creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

**저작자표시**. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

**비영리**. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

**변경금지**. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000242008

2011년 8월
석사학위논문

# 원자력발전소 이동형 불활성기체 제거장치의 개발 및 경제성 평가에 관한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 동 우

# 원자력발전소 이동형 불활성기체 제거장치의 개발 및 경제성 평가에 관한 연구

A Study on the Performance Examination and Economical Evaluation of Portable Noble Gas Removal System in Nuclear Power Plant

2011년 8월 일

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 동 우

# 원자력발전소 이동형 불활성기체 제거장치의 개발 및 경제성 평가에 관한 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 8월

조 선 대 학 교 대 학 원

원 자 력 공 학 과

이 동 우

# 이동우의 석사학위논문을 인준함

위원장　조선대학교　교수　김 진 원　(인)

위　원　조선대학교　교수　송 종 순　(인)

위　원　조선대학교　교수　이 경 진　(인)

2011년　8월

조 선 대 학 교　대 학 원

# 목 차

표 목차 ····· ii
그림 목차 ····· iii
ABSTRACT ····· iv

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 불활성기체의 특성 및 제거장치의 개발 ····· 3
제 1 절 이동형 불활성기체 제거장치 개발 배경 ····· 3
1. RCS 정화 및 탈기 방법 ····· 3
2. 저체적 배출팬 운전 방법 및 방출 기준치 ····· 5
3. 격납건물 내 공기오염도 관리 ····· 7
4. 계획예방정비 수행 시 예상 문제점 ····· 9
제 2 절 불활성 기체 제거 원리 ····· 11
1. 불활성기체 특성 ····· 11
2. 기체 방사성 폐기물 처리 계통 ····· 16
3. 이동형 불활성기체 제거 장치 ····· 22
제 3 절 이동형 불활성기체 제거 장치의 구성 및 운전 방법 ····· 28
1. 구성 ····· 28
2. 운전 방법 ····· 31

제 3 장 장치 성능 및 경제성 평가 ····· 34
제 1 절 장치 성능 시험 ····· 34
1. 성능 시험 ····· 34
2. 공정별 실증 시험 ····· 35
제 2 절 경제성 평가 ····· 37

제 4 장 결론 ····· 39

참고문헌 ····· 40

# 표 목 차


표 2.1.1 4호기 10주기 및 11주기 원자로냉각재 방사능 준위 현황 ····· 3
표 2.1.2 Low Vol Purge 계통 제염계수 표 ····· 5
표 2.1.3 주요핵종에 대한 일반인의 DACpa ····· 7
표 2.1.4 원자로 냉각재 계통 개방 전 방사능 조건 ····· 8
표 2.1.5 보호 마스크 착용 조건 ····· 9
표 2.2.1 Radioactivity and distribution of each element in spent PWR fuels ·· 12
표 2.2.2 Physical properties of krypton and xenon ····· 13
표 2.2.3 The krypton's isotopes ····· 14
표 2.2.4 The xenon's isotopes ····· 15
표 2.2.5 Long-lived radioactive inert gas products ····· 16
표 2.2.6 GRS 설계 가정사항 ····· 19
표 2.2.7 방사성 기체의 주요 발생원별 연간 발생량 및 유량 ····· 19
표 2.2.8 정상운전 중 GRS로 유입되는 예상 비방사능 ····· 20
표 3.1.1 The 1st Performance Examination ····· 34
표 3.1.2 The 2nd Performance Examination ····· 35
표 3.1.3 The Actual Examination ····· 35
표 3.2.1 이동형 불활성기체 제거 장치 경제성 분석 ····· 37

# 그림 목차


그림 2.1.1 핵분열 생성물 생성 분율 ····· 4
그림 2.1.2 Low Vol Purge 계통 개략도 ····· 6
그림 2.1.3 진공펌프에 의한 RCS Degassing 배출 유로 ····· 8
그림 2.2.1 기체 방사성 폐기물 처리 계통 개략도 ····· 17
그림 2.2.2 Adsorption isotherms of noble gases on H-mordenite and activated charcoal · 27
그림 2.3.1 이동형 불활성기체 제거 장치의 전체 개략도 ····· 28
그림 2.3.2 이동형 불활성기체 제거 장치 운전 개략도 ····· 31
그림 3.1.1 가압기 Man-way 개방 시 방사능 추이도 ····· 36
그림 3.3.1 증기발생기 Man-way 개방 및 ECT Air Blower 기동 시 방사능 추이도 ···· 36

# ABSTRACT

## A Study on the Performance Examination and Economical Evaluation of Portable Noble Gas Removal System in Nuclear Power Plant

Lee, Dong Woo
Adviser : Prof. Song, Jong Soon
Department of Nuclear Engineering
Graduate School of Chosun University

The necessity of nuclear power has been increased owing to growing increase in energy demand, resource supply insecurity and global warming. Although nuclear power is both economical and clean, some people still feel uneasy about radiation exposure and release of radioactive material. So the radiation exposure and release of radioactive material should be reasonably minimized.

Fission products occurring as a byproduct of the fission process are mostly radioactive. Fission products are kept in fuel rod and not released. But if fuel rod is defected, fission product are released to reactor coolant and it becomes highly radioactive. Gaseous radioactive isotopes have a majority of radiation exposure to workers.

Younggwang #4 fuel rod defects in 11th cycle make the concentration of radioactive gas of reactor coolant about 18 times higher than 10th cycle. The radioactivity level of reactor coolant should be decreased for dose reduction and prevention of transient. Gas stripping of reactor coolant was performed at normal operation. But it couldn't prevent the spread of an noble gas on opening reactor coolant system in overhaul. So approximately 20% increase in dose and 6 day

delay in 11th overhaul than the 10th are predicted.

To solve this problem, development of portable noble gas removal system was considered. However noble gas is difficult to remove because of its physical/chemical stability. To increase noble gas absorption rate low temperature adsorption principle was used. So the equipment could be made in small size and handle more capacity within a short time. Using this equipment, when opening the reactor coolant system a release of noble gas could be prevented effectively. In addition, the work environment in containment could be managed at the same level as no fuel defected.

In this study, performance examination and economical evaluation of portable noble gas removal system was performed.

# 제 1 장 서 론

지속적인 에너지 수요 증가와 자원 수급 불안, 지구 온난화로 인한 친환경 에너지원 필요에 따라 원자력의 효용성이 날이 갈수록 증가하고 있다. 하지만 원자력의 경제성과 친환경성에도 불구하고 방사능 누출 및 피폭에 대한 막연한 두려움 등으로 인해 원자력은 여전히 어두운 이미지를 가지고 있다. 게다가 후쿠시마 원전 사고로 인하여 원자력 발전의 안전성과 방사능 누출에 관한 국민의 관심은 최고조에 이르고 있다. 따라서 이산화탄소를 배출하지 않는 친환경 이미지와 안전성을 부각시키기 위해 방사성 물질의 방출 및 피폭을 최소화할 필요가 있다.

원자력 에너지는 우라늄이 중성자와 반응하여 핵분열되는 과정에서 발생된다. 핵분열 과정의 부산물로 생기는 핵분열생성물(Fission Product)은 대부분 방사성이며 기체, 액체, 고체 상태로 핵연료봉 안에 안전하게 존재하여 외부로 누출되지 않는다. 그러나 핵연료봉에 손상이 있을 경우 핵분열생성물은 원자로냉각재로 누출되고 원자로냉각재는 높은 방사능을 띄게 된다. 원자력 발전소 운영 시 필수적으로 발생되는 주요 방사선원(Source Term)으로 기체방사선원이 있으며, 기체방사선원은 1차계통 종사자의 방사선 피폭량에 상당부분(약 60 %정도) 영향을 미치고 있다.

기체 핵분열생성물 중 생성량이 많은 것으로는 대표적으로 I, Xe, Kr 등을 들 수 있다. 이 중 Iodine은 갑상선에 흡착되기가 쉬우므로 원전에서는 주로 Iodine의 관리에 관심을 가져왔다. 다행히 Iodine은 활성탄에 잘 흡착되기 때문에 제거가 어렵지 않고 격납건물 저체적배출팬이나 이동형 옥소, 미립자 제거장치로 제거가 가능하다. 하지만 Xe과 Kr의 경우 불활성으로 제거하기가 힘들다. 불활성기체는 사용후연료 재처리공장에서 많이 발생되지만, 원전에서는 발생량이 적으므로 유량을 조절하며 외부로 배기시킨다.

영광 4호기 11주기 운전 중 발생한 연료결함에 의해 원자로냉각재의 기체 방사능 농도가 이전 주기 대비 약 18배 가량 증가하였다. 종사자 피폭 저감과 과도상태 예방을 위하여 원자로냉각재의 방사능 준위를 낮출 필요가 있다. 원자로냉각재 정화 운전 및 탈기 운전을 수행하였으나 기존 설비로는 불활성기체를 충분히 제거할 수 없어 11차 계획예방정비(Overhaul) 기간 동안 10차 계획예방정비 대비 약 20%의 종사자 피폭 증가와 약 6일 간의 공정지연이 예상되었다.

이 문제의 해결책으로 이동형 불활성기체 제거장치 도입이 고려되었다. 그러나 불

활성기체는 물리/화학적으로 안정한 상태이므로 다른 물질과 잘 반응하지 않아 제거가 어렵다. 이에 불활성기체 흡착률을 높이기 위해 저온 흡착 원리를 이용하여 많은 용량을 짧은 시간 내에 처리할 수 있으며, 소형으로 제작가능한 이동형 불활성기체 제거 장치를 개발하였다. 이 장치를 이용하여 원자로냉각재계통의 주요 설비 개방 시 불활성기체를 효과적으로 제거할 수 있었으며, 격납건물 내 작업환경을 연료결함이 없었을 때와 같은 수준으로 관리할 수 있었다.

본 연구에서는 이동형 불활성기체 제거장치의 성능 시험과 실증 시험을 통하여 장치의 경제성을 평가하고자 한다.

# 제 2 장 불활성기체의 특성 및 제거장치의 개발

## 제 1 절 이동형 불활성기체 제거장치 개발 배경

핵분열 과정에서 생성된 핵분열생성물은 높은 방사능을 갖고 있으며, 정상운전 중 핵연료 및 핵연료봉 안에 안전하게 존재하여 외부로 누출되지 않는다. 그러나 핵연료봉에 손상이 있을 경우 핵분열생성물은 핵연료봉에서 원자로냉각재로 누출되고 원자로냉각재는 높은 방사능을 띄게 된다. 따라서 원자로냉각재의 Xe 농도 등은 연료 손상을 파악하는 기준으로도 사용된다.

영광 4호기 11주기 운전 시 원자로냉각재 계통의 방사능 준위가 이전 주기 대비 크게 올라가며 연료손상 징후가 보였다. 또한 제논 방사능 준위가 전 주기 대비 약 500배 이상 높은 상태로 유지되었다. 연료 손상이 확실시 되었으며 종사자 피폭 저감과 발전소 과도상태 예방을 위해 원자로냉각재의 방사능 준위를 낮추기 위한 조치가 필요했다.

( 단위: μCi/g )

| 구 분 | Xe-133 | | 기체방사능 | |
|---|---|---|---|---|
| | 평균 | 최대 | 평균 | 최대 |
| 10주기 | 7.43E-04 | 1.50E-03 | 2.55E-02 | 4.79E-02 |
| 11주기 | 3.80E-01 | 9.22E-01 | 4.62E-01 | 8.25E-01 |
| 비 고 | 약 500배 증가 | | 약 18배 증가 | |

표 2.1.1 4호기 10주기 및 11주기 원자로냉각재 방사능 준위 현황

### 1. RCS 정화 및 탈기 방법

종사자의 피폭 저감 및 과도상태 방지 등을 위하여 원자로냉각재의 방사능 준위를 낮추기 위한 조치가 필요하다. 원자로냉각재는 화학 및 체적제어계통에서 정화되고, 효율적인 정화를 위하여 유출 유량을 최대로 한다. 핵분열 생성물은 그 핵종에 따라 기체, 고체, 액체 상태로 존재한다. 고체 및 액체 상태의 방사성 물질은 정화필터 및

탈염기에서 제거된다. 또한 기체 상태의 방사성 물질은 원자로냉각재와 같이 이동하여 원자로 용기 상부, 증기발생기 U-tube 상부, 가압기 기상부 등에 존재하거나 일부는 원자로냉각재에 용해된 상태로 존재한다. 그림 2.1.1을 보면 불활성기체인 Kr과 Xe의 생성 분율이 매우 높은 편임을 알 수 있다.

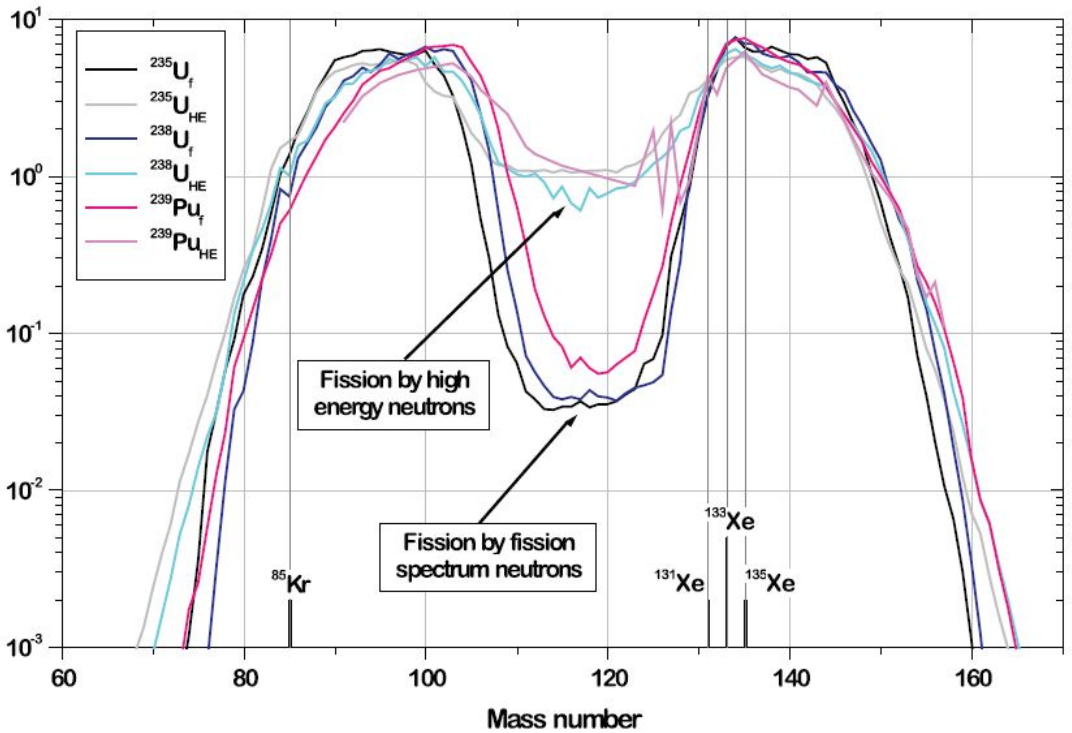


그림 2.1.1 핵분열 생성물 생성 분율

정상운전 시 Iodine과 같은 기체 방사성 물질은 탈염기에서 제거된다. 또한 필요 시 가스탈기기(Gas Stripper)를 운전하여 원자로냉각재 내의 가스를 제거할 수 있다. 가스탈기기는 높은 온도에서 기체의 용해도가 낮아지는 원리를 이용한다. 원자로냉각재 유출수를 가열하여 원자로냉각재 내의 불활성기체 및 휘발성 입자 등을 제거한다. 제거된 기체 방사성 물질은 기체 방사성 폐기물 처리계통으로 보내지고, 필터 또는 활성탄보호탑에서 흡착되거나 활성탄지연탑에서 흡/탈착을 반복하며 이동이 지연된다. 이동이 지연되는 동안 자연붕괴 및 흡착에 의하여 정화된다.

계획예방정비 기간 동안에는 연료 교체를 위하여 원자로 헤드를 개방해야 하고, 사

전에 원자로냉각재의 온도와 압력을 감소시킨다. 원자로냉각재계통이 감압됨에 따라 핵연료봉 내부에서 원자로냉각재로 방사성 물질이 추가 누출된다. 원자로냉각재계통 내의 기체 방사성 물질을 최대한 제거하기 위해 원자로정지 2일 전부터 가압기 Steam Space Sample Line을 체적제어탱크(VCT)로 연결하여 가압기 기상부의 기체 방사성물질을 탈기하기 시작한다. 체적제어탱크(VCT)가 $N_2$로 치환 완료된 시점부터 VCT 기상부 기체를 GRS로 연속 배기하여 불활성기체 및 휘발성 입자 등을 최대한 제거한다. 또한 가압기 수위를 높이고 낮추는 과정을 반복하여 가압기 기상부 기체를 GRS로 배기한다.

## 2. 저체적 배출팬 운전 방법 및 방출 기준치

격납건물 Purge 계통은 발전소 정상 출력운전 또는 고온정지 중 격납건물 압력제어 필요 시 운전하거나 격납건물 안으로 인원 출입 시 사용된다. 출입자가 적정의 개인 보호장구를 착용하고 안전하게 격납건물 내로 출입할 수 있도록 격납건물 내의 공기 오염도 관리를 위해 운전되며 격납건물 내 방사성 가스/입자를 제거한다.

저체적배출팬은 고효율입자필터(HEPA Filter)와 활성탄 필터(Activated Carbon Filter)를 이용하여 입자 및 Iodine과 같은 방사성 물질을 효율적으로 제거하고 재순환하거나 격납건물 외부로 배출한다. 그러나 Xenon과 Krypton과 같은 불활성기체는 활성탄과 잘 반응하지 않아 저체적배출팬으로는 제거하기가 어렵다.

저체적 배출팬을 이용하여 격납용기 내 공기를 정화할 때 미립자는 HEPA Filte에서 99.0%가 제거되고, Iodine은 활성탄필터에서 99.0%가 제거된다. 그러나 불활성기체와 삼중수소는 제거할 수 없다. 따라서 많은 양의 불활성기체가 저체적배출팬으로 유입되면 후단 방사선 감시기가 동작하여 저체적 배출팬은 자동으로 정지된다.

| 구 분 | 필터효율(%) | 제거 계수 | 비 고 |
|---|---|---|---|
| 미립자 | 99.0 | 0.01 | [격납용기내 방사능농도 x 제거계수 ≤ LLD] 이면 해당핵종의 배출 방사능농도를 “0”으로 처리한다. |
| 옥 소 | 99.0 | 0.01 | |
| 불활성기체 | 0.0 | 1 | |
| 삼중수소 | 0.0 | 1 | |

표 2.1.2 Low Vol Purge 계통 제염계수 표

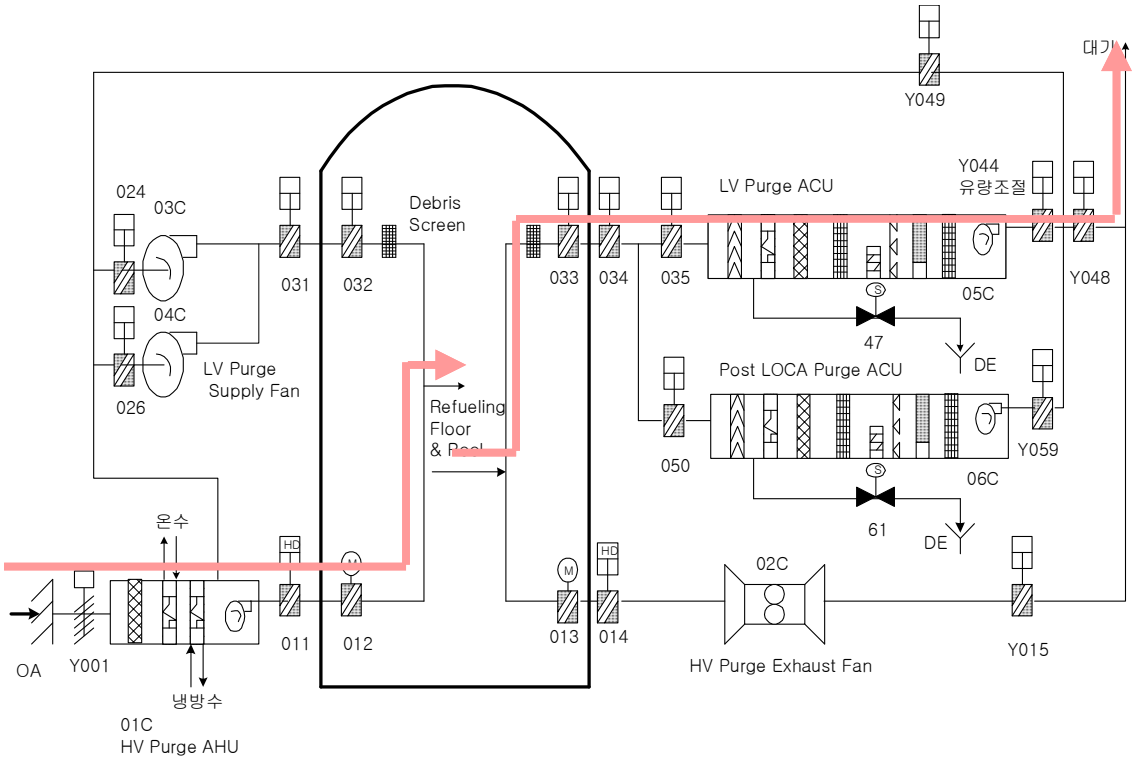


그림 2.1.2 Low Vol Purge 계통 개략도

배출제한 계수는 격납용기 기체방사성물질의 배출 가능여부 판정과 배출 팬의 종류를 결정하기 위해 사용되는 계수로서 일반인의 배기중의 배출관리기준에 대한 부지경계선에서의 배출 방사능농도의 비를 말하며, ALARA를 적용하여 배출제한 계수가 0.1 이하일때 기체방사성폐기물의 배출을 허용함을 원칙으로 하나, 부득이한 경우 1.0 이하까지는 배출을 허용할 수 있다.

배출제한 계수 계산식은 다음과 같다.

$$\text{배출제한계수} = \sum_i \frac{Ca_i \times D_i}{DA\,Cpa_i} \leq 0.1 \text{ (부득이한 경우는 1)} \quad \text{.....(1)}$$

Ca = 격납용기내 기체의 핵종별 방사능농도(Bq/㎥)

D = 기체방사성폐기물의 방사능농도 희석인자

DACpa = 일반인에 대한 핵종별 배기중의 배출관리기준(Bq/㎥)

| 입 자 | | 옥 소 | | 불활성 기체 | | 삼중수소 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 핵종명 | DACpa (Bq/㎥) | 핵종명 | DACpa (Bq/㎥) | 핵종명 | DACpa (Bq/㎥) | 핵종명 | DACpa (Bq/㎥) |
| Mn-54 | 5E+01 | I-131 | 3E+00 | Ar-41 | 5E+02 | H-3 | 2E+03 |
| Co-58 | 3E+01 | I-132 | 2E+02 | Kr-85 | 1E+05 | - | - |
| Fe-59 | 2E+01 | I-133 | 2E+01 | Kr-85m | 5E+03 | - | - |
| Co-60 | 2E+00 | - | - | Kr-87 | 8E+02 | - | - |
| Zn-65 | 2E+01 | - | - | Kr-88 | 3E+02 | - | - |
| Mo-99 | 7E+01 | - | - | Xe-131m | 9E+04 | - | - |
| Cs-134 | 1E+01 | - | - | Xe-133 | 2E+04 | - | - |
| Cs-137 | 1E+01 | - | - | Xe-133m | 2E+04 | - | - |
| Ce-141 | 2E+01 | - | - | Xe-135 | 3E+03 | - | - |
| Ce-144 | 1E+00 | - | - | - | - | - | - |

표 2.1.3 주요핵종에 대한 일반인의 DACpa

## 3. 격납건물 내 공기오염도 관리

연료의 결함 등으로 인해 원자로냉각재 계통 내의 방사성 기체가 증가된 상태에서 가압기와 증기발생기 Man-way나 원자로 헤드를 개방할 때 원자로냉각재 계통 내의 기체 방사성물질이 격납건물 대기로 급격히 확산되어 격납건물 공기 오염도가 증가할 수 있다. 격납건물 내의 방사선작업종사자의 체내/체외피폭과 일시적인 작업 중지를 방지하기 위하여 격납건물 대기 방사능 농도를 낮추고 공기 중 오염도를 지속적으로 관리해야 한다.

원자로냉각재 계통 개방 시 격납건물로 방출되는 기체 방사성 물질의 영향을 최소화하기 위해 계통 개방 지점의 공기를 주름관 또는 Air Blower를 이용하여 저체적 배출팬 쪽으로 흡입될 수 있도록 한다. 계통 개방 후 격납건물 내로의 방사성 기체의 확산은 저체적 배출팬으로 인하여 최소화된다. 주름관이 설치되는 장소는 S/G Man-way, PZR Man-way, Reactor Head 주변이다. 그림 2.1.3에서 가압기 Man-way를 통한 정화유로를 개략적으로 확인할 수 있다.

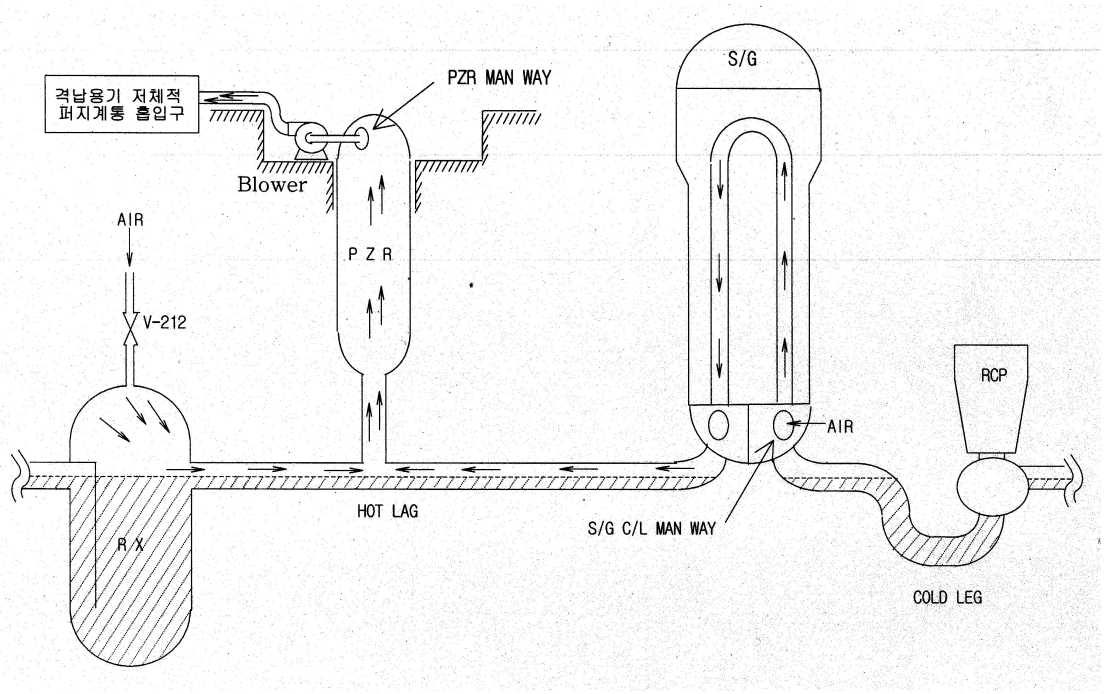


그림 2.1.3 진공펌프에 의한 RCS Degassing 배출 유로

| 항 목 | 조건 |
|---|---|
| I-131 방사능 농도 | 0.01 $\mu$Ci/g 이하 |
| Xe-133 방사능 농도 | 0.5 $\mu$Ci/g 이하 |
| Co-58, Co-60, Sb-122, Sb-124, Cs-134, Cs-137,<br>Mn-54, Cr-51의 방사능 농도의 합 | 0.05 $\mu$Ci/g 이하 |

표 2.1.4 원자로 냉각재 계통 개방 전 방사능 조건

방사선구역 작업 종사자는 공기오염지역의 방사성 핵종 및 농도에 따라 호흡 방호 장비를 착용해야 한다. 각 장비 사용기준은 다음과 같다.

| 마스크 종류 | 오염의 종류 | 오염의 농도 |
|---|---|---|
| 반면 마스크 | 입자 | 1 DAC 이상<br>10 DAC 이하 |
| 전면 마스크 | 입자, 증기성 옥소 | 10 DAC 초과<br>50 DAC 이하 |
| 연속 공기공급 마스크 | 입자, 증기성 옥소,<br>불활성 기체 | 50 DAC 초과<br>2,000 DAC 이하 |
| 휴대용 공기공급 마스크 | 입자, 증기성 옥소,<br>불활성 기체 | 2,000 DAC 초과<br>10,000 DAC 이하 |

표 2.1.5 보호 마스크 착용 조건

## 4. 계획예방정비 수행 시 예상 문제점

영광 4호기 11주기 운전 중 발생한 연료결함에 의해 원자로냉각재의 기체 방사능 농도가 이전 주기 대비 약 18배 가량 증가하였다. 원자로냉각재의 방사능 준위를 낮추기 위하여 정화 운전 및 탈기 운전을 수행하였으나 기존 설비로는 원자로냉각재 계통 개방에 따라 확산되는 불활성기체를 충분히 제거할 수 없었다. 따라서 11차 계획예방정비 때는 10차 대비 약 20%의 종사자 피폭 증가와 작업효율 저하로 인한 약 6일 간의 공정지연이 예상되었다.

저체적배출팬으로는 불활성기체를 제거할 수 없으므로, 원자로냉각재 계통 내의 고준위의 방사성기체를 저체적 배출팬으로 직접 방출할 경우 배출제한치 이상에서 저체적배출팬 후단 방사선 감시기 RE-037이 동작하여 Purge 운전이 중단된다. 그 후 원자로냉각재 계통 내의 방사성 기체는 격납건물 내부로 확산되어 격납건물 공기오염도를 1 DAC 이상으로 유지하게 될 것이다.

격납건물 내의 공기오염도가 1 DAC 이상일 경우 종사자의 체내 피폭 저감을 위하여 공기 오염도 준위에 따라 해당하는 마스크를 착용한다. 반면 또는 전면 마스크 착용 시 종사자는 시야 확보 어려움, 의사 소통 어려움, 피로도 증가 등의 이유로 작업효율이 떨어진다. 이 작업효율 저하의 정도는 경험적으로 약 20% 정도로 고려된다. 따라서 마스크 착용 시 계획예방정비 기간은 예상 기간에서 약 20% 증가할 것으로 예상되었고 약 6일의 계획예방정비 공정지연이 예상되었다. 또한 격납건물 공기오염도가 1 DAC 이상에서는 격납건물 기기 출입구(Equipment Hatch)를 개방할 수 없으므로 장비 반입 등이 지연될 수 있다.

따라서 격납건물 내부의 공기오염도 관리 및 저체적배출팬의 불활성기체 방출제한치를 지키기 위하여 저체적배출팬의 유량을 제한치 이내로 유지하거나 불활성기체 제거를 위한 추가적인 장비가 필요하게 되었다.

# 제 2 절 불활성 기체 제거 원리

## 1. 불활성기체 특성

핵분열생성물 중 Kr, Xe 같은 불활성기체의 경우 핵연료 내에 고용되지 못한 상태로 핵연료 matrix 내에 분포하고 있으며, 연소도에 따라 핵분열기체가 증가하게 되면 핵분열파편의 이동 궤적 및 전위주위를 따라 발생된 결정 내부 기포와 결정립계에 분포한 기포를 만들게 되고, 이어서 핵연료에서 방출되어 핵연료와 피복관 사이 및 plenum에 존재하게 된다. 방출량은 온도에 매우 민감하여 고온일수록 많이 방출되며 연소도가 증가할 수록, 그리고 초기 기공도가 낮을 수록 핵분열기체의 방출량이 증가하게 된다.

우라늄 원소가 중성자를 받아 핵분열을 함으로 생성되는 Kr, Xe 등과 같은 불활성기체는 전체 생성되는 기체의 약 10% 정도를 차지하며, 그 중에서 Xe의 양이 90% 정도인 것으로 알려져 있다. 대부분의 Kr과 Xe의 동위원소는 안정적이거나 안정한 종으로 빠르게 붕괴된다. 가장 긴 장수명 방사성 핵종은 Kr-85로 반감기가 10.7년이며, Xe-133의 반감기는 5.3일이다. 조사된 U-235 연료에 대한 불활성기체인 Kr과 Xe의 물리적인 특성을 표 2.2.2에 나타내었고, 각각의 동위원소를 표 2.2.3과 표 2.2.4에 나타내었다.

핵분열 시 생성되는 불활성기체인 Kr의 동위원소로는 Kr-82, 83, 84, 85 및 86 등이며, Xe의 경우 Xe-128, 130, 131, 131m, 132, 133, 134 및 136 등이 존재한다. 이들 대부분의 동위원소는 반감기가 매우 짧아 곧 안정한 원소가 되고 비교적 장반감기를 갖는 핵종으로는 Kr-85, Xe-131m, Xe-133이며, 이들의 발생량은 표 2.2.5에 나타내었다.

| | 34,770 MWD/MTU | | 44,000 MWD/MTU | | Half-life |
|---|---|---|---|---|---|
| | Radioactivity Ci | Radioactivity % | Radioactivity Ci | Radioactivity % | |
| H | 3.52E-01 | 0.11 | 4.28E-01 | 0.11 | H-3 : 12.32 yr |
| Co | 2.57E-02 | 0.01 | 3.23E-02 | 0.01 | Co-60 : 5.27 yr |
| Kr | 3.60E+00 | 1.14 | 4.45E+00 | 1.13 | Kr-85 : 10.76 yr |
| Sr | 4.86E+01 | 15.36 | 5.97E+01 | 15.21 | Sr-90 : 28.0 yr |
| Y | 4.86E+01 | 15.37 | 5.97E+01 | 15.21 | Y-90 : 64.5 hr |
| Ru | 5.69E-02 | 0.02 | 7.88E-02 | 0.02 | Ru-106 : 1.0 yr |
| Rh | 5.69E-02 | 0.02 | 7.89E-02 | 0.02 | Rh-106 : 30 sec |
| Cd | 2.73E-02 | 0.01 | 3.86E-02 | 0.01 | Cd-109 : 453 d<br>Cd-113m : 9E+15 yr |
| Sb | 4.64E-01 | 0.15 | 6.06E-01 | 0.15 | Sb-125 : 2.6 yr |
| Te | 1.13E-01 | 0.04 | 1.48E-01 | 0.04 | Te-125m : 57.40 d |
| Cs | 7.23E+01 | 22.84 | 9.22E+01 | 23.50 | Cs-134 : 2.1 yr<br>Cs-137 : 30 yr |
| Ba | 6.67E+01 | 21.06 | 8.45E+01 | 21.51 | Ba-137m : 2.6 min |
| Pm | 3.51E+00 | 1.11 | 3.62E+00 | 0.92 | Pm-147 : 2.65 yr |
| Sm | 3.01E+01 | 0.09 | 3.45E-01 | 0.09 | Sm-151 : 90 yr |
| Eu | 4.00E+00 | 1.26 | 6.01E+00 | 1.53 | Eu-154 : 8.6 yr<br>Eu-155 : 4.9 yr |
| Np | 1.88E-02 | 0.01 | 3.33E-02 | 0.01 | Np-239 : 2.35 d |
| Pu | 6.44E+01 | 20.34 | 7.49E+01 | 19.07 | Pu-239 : 2.4E+4 yr<br>Pu-240 : 6.6E+3 yr |
| Am | 1.95E+00 | 0.62 | 2.20E+00 | 0.56 | Am-241 : 458 yr |
| Cm | 1.46E+00 | 0.46 | 3.52E+00 | 0.90 | Cm-242 : 163 d |
| Total | 3.17E+02 | 100.00 | 3.93E+02 | 100.00 | |

표 2.2.1 Radioactivity and distribution of each element in spent PWR fuels

| Property | Unit | Kr | Xe |
|---|---|---|---|
| Critical temperature at 760 torr | ℃ | -63.75 | 16.59 |
| Critical pressure | atm | 56.0 | 60.2 |
| Boiling point | ℃ | -153.40 | -108.12 |
| melting point | ℃ | -156 | -112 |
| Density at boiling point | kg/L | 1.5465 | 1.9959 |
| Density at STP | kg/m3 | 3.744 | 5.896 |
| Heat of vaporization | kcal/kg | 25.8 | 23.7 |
| | kcal/m3 | 96.59 | 139.74 |
| Heat conductivity | W/cm K | 95.1 | 55.5 |
| Amounts in air | vpm | 1 | 0.08 |
| Ratio in air | - | 12.5 | 1 |
| Ration in fission product gas | - | 1 | 10 |

표 2.2.2 Physical properties of krypton and xenon

| Element of Isotope | Natural Abundance(%) | Atomic Mass or Weight | Half-life | Decay mode/Energy(/MeV) |
|---|---|---|---|---|
| 36Kr | - | 83.80 | | |
| Kr-71 | - | 70.9505 | 0.10 s | β+, EC/10.5 |
| Kr-72 | - | 71.9419 | 17.0 s | β+/5.0 EC/ |
| Kr-73 | - | 72.9389 | 27.0 s | β+/6.7 EC/ |
| Kr-74 | - | 73.9333 | 11.5 m | β+/3.1 EC/ |
| Kr-75 | - | 74.93104 | 4.3 m | β+/4.90 EC/ |
| Kr-76 | - | 75.92595 | 14.8 h | β+/1.31 |
| Kr-77 | - | 76.92467 | 1.24 h | β+/80/3.06 EC/20/ |
| Kr-78 | 0.35(2) | 77.92039 | - | |
| Kr-79m | - | - | 53.0 s | I.T./0.1299 |
| Kr-79 | - | 78.920083 | 1.455 d | β+/7/1.626 EC/93/ |
| Kr-80 | 2.25(2) | 79.916379 | - | |
| Kr-81m | - | - | 13.1 s | I.T./0.1904 |
| Kr-81 | - | 80.916593 | 2.1×105 y | EC/0.2807 |
| Kr-82 | 11.6(1) | 81.913485 | - | |
| Kr-83m | - | - | 1.86 h | I.T./0.0419 |
| Kr-83 | 11.5(1) | 82.914137 | - | |
| Kr-84 | 57.0(3) | 83.911508 | - | |
| Kr-85m | - | | 4.48 h | β-/79/I.T./21/0.305 |
| Kr-85 | - | 84.912530 | 10.73 y | β-/0.687 |
| Kr-86 | 17.3(2) | 85.910615 | - | |
| Kr-87 | - | 86.913359 | 1.27 h | β-/3.887 |
| Kr-88 | - | 87.91445 | 2.84 h | β-/2.91 |
| Kr-89 | - | 88.91764 | 3.15 m | β-/4.99 |
| Kr-90 | - | 89.91953 | 32.3 s | β-/4.39 |
| Kr-91 | - | 90.9234 | 8.6 s | β-/6.4 |
| Kr-92 | - | 91.92611 | 1.84 s | β-/5.99 n/ |
| Kr-93 | - | 92.9312 | 1.29 s | β-/8.6 n/ |
| Kr-94 | - | 93.9343 | 0.21 s | β-/7.3 |
| Kr-95 | - | 94.9397 | 0.78 s | β-/9.7 |
| Kr-97 | - | - | < 0.1 s | β- |

1. isotope or element : for elements, the atomic number and chemical symbol are listed. For nuclides, the mass number and chemical symbol are listed. Isomers are indicated by the addition of m, m1, or m2.
2. Isotopic abundance : in atom percent
3. Atomic mass or weight : Atomic mass relative to 12C=12. Atomic weight is given on the same scale.
4. Half-life : Half-life in decimal notation. μs=microseconds; ms=mili-seconds; s=seconds, m=minutes; h=hours; d=days; and y=years.
5. Decay Mode/Energy : Decay modes are α=alpha particle emission ; β-=negative beta emission ; β+=positron emission ; EC=orbital electron capture ; IT=isomeric transition from upper to lower isomeric state; n=neutron emission ; SF=spontaneous fission. Total disintegration energy in MeV units.

표 2.2.3 The krypton's isotopes

| Element of Isotope | Natural Abundance (%) | Atomic Mass or Weight | Half-Life | Decay Mode/Energy(/MeV) |
|---|---|---|---|---|
| 54Xe | | 131.29 | | |
| Xe-110 | | 109.9445 | 0.2 s | β+/ 9.2 |
| Xe-111m | | | 0.9 s | EC, β+ |
| Xe-111 | | 110.9416 | 0.7 s | EC, β+/10.6 α/ |
| Xe-112 | | 111.9357 | 3.0 s | EC, β+/7.2 α/0.8/ |
| Xe-113 | | 112.9334 | 2.8 s | EC, β+/9.1 |
| Xe-114 | | 113.9281 | 10.0 s | β+, EC/5.9 |
| Xe-115 | | 114.9270 | 18.0 s | β+, EC/7.6 |
| Xe-116 | | 115.9214 | 56.0 s | β+, EC/4.3 |
| Xe-117 | | 116.9206 | 1.02 m | β+, EC/6.5 |
| Xe-118 | | 117.917 | 4.0 m | β+, EC/3.0 |
| Xe-119 | | 118.9156 | 5.8 m | β+, EC/5.0 |
| Xe-120 | | 119.91216 | 40.0 m | β+, EC/97/1.96, β+/3/ |
| Xe-121 | | 120.91138 | 39.0 m | β+/44/3.73 EC/56/ |
| Xe-122 | | 121.9086 | 20.1 h | EC/0.9 |
| Xe-123 | | 122.90848 | 2.00 h | β+/23/2.68 EC/77/ |
| Xe-124 | 0.10 | 123.905895 | | |
| Xe-125m | | | 57.0 s | I.T./0.252 |
| Xe-125 | | 124.906398 | 17.1 h | EC/1.653 |
| Xe-126 | 0.09 | 125.90427 | | |
| Xe-127m | | | 1.15 m | I.T./0.297 |
| Xe-127 | | 126.905179 | 36.4 d | EC/0.662 |
| Xe-128 | 1.91 | 127.903531 | | |
| Xe-129m | | | 8.89 d | I.T./0.236 |
| Xe-129 | 26.4 | 128.904780 | | |
| Xe-130 | 4.1 | 129.903509 | | |
| Xe-131m | | | 11.9 d | I.T./0.164 |
| Xe-131 | 21.2 | 130.905083 | | |
| Xe-132 | 26.9 | 131.904155 | | |
| Xe-133m | | | 2.19 d | I.T./0.233 |
| Xe-133 | | 132.905906 | 5.243 d | β-/0.427 |
| Xe-134 | 10.4 | 133.905395 | | |
| Xe-135m | | | 15.3 m | I.T./ |
| Xe-135 | | 134.90721 | 9.10 h | β-/1.15 |
| Xe-136 | 8.9 | 135.90722 | | |
| Xe-137 | | 136.91156 | 3.82 m | β-/4.17 |
| Xe-138 | | 137.91399 | 14.1 m | β-/2.77 |
| Xe-139 | | 138.91879 | 39.7 s | β-/5.06 |
| Xe-140 | | 139.9216 | 13.6 s | β-/4.1 |
| Xe-141 | | 140.9267 | 1.72 s | β-/6.2 |
| Xe-142 | | 141.9297 | 1.22 s | β-/5.0 |
| Xe-143m | | | 0.96 s | β- |
| Xe-143 | | 142.9352 | 0.30 s | β-/7.3 |
| Xe-144 | | 143.9385 | 1.2 s | β-/6.1 |
| Xe-145 | | | 0.9 s | β-, (n) |

표 2.2.4 The xenon's isotopes

| Radionuclide | Half-life | In discharge fuel 106 Ci/yr | | |
|---|---|---|---|---|
| | | At discharge | 150-day decay | 10-yr decay |
| 85Kr | 10.76 yr | 0.308 | 0.300 | 0.162 |
| total Kr | | 85.0 | 0.300 | 0.162 |
| 131mXe | 11.8 days | 0.174 | 8.50 × 10-5 | 0 |
| 133Xe | 5.27 days | 43.9 | 1.46 × 10-7 | 0 |
| total Xe | | 178 | 8.51 × 10-5 | 0 |

표 2.2.5 Long-lived radioactive inert gas products

## 2. 기체 방사성 폐기물 처리 계통

기체 방사성 폐기물 처리 계통(GRS : Gaseous Radwaste System)은 3·4호기 공용으로 운전된다. GRS는 외부와 격리된 계통설비(CVCS RDT / Gas Stripper / VCT / VCT Relief V/V)로부터 배출된 고준위 방사성 기체를 수집하여 활성탄 지연탱크(Charcoal Delay Bed)에서 충분히 지연(Decay)시킨 후 처리한다.

이 계통은 핵연료 결함이 없는 경상 운전 및 계획예방정비기간 동안 발생되는 불활성기체는 정상적으로 처리(정상 처리량 : 2.5 cfm)가 가능하다. 그러나 핵연료 결함이 발생될 경우에는 통상적으로 정상 운전 대비 약 100배 이상의 불활성기체가 발생되는 것으로 국내·외적으로 보고되고 있으며, 이와 같은 발생량을 처리하기 위해서는 별도의 대용량의 활성탄이 필요하다.

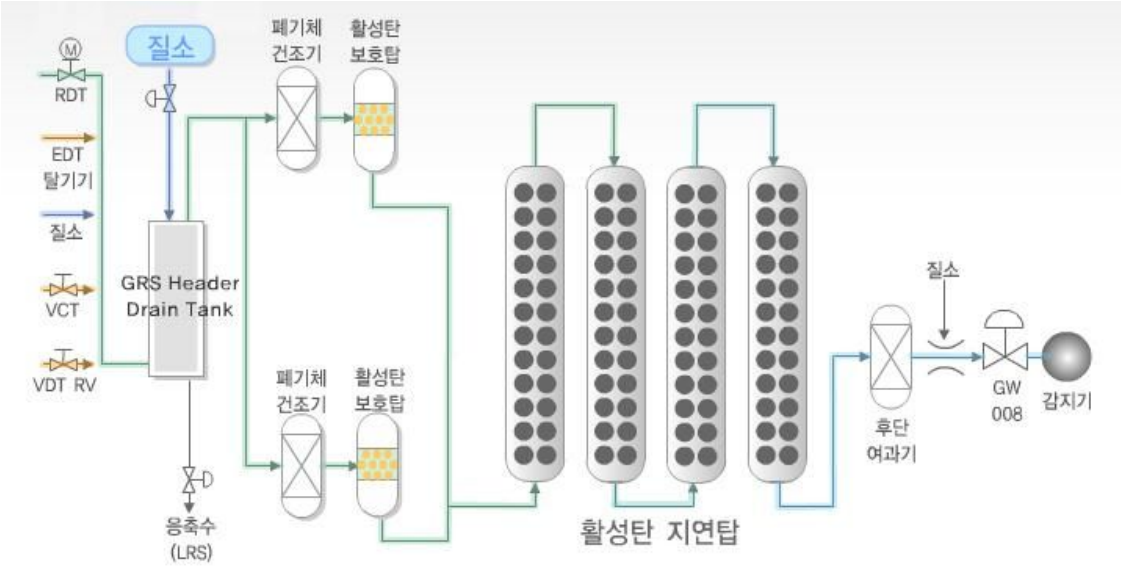


그림 2.2.1 기체 방사성 폐기물 처리 계통 개략도

## 가. 계통 설계기준

GRS는 방사성 또는 잠재적인 방사성 기체 폐기물을 수집한 후 처리한다. 대부분 수소와 질소로 구성되어 있는 이런 방사성 기체는 저압 및 상온에서 운전되는 활성탄 지연탱크(Charcoal Delay Bed)를 통과하면서 처리된다. GRS는 Xe에 대해서 45일 이상, Kr에 대해서는 2.6일 이상 지연시킬 수 있다.

활성탄 지연탱크에서 처리된 방사성 기체는 고효율입자(HEPA) 여과기 및 방사선 감시기를 거쳐 방사성폐기물 처리건물 냉각 및 환기계통 배기구로 방출된다. 방사성 물질 방출에 대한 관리 및 감시는 10 CFR 50, 부록A의 일반설계기준 60 및 64에 따른다.

- Criterion 60 : Control of Releases of Radioactive Material to the Environment
- Criterion 64 : Monitoring Radioactivity Releases

방사성 폐기체(Waste Gas)는 대기로 방출하기 전에 방사성폐기물 처리건물 배기 공기정화기(ACU)의 공통 배기구에서 희석된다. GRS는 외부공기의 계통 내 유입

(In-leakage)을 방지하기 위해 정압을 유지한다. 수소/산소 농도를 감시하여 폭발 가능한 기체 혼합물의 생성을 방지하기 위해 계통에 질소가스를 주입한다.

GRS는 방사성 기체 폐기물의 방출을 제한하여, 발전소 제한구역과 비제한구역에서 개인 피폭 및 방사능 방출에 관한 10 CFR 50, 부록 I의 'ALARA' 지침을 준수하도록 설계된다. 저준위 방사성 기체는 고효율입자(HEPA) 여과기를 거쳐 건물 배기구로 방출된다. 저준위 방사성 기체와 GRS의 방출기체가 동시에 방출될 때에도 제한구역과 비제한 구역에서 개인피폭 및 방사능 방출량은 10 CFR 50, 부록 I에 명시된 'ALARA' 지침을 만족한다.

발전소로부터 방출되는 기체 유출물의 방사성 물질로 인한 피폭 선량률은 다음과 같이 제한된다.

- 불활성 기체 : 전신 500 mrem/Yr 이하, 피부 3,000 mrem/Yr 이하
- I-131, I-133, 삼중 수소 및 반감기가 8일 이상인 모든 입자 방사성 핵종 : 특정 장기에 1,500 mrem/Yr 이하

## 나. 운전 설계기준

GRS의 설계용량은 표 2.2.6에 기술된 가정사항에 근거하여 결정된다. 정상 운전 중일 때는 2 scfm(0.057 ㎥/s)으로 유입되는 방사성 기체를 처리한다. 방사성 기체 폐기물의 발생원, 연간 발생량(Annual Volume) 그리고 발생원의 유량은 표 2.2.7에 정리되어 있으며, 탈기기(Gas Stripping)를 연속 운전하는 최대 설계운전을 고려한 값이다.

노심주기에서 짧은 기간(가장 제한적인 30일) 동안, GRS는 약 22 scfm(0.623 ㎥/s)의 유입유량을 처리할 수 있다. 이러한 불규칙적인 유입유량은 거의 1500 $ft^3$에 해당한다. 이 기간동안 운전되는 탈기기(Gas Stripping)의 연속유입유량은 포함하지 않는다. 화학 및 체적제어 계통(CVCS : Chemical and Volume Control System) 체적제어 탱크(VCT : Volume Control Tank)의 배기 또는 관련기기 고장일 때에는 최대 40 scfm (1.133 ㎥/s)의 방사성기체가 약 25분 동안 유입될 수 있으며, 이때 방사성 기체 건조기의 용량설계에는 위 최대유량을 고려하지지 않는다. 예상 방사능 유입량은 표 2.2.8과 같다.

GRS의 용량은 표 2.2.6과 같이 정상운전 중 발생하는 예상운전과도사건(AOO :

Anticipated Operational Occurrences)을 고려하였다. 처리되는 방사성기체의 방사능은 노심 주기 중 매우 제한적인 30일 주기 동안 발생되는 방사성기체의 양을 계산하여 결정한다. 위 30일 주기 동안, 가스탈기기의 연속운전을 고려했으며, 체적제어탱크(VCT)는 두 번 배기, 냉각재 배수탱크(RDT)는 연속 배기, RCS 탈기는 한번 발생된다. 예상운전과도사건들을 포함한 이러한 가정에서 GRS의 설계용량은 Xe에 대해 45일 이상, Kr에 대해 2.6 일 이상 지연시킬 수 있다.

| 항목 | 정상운전 또는 예상 방출량 | 설계 기준치 |
|---|---|---|
| CVCS 탈기 | 탈기기의 지속적인 운전<br>1) 유출유량 : 75 gpm(283 lpm)<br>2) 용존 기체의 비체적 : 30 ㎤/kg<br>3) 기체 방출률 : 0.3 scfm(8.5 lpm) | 탈기기의 지속적인 운전<br>1) 유출유량 : 75 gpm(283 lpm)<br>2) 용존 기체의 비체적 : 30 ㎤/kg<br>3) 기체 방출률 : 0.3 scfm(8.5 lpm) |
| RCS 탈기 | 연간 발전소 1회 탈기<br>1) 방출량 : 275 scf(7.78 ㎥) | 30일 동안 1회 탈기<br>1) 방출량 : 275 scf(7.78 ㎥) |
| VCT | 연간 1회 배기<br>1) 방출량 : 408 scf(11.5 ㎥) | 30일 동안 2회 배기<br>1) 방출량 : 816 scf(23 ㎥) |
| RDT | 지속적인 배기<br>2) 방출률 : 0.02 scfm(0.57 lpm) | 지속적인 배기<br>1) 방출률 : 0.02 scfm(0.57 lpm) |

표 2.2.6 GRS 설계 가정사항

| 발생원 | 발생 기체 | 연간발생량 scf(㎥) | 최대유량※ scfm(lpm) | 평균유량 scfm(lpm) |
|---|---|---|---|---|
| CVCS VCT | 수소<br>질소<br>산소 | 2,500(70.75)<br>610(17.26)<br>65(1.83) | 22(623) | 0.006(0.17)<br>0.002(0.06)<br>1.6×10-4(4.53×10-3) |
| CVCS 탈기기※※ | 수소<br>질소<br>산소 | 142,000(4,018.6)<br>2,950(83.49)<br>40(1.13) | 20(656) | 0.338(9.57)<br>0007(0.2)<br>9.5×10-5(2.69×10-3) |
| RDT | 수소<br>질소<br>산소 | 0<br>7,759(219.58)<br>0 | 22(623) | 0(0)<br>0.02(0.57)<br>0(0) |

표 2.2.7 방사성 기체의 주요 발생원별 연간 발생량 및 유량

※ 최대유량은 예상 최대값이며, 지속적인 운전유량은 아님.

※※ 지속적인 탈기 운전을 가정한 값임.

| 핵종 | Reactor Drain Tank | Volume Control Tank | Gas Stripper |
|---|---|---|---|
| H-3 | 7.8E-05 | 7.9E-05 | 1.3E-04 |
| Br-84 | 1.6E-05 | 9.0E-08 | 5.6E-06 |
| Kr-85m | 1.5E-01 | 2.9E+00 | 5.7E+00 |
| Kr-85 | 1.1E+00 | 2.2E+01 | 2.1E+01 |
| Kr-87 | 1.4E-01 | 2.4E+00 | 5.4E+00 |
| Kr-88 | 2.6E-01 | 4.9E+00 | 9.8E+00 |
| Xe-131m | 8.2E-01 | 9.6E+00 | 2.8E+01 |
| Xe-133m | 6.8E-02 | 7.9E-01 | 2.5E+00 |
| Xe-133 | 2.7E+00 | 3.1E+01 | 9.5E+01 |
| Xe-135 | 8.0E-01 | 8.7E+00 | 3.0E+01 |
| Xe-137 | 3.2E-02 | 6.2E-02 | 1.2E+00 |
| Xe-138 | 1.1E-01 | 5.6E-01 | 4.4E+00 |
| I-131 | 3.9E-05 | 3.5E-07 | 1.3E-05 |
| I-132 | 2.1E-04 | 1.6E-06 | 7.2E-05 |
| I-133 | 1.3E-04 | 1.2E-06 | 4.4E-06 |
| I-134 | 3.4E-04 | 2.2E-06 | 1.2E-04 |
| I-135 | 2.5E-04 | 2.1E-06 | 8.5E-05 |

표 2.2.8 정상운전 중 GRS로 유입되는 예상 비방사능 (μCi/cc)

## 다. 구성기기

(1) 전단 입자 여과기 (2 대)

0.3 μm 이상의 입자를 42 % 제거할 수 있다. 전단 여과기(F-1, F-2)의 차압이 0.8″ WC(Indicator 지시치 : 9.5%) 이상이면 교체해야 한다.

(2)제습 설비(Dehumidification System, 2 Train)

제습 설비는 방사성 기체를 냉각, 응축하여 습분 제거하는데, 글리콜 냉각기, 냉동 압축기(Refrigeration Unit), 습분분리기, 재열기 등으로 구성된다. 기체 폐기물의 이슬점은 34 °F～38 °F(1.1 ℃～3.3 ℃)로 유지된다. 글리콜 냉각기의 냉매로 에틸렌글리콜을 사용하며, 냉각설비는 분리·차폐된 지역에 설치한다.

습분분리기(Moisture Separator)에서 발생된 습분(냉각된 기체)은 방사성 폐기물 건물 집수정으로 배수되며 활성탄 지연탑 보호대로 기체가 유입되기 전에 기체의 상대습도를 낮추기 위해 기체를 가열한다. 재열기는 Guard Bed 전단 배관에 Coil 형태로 감겨져 있다.

(3) 활성탄 지연탑 보호대 (2 대)

반감기가 짧은 방사성핵종 및 옥소 제거를 위하여 방사성 기체를 충분히 지연시키고, 습분 유입을 방지하여 활성탄 지연탑을 보호한다. 활성탄 지연탑 보호대는 300 파운드(Pounds)의 활성탄이 충전되어있다.

(4) 활성탄 지연탑 (4 대)

활성탄 보호대를 통과한 기체 중 Xe에 대해서 45일, Kr에 대해서는 2.6일 이상 지연시킨다. 총 42,000 파운드(Pounds)의 활성탄이 충전되고, 4대의 흡착탑(Absorber)이 직렬로 연결되어 있다.

(5) 후단 여과기(HEPA Filter, 1 대)

전단 필터와 동일한 설계 유량을 가지며, 지연 처리된 방사성 기체에서 미립자와 활성탄 미세입자를 제거한다. 후단 여과기(HEPA Filter)는 0.3 마이크론(micron) 이하의 입자를 99.97% 제거한다.

## 3. 이동형 불활성기체 제거 장치

GRS는 계통 내의 불활성기체는 처리할 수 있으나, 원자로 헤드, 증기발생기와 가압기 Man-way 개방 시 격납건물 내로 확산되는 불활성기체는 처리할 수 없다. 따라서 원자로냉각재계통 개방을 위한 추가적인 불활성기체 제거 장치가 필요하다. GRS에서 사용되는 상온 상태의 활성탄 흡착 방식으로 불활성기체를 제거하기 위해서는 많은 양의 활성탄이 필요하여 이동형 불활성기체 제거장치 방식으로는 부적합하다. 이동형 불활성기체 제거 장치에 적합한 제거 방식을 선택하기 위해 다른 불활성기체 제거 방식을 비교하였다.

불활성기체는 영족원소의 고유 특성, 즉 화학적인 반응성이 거의 없는 안정한 상태이기 때문에 화학반응을 이용한 방식은 거의 없다. Kr을 배기체의 흐름에서 분리, 회수하기 위해 현재까지 개발되었거나 개발중인 대부분의 공정은 물리화학적인 기본원리를 활용한 것들이다. 전처리 공정에 따라 조금씩 차이가 나고 또 보다 우수한 분리 효과를 얻기 위해 대부분 공정에서 저온을 활용하기도 하지만 실제적인 주공정에 적용된 기본 원리만을 고려할 때 크게 저온증류/정류, 흡수, 흡착, 그리고 선택투과의 4가지로 분류할 수 있다.

### 가. 저온증류/정류(cryogenic distillation/rectification)법

저온증류는 4가지 방법중 기술적으로 가장 진보한 형태의 방법이다. 이 기술은 기액분리 공정에 기초를 두고 있다. ICPP(Idaho Chemical Processing Plant)는 1960년대 이래로 Kr-85를 분리하기 위한 저온 단위 공정을 운영해오고 있다. 현재, 독일, 벨기에, 일본은 재처리 배가스 처리에 대한 이 기술을 개발시키고 있다. 액상 혼합물에 존재하는 성분을 주어진 온도에서 서로 다른 증기압을 갖고 있는데 이러한 특성을 이용하여 불활성기체를 분리하는 기술이다.

공정은 여러개의 전처리 단계에서 운반체 기체와 Kr과 Xe을 제외한 거의 모든 성

분이 제거된 후에야 저온 증류탑, 정류탑을 지나면서 각각으로 분리되게 된다. 첫번째 증류탑에서 Xe이 회수되며, 이어서 2번째 탑인 정류탑에서 Kr이 회수된다. 그러나 이 기술은 배기체 혼합물 중 다른 성분에 의해 야기되는 문제점을 해결하기 위해 전처리가 필요하며 가능한 불활성 기체의 분리단계에서는 Kr, Xe 및 N2 의 3가지 성분만 남도록 하여야 한다.

불활성기체의 분리에 앞서 전처리로 H-3, C-14, I-129와 같은 휘발성 기체를 먼저 제거하여야 하며, 따라서 불활성기체 분리, 회수공정은 전체 배기체 처리공정의 맨 마지막 단계에 위치하여야 한다.

Kr-85에 의해 산소가 분해되면 오존이 발생하는데 정류단내에 축적되는 경우 자체 또는 미량의 탄화수소와 함께 폭발할 위험성이 크므로 전처리 단계에서 산소를 제거해야 한다. 대부분의 산소제거 공정이 촉매상에서 수소를 이용한 환원법인데 수소의 연소한계를 초과하지 않도록 수소농도의 정밀한 제어가 필요하며 또는 미량의 탄화수소와 함께 폭발한 위험성이 크므로 전처리 단계에서 산소를 제거해야 한다.

방사분해에 의해 생성되거나 용해성 배기체중에 함유된 질소산화물은 탄화수소와 함께 폭발적으로 반응하거나 공정 내부에 축적, 응축되어 산화물 제거용 촉매를 손상시키게 된다. 따라서 알칼리 용액과 접촉시키거나($NO_2$만 제거시), 촉매분해 또는 환원법(모든 질소산화물 제거시)에 의해 이들을 제거시켜야 한다.

응축이 될 수 있는 성분, 특히 물은 공정의 관이 막히지 않도록 제거하여야 한다. 대부분의 물은 산소와 함께 제거되며 그 나머지 수분이나 증기는 실리카겔이나 분자체를 이용하여 제거시킨다. 용해성 배기체 성분인 이산화탄소와 탄화수소 역시 공정을 막히게 할 수 있으므로 제거시켜야 하며, 특히 탄화수소의 경우 오존과 질소산화물과 함계 폭발할 위험성이 크다.

이상과 같은 결과를 종합해 보면 저온 증류/정류 기술을 이용하여 Kr을 분리·회수 공정은 실증단계의 기술검증까지 거친 가장 널리 알려지고 많이 개발된 기술이라 할 수 있다. 그러나 공정이 복잡하고 매우 정밀한 조업이 이루어져야 하며, 높은 에너지의 소모와 높은 초기 투자 및 운영비 등의 단점과 경제성이나 기술적인 측면에서는 거의 개발이 완료되어 개선의 여지가 별로 없는 기술로 평가된다.

### 나. 용매흡수(Solvent absorption)법

액상의 유기용매에 불활성기체가 잘 용해되는 특성을 이용하여 불활성기체를 분

리·회수하는 기술이다. 이때 사용되는 용매는 Kr(또는 최소한 영족기체)에 대해 선택적이고 방사선에 잘 분해되지 않아야 한다. Kr과 Xe에 대해 선택성을 보이는 용매로는 사염화탄소(tetra-chlorometane, CCl4), 지방족 및 방향족 탄화수소류, 질소 산화물류, 프레온 가스(di-fluorodichloromethane, $CF_2Cl_2$ ; Freon-12 or R-12) 등이 있으나, 더 나아가 Xe 존재하에서 Kr만이 선택적으로 흡수하는 용매는 없다.

액체 프레온기체를 이용하여 방사성 불활성 기체를 회수하는 본 공정의 단점으로는 R-12가 방사선에 의해 분해되어 염소와 같은 부식성 물질이 생성되는 것이다. 보통 전체에서 사용되는 용매양의 0.1% 이하만이 분해되나 공기가 포함되면 크게 증가하는 것으로 보고되고 있다. 그 외에도 프레온계 기체의 방출로 인한 오존층의 파괴와 관련해 환경차원에서의 사용규제가 이 공정의 상용화에 장애로 예상된다. 또한 높은 에너지 소모와 높은 초기투자비와 운영비로 인한 경제적인 단점을 갖고 있다.

## 다. 고체매질 흡착(adsorption on solids)

어떤 표면에 근접한 원자나 분자가 순간적으로 전기적인 극성을 가짐으로 발생되는 van der Waals force은 약하고 근접거리에만 미치지만 기체에 따라 서로 다른 특성을 가지고있는데 이를 이용하는 기술이 흡착이다. 불활성기체의 흡착은 가역적으로 온도와 압력에 따라 달라지므로 이들이 주요 조업변수가 된다.

활성탄은 매우 많은 비표면적을 가질 뿐만 아니라 불활성기체도 잘 흡착시키므로여기에 배기체를 흡착, 지연시킴으로 단반감기 핵종의 방사능을 줄이는 기술은 이미 원자력발전소의 기체폐기물 처리에 적용되고 있다. PWR형 원자력발전소의 경우 불활성기체의 배출량이 많지 않으므로 대략 50~100일 정도면 Kr-85를 제외한 나머지는 거의 무시할 만한 수준까지 감소하게 된다.

평형상태에서 흡착제 질량당 흡착된 기체의 양은 온도, 압력, 흡착제의 특성, 피흡착제의 특성의 함수이다. 온도함수에서 흡착은 압력의 함수이고, 이것을 등온흡착(adsorption isotherm)이라 한다. 압력함수에서의 흡착이 온도의 함수인 경우를 등압흡착(adsorption isobar)라 한다.주어진 가스와 주어진 흡착제의 단위중량에 대하여 흡착된 가스의 양은 온도와 최종 압력의 함수이다.

저온에서의 흡착능력을 활용하는 방법은 결국 보다 우수한 흡착성능을 갖는 고체매질을 찾고 이들의 특성을 파악하기 위한 연구가 선행되어야 하며, 현재까지 이루어진 여러 자료들은 대부분 활성탄과 제올라이트를 대상으로 하고 있다. 활성탄을 흡착매

질로 이용하는 경우 NOx가 활성탄에 축적되면 산소와 반응하여 화재를 일으키기 때문에 일반적으로 사용후핵연료의 재활용공정에 적용하기에는 문제가 있는 것으로 알려져 있다.

이 방법은 다른 방법에 비해 낮은 초기 투자비와 운영비로 경제성을 도모할 수 있으며 또한 보다 더 안정성을 제공할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 실험실규모부터 pilot plant 및 상용화에 대한 기술개발이 진행중이다.

## 라. 막투과법(Permeation through membrane)

1970년대에 일본 Toshiba와 미국에서 주로 연구된 기술로 불활성기체가 membrane을 통과하는 속도가 다른 점을 이용하여 여러 개의 단의 막을 투과시켜 Kr을 농축시키는 방법이다.

이론적으로 공급농도가 10ppm에 대해 단일 막을 이용하여 27단의 투과를 거치면 제염계수가 $10^3$까지 이르러 0.1% Kr까지 농축할 수 있으며, 2중막을 이용하는 경우 33단을 투과시키면 제염계수가 $10^4$까지 농축된다고 한다. 막에 대한 방사선 영향은 실리콘 고무의 경우 방사선량 10 Gy 및 선량률 100 Gy/s 가지는 영향을 받지 않고 그 이상에서는 막이 손상되는데, 이 양을 배기체 중의 Kr 농도로 환산하면 약 1% 정도로 방사선에 매우 약한 것이 문제점이다.

막투과 기술은 연구실 규모로만 연구가 수행되었을 뿐 현재는 기술개발이 거의 진행되지 않고 있는 기술이다.

## 마. 각 공정 비교

저온 증류/정류 기술은 기술개발의 정도나 적용성 및 안정성을 고려했을 때 가장 우수한 기술로 분석되나 공정자체가 복잡하고 매우 정밀한 조업 조건에 의해 경제성이나 기술적인 측면에서 기술개발의 여지가 거의 없는 기술로 평가되며, 용매흡수법은 적용성 및 안정성도 상당히 우수하며 상대적으로 덜 민감한 조업조건이나 기술적으로 많은 투자와 개발이 이루어져 자체 기술개발의 경쟁력을 확보하기가 어렵게 판단된다. 또한 막투과기술은 방사선의 안정성 확보가 시급하므로 공정개발보다는 매질개발의 선행이 요구되며, 고체흡착법은 최근에 연구개발이 시작되고 공정이 간단하며 잘 알려진 기술을 활용함으로서 충분한 기술경쟁력을 가질 것으로 판단된다.

## 바. 이동형 불활성기체 제거 장치 적용 방식

이동형 불활성기체 제거 장치는 계획예방정비 시 원자로냉각재 계통 개방에 따른 불활성기체의 확산을 방지하는 목적으로 제작되었다. 따라서 장치 운전 시간이 길지 않으며, 불활성기체를 핵종별로 구분하지 않고 모두 포집하도록 설계되었다. 이동형 불활성기체 제거장치는 초저온에서 불활성기체 흡착량이 크게 증가하는 원리를 이용한다. 온도에 따른 흡착량의 변화는 그림 2.5.1에서 확인할 수 있다. 설비에 사용하는 흡착제로는 가격이 저렴하고 성능이 우수한 활성탄으로 선정하였다.

계통은 크게 3단계로 이루어진다. 첫번째 단계에서는 전처리 필터에서 유입된 공기 내의 수분, $CO_2$, $NO_2$ 및 입자를 제거한다. 응축된 수분과 입자는 설비내에서 기체 유로를 차단하거나 활성탄의 성능을 저하시키므로 제거한다. $CO_2$와 $NO_2$는 활성탄에 축적되어 산소와 반응하여 화재를 일으킬 수 있으므로 제거한다.

두 번째 단계에서는 냉동기를 사용하여 1차 활성탄 필터를 -60 ℃ 이하로 냉각시킨다. 낮은 온도에서 1차 냉각되어 일부 불활성기체는 활성탄 내에서 흡/탈착을 반복하여 속도가 지연되고 나머지 불활성기체는 2차 활성탄 필터로 흘러간다.

세 번째 단계에서는 저온의 액체질소를 사용하여 2착 활성탄 필터를 -190 ℃ 이하로 냉각한다. 1차 활성탄 필터를 거쳐온 불활성기체는 2차로 냉각되어 2차 활성탄 필터에서 99.9 % 이상 흡착되고 나머지 기체성분만 배기된다.

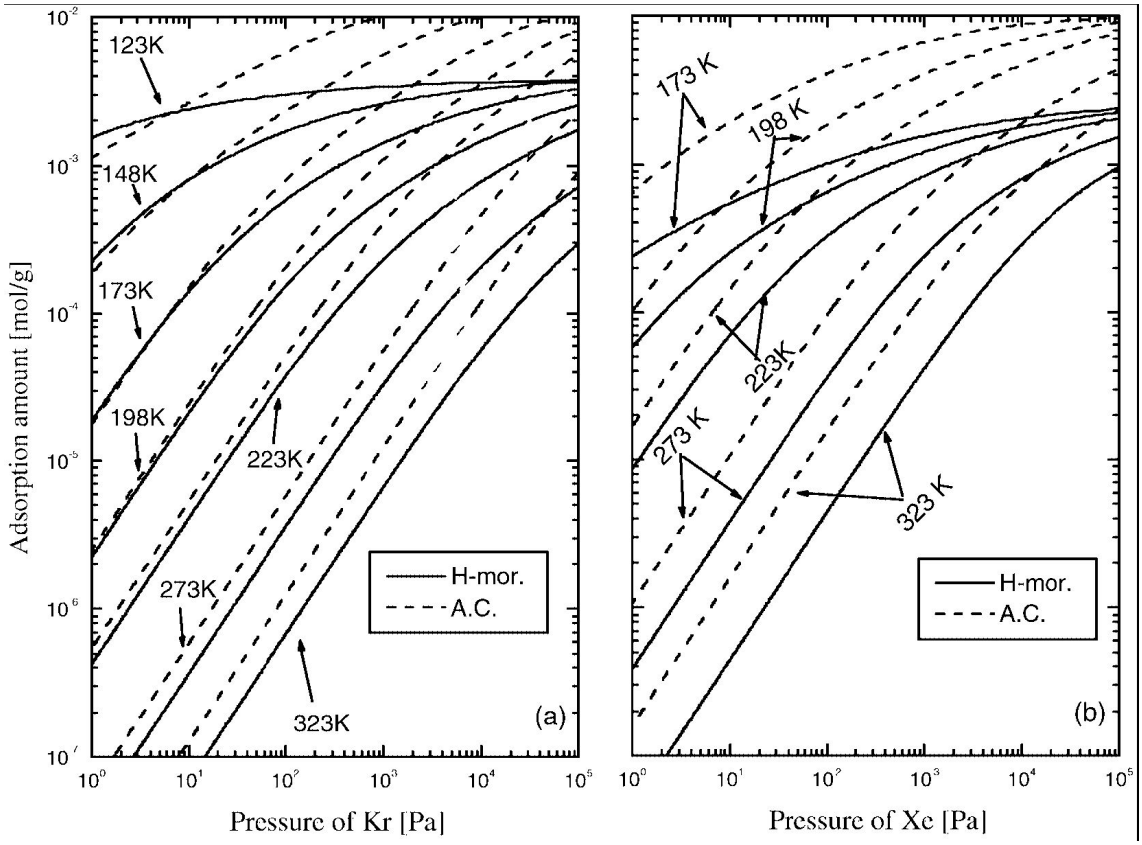


그림 2.2.2 Adsorption isotherms of noble gases on H-mordenite and activated charcoal

## 제 3 절 이동형 불활성기체 제거 장치의 구성 및 운전 방법

### 1. 구성

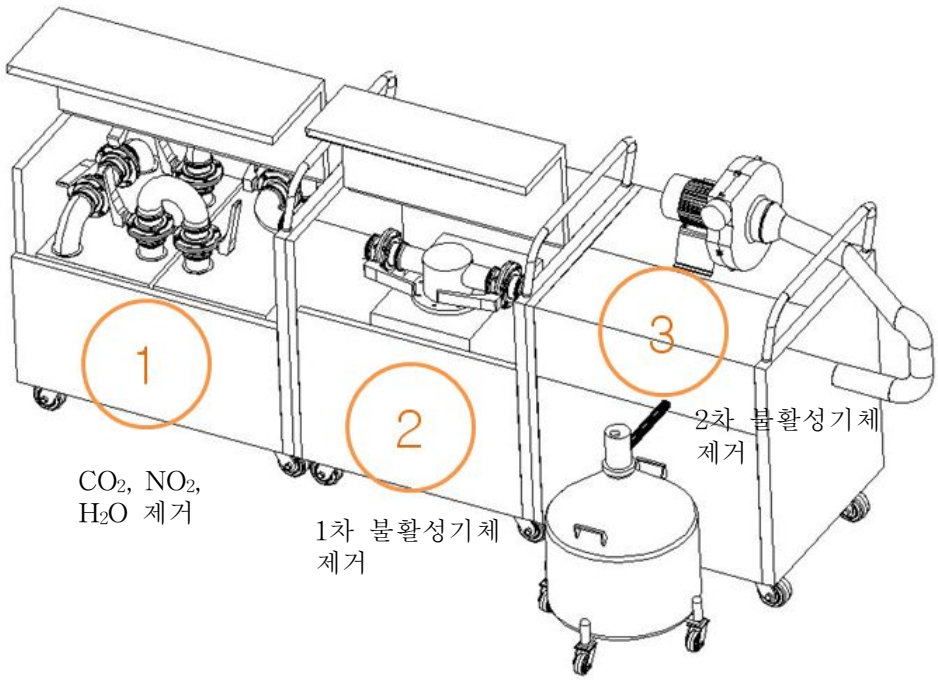


그림 2.3.1 이동형 불활성기체 제거 장치의 전체 개략도

#### 가. 제1장치

제1장치에서는 $H_2O$, $CO_2$ 및 $NO_2$를 제거한다. 장치의 전체 크기는 733mm(W) x 1170mm(H) x 980mm(D) 이다.

(1) Moisture Adsorption Trap
- 기능 : 응축된 습분은 유로를 차단하거나 활성탄의 흡착 성능을 저하시키므로 제거한다.
- Moisture Adsorbent : Molecular Sieve 4A
- 정상 가동 온도 : 4 ~ 90 ℃

- 정상 상태 상대 습도 : 100 % 이하

(2) $CO_2$·$NO_2$ Adsorption Trap
- 기능 : $NO_2$는 활성탄과 반응하여 고온에서 화재를 일으킬 수 있으므로 제거한다.
- $CO_2$·$NO_2$ Adsorbent : Norit RB3 Activated Carbon Specifications
- Carbon dioxide adsorption capacity of Activated Carbon: 35 w/w% 미만
- Nitrogen dioxide adsorption capacity of Activated Carbon: 10 w/w% 미만
- $CO_2$·$NO_2$ 제거 효율 : 95 % 이하

(3) Particle Dust Filter Trap
- 기능 : Moisture Trap 및 $CO_2$, $NO_2$ Trap에 사용하는 흡착제에 포함되어 있는 미세 입자와 Noble Gas Adsorption의 방해물질로 작용하는 기타 불순물 및 기체의 흡착으로 Noble Gas Adsorption 흡착효율 증대한다.
- 평균포집효율(%) : 95%

## 나. 제2장치

제2장치에서는 냉동기를 이용하여 1차적으로 냉각된 활성탄필터를 이용하여 불활성기체를 제거한다. 장치의 전체 크기는 733mm(W) x 1170mm(H) x 850mm(D)이다.

(1) 제1차 Noble Gas Adsorption Trap
- 기능 : 1차적으로 예비 냉각된 기체를 흡착한다.

※ 활성탄 및 다른 흡착제도 불활성기체를 흡착하지는 않는다. 단지, 활성탄 내에서 불활성기체가 머물다가 배출된다. 따라서 흡착제의 특성표기에서 "Xenon Delay", "Krypton Delay"라 표시되어 있다.

- 정상 가동 온도 : 0 ~ -90 ℃
- Noble Gas 흡착제 : Norit RB4 Activated Carbon Specifications
- Xenon gas adsorption capacity of Activated Carbon: About 20 to 50 w/w%, Average capacity around 35 w/w%
- Krypton gas adsorption capacity of Activated Carbon: About 20 to 50 w/w%, Average capacity around 35 w/w%
- 불활성기체 트랩이 포화할 경우 교체한다. 포화된 트랩은 전용용기에 보관하여 충분히 자연붕괴 시킨 후 처리한다.

- 포화된 트랩은 Trap Recycling System을 이용하여 재생한다.

(2) 제1차 Cold Trap Cooler
- 기능 : 예비냉각 기능을 수행하여 1차 트랩 운전 온도까지 냉각시킨다.
- 정상 운전 온도 : -90 ℃

## 다. 제3장치

제3장치에서는 액체질소를 이용하여 2차적으로 냉각된 활성탄필터를 이용하여 불활성기체를 제거한다. 장치의 전체 크기는 733mm(W) x 1170mm(H) x 850mm(D)이다.

(1) 제2차 Noble Gas Adsorption Trap
- 기능 : 2차적으로 냉각된 기체를 대부분 흡착한다.
- Noble Gas 흡착제 : Norit RB4 Activated Carbon Specifications

(2) 제2차 Cold Trap Cooler(냉동기)
- 기능 : 2차 냉각 기능을 수행하여 2차 트랩 운전 온도까지 냉각시킨다.
- Liquid nitrogen 주입 시 운전 온도 : -196 ℃

(3) Liquid Nitrogen Autofill System
- 기능 : 2차 불활성기체 흡착 트랩 용기에 액체 질소를 설정높이까지 자동으로 보충한다.

(4) Blower & Flow Controller
- 기능 : 이동형 불활성기체 제거 장치의 운전 유량을 조절한다.
- 정상 운전 유량 : 2 ㎥/min

## 2. 운전 방법

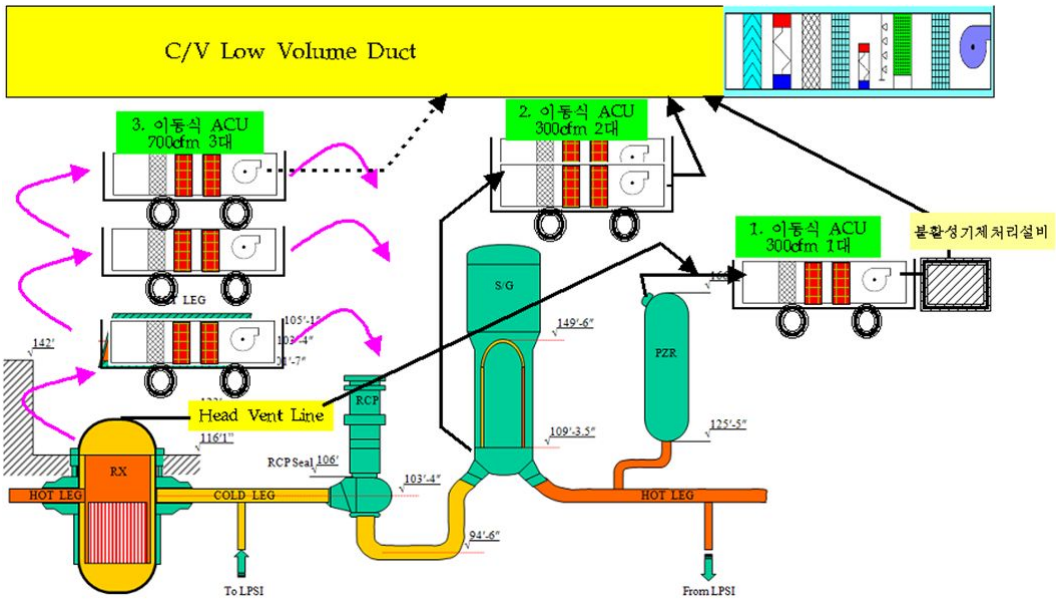


그림 2.3.2 이동형 불활성기체 제거 장치 운전 개략도

이동형 불활성기체 제거 장치는 '이동형 옥소, 미립자 제거장치'와 연결하여 사용한다. 개방된 가압기나 증기발생기의 Man-way와 주름관으로 연결되어 원자로냉각재 계통 내의 방사성 기체를 흡착 처리하여 저체적배출팬 흡입구로 내보낸다. 또한 원자로 헤드 개방 시 헤드 주변에 위치하여 원자로 내부에서 확산되어 나오는 기체를 최대한 흡착 처리하여 격납건물 내 공기오염도 저감화에 기여한다.

### 가. 가압기 Man-way 개방

(1) 격납건물 저 체적 퍼지 계통(ACU-02S)이 운전 중임을 확인한다.
(2) 이동식 Air Blower를 기동한다.
(3) 원자로 헤드 배기 Valve 및 SG Cold Leg Man-Way를 약간 개방한다.
(4) SG U-Tube 및 원자로 헤드 내부 기체 방사성물질을 격납건물 저 체적 배기 계통 흡입구로 배출한다.
(5) 활성탄(Charcoal) 및 HEPA Filter를 통과시켜 방사성기체 제거한다.
(6) 격납건물 대기 방사능 감시기(RE-039)의 지시치가 일정한지 확인한다.
(7) 원자로 냉각재 계통 Hot Leg의 마지막 Nozzle Dam 설치 전 이동식 Air

Blower을 정지한다.

## 나. SG Man-Way 개방

(1) 원자로 냉각재 탈기 결과에 따른 원자로 냉각재의 방사능량 확인 및 개방조건을 점검한다.
(2) 격납건물 대기 방사능 농도 감시 및 확인한다.
(3) 필요한 경우 격납건물 기체 방출운전(저 체적 및 고 체적 purge)을 통해 격납건물 대기 방사능 농도를 1 DAC미만으로 유지한다.
(4) 이동식 Air Blower를 이용하여 1차 계통 내부 기체 방사성물질을 제거 운전을 시작한다.
(5) 격납건물 대기 방사능 농도 추이를 지속적으로 감시하면서 작업 계속할지 결정한다.
(6) 격납건물 내부 기체 방사능 농도는 다음의 방법으로 감시한다.
- 소내 방사선감시기
- 연속 방사능 감시기 운영
- 주기적인 공기시료 채취 및 시료 분석
(7) 격납건물 대기 방사능 농도를 1 DAC미만으로 유지하면서 호흡에 의한 내부피폭을 저감하기 위해 방사선작업 지역의 오염종류 및 공기 오염도에 따라 적절한 방호조치를 취한다.
(8) SG Man-Way를 완전히 개방하고 지속적으로 격납건물 대기 방사능 농도를 감시한다.

## 다. 원자로 헤드 개방

(1) 원자로 헤드 개방 전 원자로 냉각재 계통 탈기 결과에 따른 원자로 냉각재의 방사능 농도 확인 및 개방조건 점검한다.
(2) 격납건물 대기 방사능 농도 감시 및 확인한다.
(3) 필요한 경우 격납건물 기체 방출운전(저 체적 및 고 체적 purge)을 통해 격납건물 대기 방사능 농도를 1 DAC미만으로 유지한다.
(4) 이동식 Air Blower를 이용하여 1차 계통 내부 기체 방사성물질을 제거 운전을 시작한다.
(5) 격납건물 대기 방사능 농도 추이를 지속적으로 감시하면서 작업 계속할지 결정한다.
(6) 격납건물 내부 기체 방사능 농도는 다음의 방법으로 감시한다.
- 소내 방사선감시기

- 연속 방사능 감시기 운영
- 주기적인 공기시료 채취 및 시료 분석

(7) 격납건물 대기 방사능 농도를 1 DAC미만으로 유지하면서 호흡에 의한 내부피폭을 저감하기 위해 방사선작업 지역의 오염종류 및 공기 오염도에 따라 적절한 방호조치를 취한다.

(8) 원자로 헤드를 개방하고 지속적으로 격납건물 대기 방사능 농도를 감시한다.

# 제 3 장 장치 성능 및 경제성 평가

## 제 1 절 장치 성능 시험

### 1. 성능 시험

#### 가. 1차 성능시험

이동형 불활성기체 제거 설비의 제염계수를 측정하기 위하여 원자로냉각재 기체 시료로 성능 시험을 수행하였다. 또한 예상 운전시간 이내에 활성탄 필터가 포화되지 않음을 확인하기 위해 1.5시간 동안 운전하였다. 성능시험 결과는 다음 표와 같다.

| 구 분 | 전 단 (Bq/cc) | 후 단(Bq/cc) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 0.5 시간 | 1 시간 | 1.5 시간 |
| $^{85m}Kr$ | $1.74\times10^{0}$ | N/D | N/D | N/D |
| $^{87}Kr$ | $2.00\times10^{0}$ | N/D | N/D | N/D |
| $^{88}Kr$ | $3.50\times10^{0}$ | N/D | N/D | N/D |
| $^{89}Kr$ | $4.97\times10^{-1}$ | N/D | N/D | N/D |
| $^{133}Xe$ | $1.71\times10^{1}$ | N/D | N/D | $9.86\times10^{-2}$ |
| $^{133m}Xe$ | $3.75\times10^{-1}$ | N/D | N/D | N/D |
| $^{135}Xe$ | $8.57\times10^{0}$ | $1.06\times10^{-2}$ | $3.26\times10^{-2}$ | $2.98\times10^{-2}$ |
| $^{135m}Xe$ | $7.03\times10^{-1}$ | N/D | N/D | N/D |
| $^{137}Xe$ | $1.24\times10^{0}$ | N/D | N/D | N/D |
| $^{138}Xe$ | $2.11\times10^{0}$ | N/D | N/D | N/D |

표 3.1.1 The 1st Performance Examination

시료 분석은 시간을 두고 3회에 걸쳐 수행하였다. 분석 결과 Krypton의 제거효율은 100%이고, Xenon은 약 99.8 %의 제거효율을 보였다.

### 나. 2차 성능시험

2차 성능시험은 가압기 기상부 시료를 대상으로 수행하였다. 가장 높은 비율을 보이는 Xe-133, 135 핵종에 대하여 분석하였고, 성능시험 결과는 다음 표와 같다.

| 구 분 | 전 단 (Bq/cc) | 후 단(Bq/cc) |
|---|---|---|
| | | 1분 |
| $^{133}Xe$ | $2.75\times10^{1}$ | $1.60\times10^{-3}$ |
| $^{135}Xe$ | $2.51\times10^{2}$ | $5.79\times10^{-4}$ |

표 3.1.2 The 2nd Performance Examination

시료 분석은 2회 실시하였으며, Xenon은 평균적으로 약 99.9%의 제거효율을 보였다.

## 2. 공정별 실증 시험

### 가. 주요 공정별 실증 시험

기존의 O/H에는 가압기 Man-way 개방, 증기발생기 Man-way 개방, 원자로 헤드 개방 등의 경우에 격납건물 내 공기오염도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 영광 4호기 11차 O/H에서는 연료 손상이 있었음에도 불구하고 효과적인 화학 처리와 이동형 불활성기체 제거 설비의 가동으로 연료 손상이 없었을 때와 같은 수준으로 격납건물 내 공기오염도를 관리할 수 있었다. 각 공정별 공기오염도는 다음 표와 같다. 그림 3.1.1과 3.1.2는 가압기 M/W 개방과 증기발생기 M/W 개방 시 방사능 농도 추이를 보여잔다.

| 공 정 | 성 능 | 공기오염도(DAC) |
|---|---|---|
| 가압기 M/W 개방 | 100% | 0.14 |
| S/G M/W 개방 | 100% | 1.07* |
| 원자로 Head 배기 | 100% | 0.20 |

표 3.1.3 The Actual Examination

* 30분 후 0.20 DAC로 감소

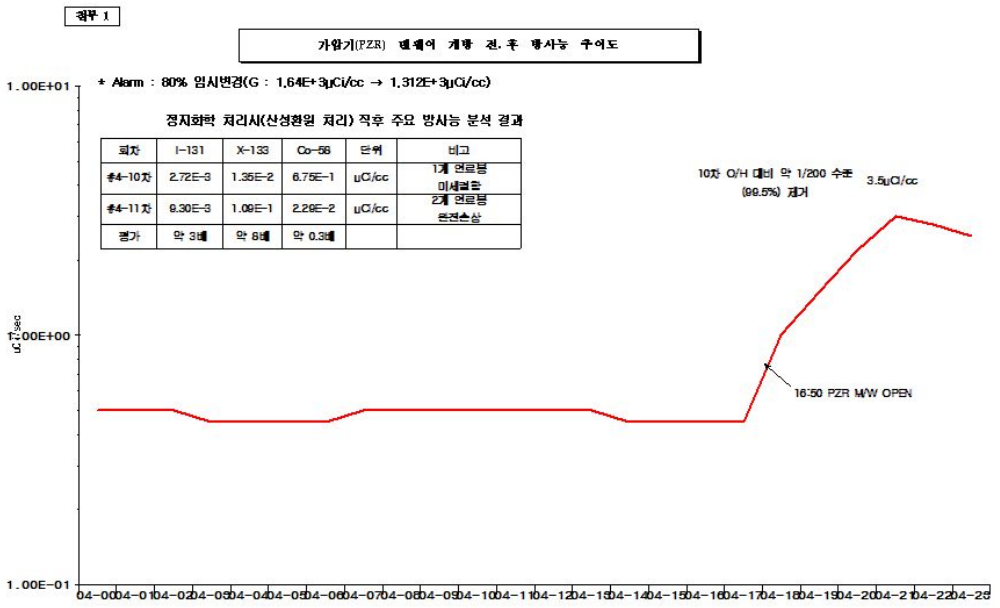


그림 3.1.1 가압기 Man-way 개방 시 방사능 추이도

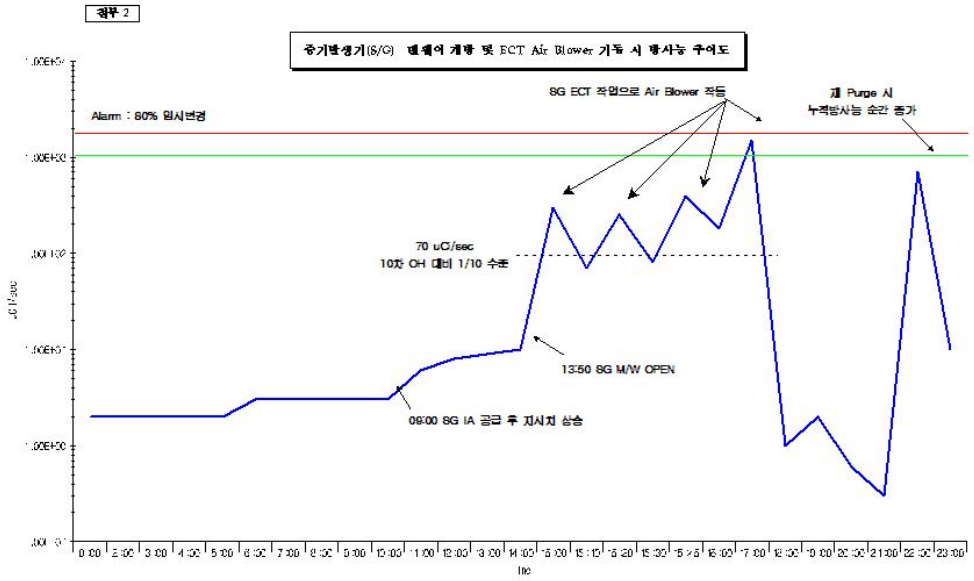


그림 3.1.2 증기발생기 Man-way 개방 및 ECT Air Blower 기동 시 방사능 추이도

# 제 2 절 경제성 평가

영광 4호기 11차 O/H에는 이동형 불활성기체 제거 설비를 이용하여 격납건물 내 공기오염도를 효과적으로 제어할 수 있었다. 따라서 1 DAC 이상에서 착용하여야 하는 마스크로 이한 공기 지연을 방지할 수 있었고, 작업자의 피폭선량도 효과적으로 줄일 수 있었다. 그 이득을 경제적으로 분석하면 다음 표와 같다.

| 평 가 / 대 상 | 연료결함 발생 경우 | 연료결함 미발생 경우 |
|---|---|---|
| 종사자 피폭저감 금액 | 0.34억원 | 0.05억원 |
| 공기오염에 따른 공정 지연 비용 | 55.8억원 | 3.7억원 |
| 정량적 효과금액 | 56억원 | 3.8억 원 |

표 3.2.1 이동형 불활성기체 제거 장치 경제성 분석

## 가. 연료결함 발생 경우

(1) 종사자 피폭저감효과 : 약 3천4백만원

- O/H 피폭저감선량(man-mSv) × 피폭단가(원/mSv)
  = 1,440 man-mSv×17 $/man-mSv×1,400원/1$ = 약 34,272,000원
  ※ 피폭단가:17$/man-mSv(KINS Model, Alpha Value in Korea, '07)
  ※ 예상 공기오염준위 : 2DAC(대상핵종 : Xe-133, 135)
  ※ 저감 종사자 집단선량 : 400명(일 출입인원)×0.12mSv(일 피폭량)/1명 × 30일(OH 공정)

(2) O/H 공정 및 지연 방지효과 : 약 56억원

- 공기오염도에 따른 공정 지연 보상일×OH 공정단축비용
  = 6일(OH 공정 지연보상)×930,000,000원/일 = 약 5,580,000,000원
  ※ 공정단축비용(전력거래통계,발전처'09년 발전계획=930,000,000원/일)
  ※ 마스크 착용에 공정 지연보상 = 마스크 착용 기간(OH, 30일)×20%(공정 지연비율)=6일

## 나. 연료 미결함 경우

(1) 종사자 피폭저감효과 : 약 5백만원

- O/H 피폭저감선량(man-mSv) × 피폭단가(원/mSv)

  = 216 man-mSv × 17 $/man-mSv× 1,400원/1$ = 5,140,800원

※ 예상 공기오염준위 : 0.3DAC(대상핵종 : Xe-133, 135)

※ 저감 종사자 집단선량 : 400명(일 출입인원)×0.018mSv/1명,일 × 30일(OH 공정)

(2) O/H 공정단축 및 지연 방지효과 : 약 3억 7천만원

- 공기오염도에 저감에 따른 단축공정일×OH 공정 단축비용

  = 0.4일(OH 공정 지연일)×930,000,000원/일 = 약 372,000,000원

※ 마스크 착용기간 : 가압기 M/W 개방 및 원자로 헤드 인양기간(OH 기간 중 2일)

※ 공기지연 보상일 : OH(2일)×20%(공정 지연비율)=0.4일

## 다. 개발 비용 대비 예상 이득

이동형 불활성기체 제거 장치의 개발 비용은 약 9천만원이다. 장치 사용시 계획예방정비 공기 지연을 방지하고 종사자의 피폭을 저감할 수 있었다. 또한 소형으로 이동이 가능하여 하나의 장치로 양 호기에서 사용이 가능하고 향후 연료 손상 발생 시 재사용이 가능하므로 장치개발에 따른 경제적 이득은 매우 크다.

# 제 4 장 결론

영광 4호기 11주기 운전 중 발생한 연료결함에 의해 원자로냉각재의 기체 방사능 농도가 이전 주기 대비 크게 증가하였다. 계획예방정비 중 원자로냉각재 계통 개방 시 예상되는 불활성기체의 확산을 방지하기 위하여 이동형 불활성기체 제거장치를 개발하였다. 해당 장치를 운영함으로써 원자로 정지 후 원자로냉각재 계통 개방 시 불활성기체 확산을 99.9% 이상 방지하여 격납건물 내부 공기오염도를 연료 결함이 없을 때와 같은 수준으로 관리할 수 있었다. 본 연구에서는 이동형 불활성기체 제거장치의 성능 시험과 실증 시험을 통하여 제거장치의 경제성을 평가하였다.

영광 4호기 제 11차 계획예방정비 시 이동형 불활성기체 제거 장치 운영으로 격납건물 내 공기오염도를 효과적으로 관리하여 종사자 피폭선량을 줄일 수 있었다. 또한 호흡장비 미착용에 의한 작업환경 개선으로 계획예방정비 공기 지연을 방지하여 약 56억원의 경제적 이득을 얻을 수 있었다. 뿐만 아니라 정비 품질 향상, 방사선안전관리 업무량 감소 등의 유형적인 이득을 취할 수 있었다.

후쿠시마 원전 사고 이후로 원전과 방사능 누출에 대한 국민적 관심이 높아지고 있다. 원전은 지역 주민과 국민의 사회적 합의 하에서만 운영가능하다. 격납건물 내 공기오염도를 낮춤으로써 종사자의 피폭을 저감시켜 원자력발전소 안전 운영에 대한 신뢰도를 높이고, 격납건물 Purge 계통을 통해 배출되는 방사성 기체를 최소화시킴으로써 지역주민의 신뢰도가 향상될 것으로 예상된다. 그리고 계획예방정비 공기 지연을 방지하여 이용률을 상승시켜서 얻는 높은 운영실적과 표준형 원전의 우수한 기술력을 바탕으로 전 세계 원전시장에서 경쟁력을 강화하는 등의 무형적인 이득을 기대할 수 있었다.

그리고 이동형 불활성기체 제거 장치의 운전경험을 바탕으로 향후 핵연료 손상 시에도 효과적인 방사선 안전 관리가 가능하다. 그리고 노형에 관계 없이 사용할 수 있는 설비로서 타 원전 연료 결함 발생 시에도 활용 가능할 것으로 판단된다.

향후 개선해야할 점으로는 용량에 따른 제거장치를 추가 도입하고, 후쿠시마 원전처럼 격납건물 내에 비정상 상황 발생 시 격납건물 저체적배출팬과 연계하여 사용가능하도록 연구가 필요하다.

# 참고문헌


[1] 한국수력원자력(주), 영광 제2발전소 운영절차서, 이동형 불활성가스 제거장치 운전(2011)

[2] 한국수력원자력(주), 영광 제2발전소 업무지침서, 격납건물 공기오염도 관리 지침(2010)

[3] 한국수력원자력(주), 영광 제2발전소 운영절차서, 기체 방사성 폐기물 배출 관리(2011)

[4] 한국수력원자력(주), 영광 제3발전소 업무지침서, 연료결함 시 계획예방정비기간 격납건물 공기오염도 관리(2010)

[5] Ralph T. Yang, 흡착제 :그 원리와 응용, 지구문화사(2006.)

[6] 한국원자력연구소, 크립톤 및 크세논 처리기술, KAERI/AR-667(2003)

[7] Kenzo Munakata, Adsorption Equilibria of Krypton, xenon, Nitrogen and Their Mixtures on Molecular Sieve 5A and Activated Charcoal, Journall of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY (1999)

[8] Kenzo Munakata, Adsorption of Noble Gases on H-Mordenite, Journall of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY (2002)

# 감사의 글

고등학생 때 ‘무궁화꽃이 피었습니다’를 읽고 원자력공학도의 꿈을 키웠습니다. 대학교에서 원자력을 전공하고, 원자력 산업의 큰 일꾼이 되겠다는 포부를 갖고 한국수력원자력에 입사하였습니다. 그러나 발전팀의 운전원으로서 얻을 수 있었던 값진 경험과 지식에도 불구하고 스스로 부족하다는 아쉬움을 느꼈습니다. 이에 대학원 진학을 선택하였고, 더욱 성장할 수 있는 계기가 되었습니다.

업무와 학업을 같이 한다는 어려움도 있었지만, 대학원 수업과정에서 다루었던 많은 주제들은 제게 새로운 화두로 다가왔고 앞으로 나아가야 할 방향을 정하는데 많은 도움이 되었습니다. 앞으로도 항상 새로운 마음가짐으로 나태해지지 않고 정진해 나가겠습니다.

부족한 저를 항상 격려해주시고 정성으로 지도해 주신 송종순 교수님께 감사드립니다. 늘 제가 새롭게 다짐하고 도전할 수 있게한 자극과 가르침을 잊지 않겠습니다.

논문 지도와 대학원 생활에 큰 버팀목이 되어주신 김숭평 교수님, 정운관 교수님, 나만균 교수님, 이경진 교수님, 김진원 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

학업을 끝까지 마치는데 큰 힘이 되었던 핵주기 실험실의 동료 연구자인 박복열, 김한점, 김인기, 정형덕, 정강일, 이상헌, 정민영 학우님들께도 진심으로 감사함을 전합니다.

그리고 회사업무와 학업을 병행할 수 있도록 배려해주신 발전팀 팀원과, 훈련센터 교수님, 윤영호 차장님께도 깊은 감사를 드립니다.

마지막으로 학업으로 가사에 소홀할 때에도 묵묵히 내조하고 격려해준 아내 서원이에게 미안함과 감사함을 바칩니다. 그리고 자주 놀아주지 못해 미안한 마음을 감출 수 없는 딸 혜원이에게 자상한 아버지가 될 것을 약속하며 감사의 글을 마칩니다.

2011년 8월

이 동 우

# 저작물 이용 허락서

| 학 과 | 원자력공학과 | 학 번 | 20087491 | 과 정 | 석사 |
|---|---|---|---|---|---|
| 성 명 | 한글 : 이 동 우 한문 : 李 東 羽 영문 : LEE DONGWOO | | | | |
| 주 소 | 전남 영광군 홍농읍 상하리 한수원 사택 24-306호 | | | | |
| 연락처 | E-mail : ily78@khnp.co.kr | | | | |
| 논문제목 | **원자력발전소 이동형 불활성기체 제거장치의 개발 및 경제성 평가에 관한 연구** | | | | |
| | **A Study on the Performance Examination and Economical Evaluation of Portable Noble Gas Removal System in Nuclear Power Plant** | | | | |

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

**동의여부 : 동의( O ) 반대( )**

2011년 8월

저작자: 이 동 우 (인)

# 조선대학교 총장 귀하