radioactive materials that released to the atmosphere resulting from the postulated severe accidents of PHWR plants are smaller than that of KSNP plants. And, the dominating initiating event of STC that shows maximum early and cancer fatality risk is SGTR(Steam Generator Tube Rupture) for both plants. Therefore, the appropriate actions must be taken to reduce the occurrence probability and the amounts of radioactive materials released to the environment in order to protect the public from released radiation for both KSNP and PHWR plants.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Risk, Severe Accident, KSNP, PHWR, Health Effects			