

이동형 불활성기체 제거장치의 성능 및 경제성 평가

이동우, 송중순*, 윤영호

한국수력원자력(주), 전남 영광군 홍농읍 계마리 영광원자력본부

*조선대학교, 광주광역시 동구 서석동

ily78@khnp.co.kr

1. 서론

핵연료에서 원자핵분열을 통해서 생성된 핵분열생성물은 기체, 액체, 고체 상태로 핵연료봉 안에 안전하게 존재하여 원자로냉각재는 높은 방사능을 갖고 있진 않다. 그러나 핵연료봉에 손상이 있을 경우 핵분열생성물은 원자로냉각재로 누출되고 원자로냉각재는 높은 방사능을 띄게 된다.

영광 4호기 11주기 운전 중 발생한 연료결함에 따른 방사성 기체 영향을 11차 O/H 기간 동안 최소화하기 위하여 불활성기체 제거장치를 개발하였고, 성능시험 및 실증시험을 완료하였다.

2. 본론

2.1 이동형 불활성기체 제거 설비 개발 배경

영광 4호기 11주기 운전 시 연료손상 징후가 보이며 원자로냉각재 계통의 방사능 준위가 이전 주기 대비 크게 올라갔다. 원자로냉각재는 정화필터와 탈염기 및 가스탈기기를 통하여 정화운전을 하게 된다. 또한 O/H을 하기 전 물리/화학적 탈기를 하여 원자로냉각재 내 방사성 기체를 최대한 제거한다. 그러나 O/H 시에는 계통감압에 따른 핵연료봉 내부 방사성물질의 추가 누출 및 원자로냉각재계통 기상부에 존재하는 방사성 기체로 인하여 계통 개방 시 격납건물 내부 공기오염도가 증가될 것으로 예상되었다.

원자력발전소 설계개념(10 CFR 50)에 따라 격납건물 내 공기오염도 관리를 위하여 저체적배출팬을 이용한다. 저체적배출팬은 HEPA Filter와 활성탄을 이용하여 입자 및 Iodine과 같은 방사성 물질을 제거하고 격납건물 외부로 배출한다. 그러나 Xenon과 Krypton과 같은 불활성기체는 활성탄과 잘 반응하지 않아¹⁾ 제거하기가 힘들다.

격납건물 내부의 공기오염도 관리 및 저체적배출팬의 불활성기체 방출제한치를 지키기 위하여

불활성기체 제거를 위한 추가적인 장비가 필요하게 되었다.

2.2 불활성기체 제거 원리 및 장비 구성

불활성기체는 그 물리/화학적 안정성으로 인하여 제거가 매우 어렵다. 원자력발전소에서 사용하는 기체 방사성폐기물 처리계통(GRS)에서는 Charcoal Delay Bed에서 물리적인 흡/탈착을 반복시켜 이동속도를 지연시키고 자연붕괴를 이용하여 기체 폐기물을 처리한다. 동 계통은 핵연료 결함이 없는 정상 운전 및 계획외방정비기간 동안 발생하는 불활성기체는 정상적으로 처리(정상 처리량 : 2.5 cfm)가 가능하다. 그러나 핵연료 결함이 발생될 경우에는 통상적으로 정상 운전 대비 약 100배 이상의 불활성기체가 발생하는 것으로 국내·외 적으로 보고되고 있으며, 이와 같은 발생량을 처리하기 위해서는 별도의 대용량의 활성탄이 필요하다.

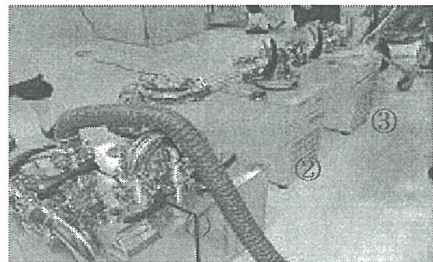


Fig. 1. Equipment Appearance

이번에 개발한 장비는 초저온에서 활성탄의 불활성기체 흡착률이 크게 증가하는 원리를 이용하여 소형으로 제작할 수 있다. 계통은 크게 3단계로 이루어진다. 첫번째 단계에서는 전처리 필터에서 유입된 공기 내의 수분, CO₂, NO₂ 및 입자를 제거한다. 두번째 단계에서는 냉동기를 사용하여 저온에서 활성탄을 이용하여 불활성기체를 1차로 흡착한다. 세번째 단계에서는 액체질소를 이용하여 초저온으로 냉각시켜 활성탄에서 불활성기체를 2차로 흡착한다.

1) 불활성기체 제염계수는 1 (10 CFR 50)

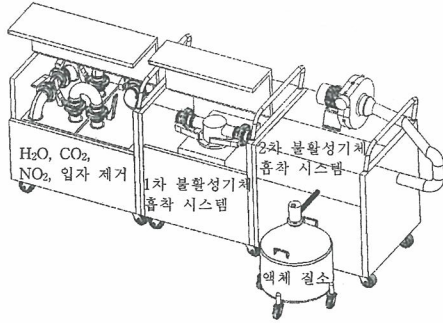


Fig. 2. Equipment Assembly

2.3 성능시험

2.3.1 1차 성능시험(RCS 기체 시료)

Table 1. The 1st Performance Examination

구 분	전 단 (Bq/cc)	후 단(Bq/cc)		
		0.5 시간	1 시간	1.5 시간
^{85m} Kr	1.74×10 ⁰	N/D	N/D	N/D
⁸⁷ Kr	2.00×10 ⁰	N/D	N/D	N/D
⁸⁸ Kr	3.50×10 ⁰	N/D	N/D	N/D
⁸⁹ Kr	4.97×10 ⁻¹	N/D	N/D	N/D
¹³³ Xe	1.71×10 ¹	N/D	N/D	9.86×10 ⁻²
^{133m} Xe	3.75×10 ⁻¹	N/D	N/D	N/D
¹³⁵ Xe	8.57×10 ⁰	1.06×10 ⁻²	3.26×10 ⁻²	2.98×10 ⁻²
^{135m} Xe	7.03×10 ⁻¹	N/D	N/D	N/D
¹³⁷ Xe	1.24×10 ⁰	N/D	N/D	N/D
¹³⁸ Xe	2.11×10 ⁰	N/D	N/D	N/D

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

2.3.2 1차 성능시험(PZR 기상부 시료)

Table 2. The 2nd Performance Examination

구 분	전 단 (Bq/cc)	후 단(Bq/cc)
		1분
¹³³ Xe	2.75×10 ¹	1.60×10 ⁻³
¹³⁵ Xe	2.51×10 ²	5.79×10 ⁻⁴

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

2.3.3 주요 공정별 실증 시험

Table 3. The Actual Examination

공정	성능	공기오염도(DAC)
가압기 M/W 개방	100%	0.14
S/G M/W 개방	100%	*1.07 → 0.2
원자로 Head 배기	100%	0.20

※ 30분 후에는 0.2 DAC로 감소됨

2.4 경제성 평가

2.4.1 경제성 평가 결과

Table 4. Economical Evaluation

평가 대상	연료결합 발생 경우	연료결합 미발생 경우
중사자 피폭저감 금액	34,272,000원	5,140,800원
공기오염에 따른 공정 지연 비용	5,580,000,000원	372,000,000원
정량적 효과금액	56억	3억 8천

2.4.2 경제성 평가 세부 산출 근거

중사자 피폭저감금액과 공기 오염으로 인한 마스크 착용 시 작업 효율 저하에 따른 공정 지연 비용은 다음과 같이 계산했다.

피폭저감금액 = O/H 피폭저감선량²⁾ × 피폭단가³⁾
 공정지연에 따른 손실비용 = 공기오염에 따른 공정 지연일⁴⁾ × 1일 전력 판매 금액⁵⁾

2.4.3 개발 비용 대비 예상 이득

이동형 불활성기체 제거설비의 개발에는 약 9천 만원이 소요되었으며 예상 설계수명은 15년이다. 소형으로 이동이 가능하기 때문에 하나의 설비로 2개 호기에서 약 15년간 사용 가능하다. 이후 운전주기에 대해서도 추가적인 연료결합이 있을 경우를 고려하면 설비 개발에 따른 경제적 이득은 더욱 커질 것이다.

3. 결론

이동형 불활성기체 제거설비를 개발함으로써 O/H 시 중사자피폭선량을 줄일 수 있었으며, 호흡장비 미착용에 의한 작업환경 개선으로 공기지연 방지 및 정비 품질 향상, 방사선안전관리 업무량 감소 등의 유형적인 이득을 취할 수 있었다. 그리고 방사성 기체 방출량을 저감화시킴으로써 지역주민의 신뢰도 향상 및 회사 이미지 상승 등의 무형적인 이득을 기대할 수 있었다.

4. 참고문헌

- [1] 한국원자력연구원, 크립톤 및 크세논 처리기술, 2008
- [2] 영광 제2발전소, 이동형 불활성가스 제거장치 운전, 2010
- [3] 영광 제2발전소, 연료결합시 O/H기간 격납건물내 공기오염도 관리, 2010

2) 집단선량 : 400명(일 출입인원) × 0.12mSv/1명(일 피폭량) × 30일(OH 공정)

3) 피폭단가 : 17\$/man-mSv(KINS Model, Alpha Value in Korea, '07)

4) 마스크 착용 시간(OH, 30일) × 20%(공정 지연비율) = 6일

5) 전력거래용계, 발전처 '09년 발전계획=930,000,000원/일