



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](#)

2016년 2월  
석사학위논문

# 원전 액체 방사성폐기물내 안티몬(Sb) 생성/제거방안 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 옥 성

# 원전 액체 방사성폐기물내 안티몬(Sb) 생성/제거방안 연구

Nuclear power plants generate radioactive waste  
within the liquid antimony(Sb) and removal study

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 옥 성

# 원전 액체 방사성폐기물내 안티몬(Sb) 생성/제거방안 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

이 옥 성

# 이옥성의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

ABSTRACT .....	v
제1장 서론 .....	1
제2장 액체폐기물 계통 및 방사성 핵종 .....	2
제1절 액체폐기물 계통 .....	2
1. 계통 설계 .....	2
2. 계통 구성 .....	3
제2절 한빛3발전소 액체 방사성폐기물 관리 .....	4
1. 연도별 총 액체폐기물 배출 실적 .....	4
2. 연도별 안티몬(Sb) 배출 실적 .....	5
제3절 방사성 핵종 .....	5
1. 원자로냉각재(RCS) 방사성 핵종 .....	5
2. 한빛3발전소 재장전수탱크(RWT) 방사성 핵종 .....	6
3. 주민 및 환경 선량평가 .....	7
제3장 안티몬(Sb) 생성원 및 존재 형태 .....	8
제1절 방사성 핵종 생성과 거동 .....	8
1. 원자로에서 생성되는 방사성 핵종 .....	8
2. 방사화 생성물의 거동 .....	10
3. Sb-122/124 및 Sb-125 생성원 .....	11
제2절 안티몬(Sb) 존재 형태 .....	14

제3절	안티몬(Sb)이 제거되지 않는 이유	15
제4장	안티몬(Sb) 제거 메커니즘 및 제거	16
제1절	안티몬(Sb) 제거 메커니즘	16
제2절	안티몬(Sb) 제거 방법분석	17
제3절	안티몬(Sb) 제거 방안 및 실증시험	18
1.	제거 방안	18
2.	실증 시험	19
제5장	결론	22
참고문헌		24
감사의 글		25

## 표 목 차

표 2.1	연도별 총 액체폐기물 배출 방사능량 .....	4
표 2.2	연도별 안티몬(Sb) 배출 방사능량 .....	5
표 2.3	한빛3발전소 RCS 방사성 핵종 .....	6
표 2.4	한빛3발전소 계획예방정비 현황 .....	6
표 2.5	재장전수탱크(RWT) 방사성 핵종 .....	7
표 2.6	수용탱크(HUT) 방사성 핵종 .....	7
표 2.7	액체폐기물 배출에 따른 유효선량 평가 .....	8
표 3.1	원자로냉각재에서 발견되는 핵종 및 생성원(시료채취후 1~2일) .....	9
표 3.2	시료채취후 1~2주 사이에 측정되는 핵종 .....	10
표 3.3	U-235와 Pu-239의 주요 핵분열 생성물 .....	12
표 3.4	한빛5호기의 Sb-122와 Sb-124 제거량 .....	12
표 3.5	액체방사성폐기물 LRDPS 2회 통과 운전후 안티몬 방사능량 변화 .....	16
표 4.1	이동형 MF/RO막을 이용한 안티몬(Sb) 제거 시험운전 결과 .....	22



## 그림 목차

그림 1.1	액체폐기물처리계통 개략도 .....	3
그림 3.1	핵분열 핵종의 붕괴사슬 .....	13
그림 3.2	안티몬의 Pourbaix Diagram .....	18
그림 4.1	전형적인 안티몬 제거 곡선 .....	18
그림 4.2	이동형 MF/RO막 설비 개략도 .....	19
그림 4.3	이동형 MF/RO막 설비 현장 사진 .....	20
그림 4.4	이동형 MF/RO막 P&ID .....	20
그림 4.5	이동형 MF/RO막 시료분석 장소 .....	21

## ABSTRACT

### Nuclear power plants generate radioactive waste within the liquid antimony(Sb) and removal study

By Lee, Ock Sung

Advisor : Prof. Lee, Goung Jin, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Liquid radioactive waste system of a nuclear power plant is to remove the radioactive material collects various equipment and floor drainage, including radioactive contamination waste water or waste water with radioactive contamination generated during the normal operation period including anticipated operational thinking of the plant and through the control and surveillance functions to discharge the exclusion environment.

A source of liquid radioactive waste nuclear power plant is the reactor coolant containing radioactive products of fission products and metal structures localized radiation. Liquid nuclear waste is collected by a water leakage from the device, such as pumps, valves, as occurs in the process for purifying the reactor coolant, and can be classified into management areas, such as the operator of work clothes, and washing water or the like.

Discharged radioactivity of the liquid has been defined so as not to exceed the limits on emission control standards of the Nuclear Safety and Commission on the power plant site boundary, so that also nuclear Safety Act enforcement order in more than a power plant is also radiation effects are good year of nearby residents due to emissions it is limited. Liquid affected nearby residents due to the discharge of radioactive waste is evaluated by type, type emission nuclear radioactivity, weather conditions, various materials within a radius of 80km community residents exposure dose assessment program(ODCM). For the Hanbit 5&6 and process the liquid radioactive waste using an ion exchange resin to remove the radionuclides.

There are a number of radionuclide atoms in the number generated by the nuclear fission and corrosion products. Liquid radioactive waste has often detected when the species is not defined in the Final Safety Analysis Report(FSAR). In the case of antimony(Sb) is true. antimony(Sb) not removed by the liquid radioactive waste system FSAR not reflected by radionuclides that are not defined in the FSAR the generator. Thus, antimony(Sb) as it is discharged into the environment without being removed during the discharge of the liquid radioactive waste is less than the reference value.

In this, but paper, legal limit the reach not insignificant level of radioactivity liquid nuclear waste discharge investigated the generation cause antimony(Sb) in order to minimize the environmental impact due to the antimony(Sb) emissions in terms of Zero Release, and antimony(Sb) By analyzing the plan to remove and verify the applicability of the field through empirical testing and to contribute to minimizing the environmental impact caused by the liquid radioactive waste discharged from nuclear power plants.

## 제1장 서론

원자력발전소 액체방사성폐기물계통은 발전소의 예상운전사고를 포함한 정상운전기간 동안 발생하는 각종 기기 및 바닥배수 등 방사능 오염폐액 혹은 방사능 오염가능성이 있는 폐액을 수집하여 방사성물질을 제거하고 통제 및 감시를 통해 소외환경으로 배출하는 기능을 수행한다. 이러한 액체폐기물을 처리하는 데는 증발기를 이용한 방식을 세계적으로 폭넓게 사용하여 왔으며 처리 성능면에서 지금도 우수한 결과를 보이고 있다. 그러나 증발기 운전시 농축폐액의 고화처리에 따르는 고체폐기물량의 증가, 폐액 내 존재하는 불순물 및 화학물질에 의한 부식, 막힘, 거품발생 등으로 인한 잦은 고장 및 그에 따른 정비로 인한 작업자 방사선피폭선량의 증가 등의 문제점이 노출되기 시작하였다.

또한 폐액 내 붕산의 결정화 성질 때문에 폐액농축도를 높이는데 제한을 받게 되므로 증발농축기에만 의존하는 폐액처리법으로는 폐기물 감용 효과를 크게 기대할 수 없다. 이러한 문제점을 보완하고자 개선방안을 끊임없이 강구해왔고 미국에서는 대부분의 발전소에서 설비개선을 통해 대체설비인 이온교환수지를 이용하여 액체폐기물을 처리하고 있다.

원자력발전소 액체방사성폐기물의 근원은 핵분열생성물과 방사화된 금속 구조물의 방사화 생성물이 들어있는 원자로냉각재이다. 액체방사성폐기물은 원자로냉각재를 정화하는 과정에서 발생하는 것과 펌프, 밸브 등의 기기로부터 누설된 물을 수집한 것, 그리고 관리구역내 작업자의 작업복 등을 세탁한 물 등으로 구분할 수 있다. 이러한 액체 방사성폐기물을 액체폐기물처리계통(LRS)을 통해 법적 제한치 이내의 방사성농도로 처리한 후 소외로 배출한다.

액체 방사성폐기물계통으로 유입되는 폐액은 그 특성에 따라 고용존 고형물 폐액 탱크, 저용존 고형물 폐액 탱크 및 화학폐액 탱크 등으로 나누어 수집되며 폐액의 분리는 필요한 처리공정에 따라 행해진다. 고용존 고형물 폐액탱크에 수집된 폐액은 대부분 부유물질이 많이 함유되어 있으며, 일반적으로 전기전도도와 방사능준위가 높은 폐액이므로 부유물질을 제거하기 위해 원심분리기로 처리하여 주입탱크로 이송된다. 정

상운전 중 저용존 고형물 폐액탱크에는 여러 건물에서 발생하는 방사능준위가 낮은 저용존 고형물 폐액이 수집된다. 또한 폐수지탱크는 고용존 고형물 폐액탱크의 보조탱크로 사용될 수 있다.

액체에 대한 배출 방사능량은 발전소 부지경계에서 원자력안전위원회 고시의 배출관리기준 상의 제한값을 초과하지 않도록 규정하고 있으며, 또한, 원자력안전법 시행령에서는 배출로 인한 발전소 인근 주민의 방사선 영향이 연간 선량한도를 넘지 않도록 제한하고 있다. 액체방사성폐기물의 배출로 인해 인근 주민이 받는 영향은 배출 핵종별 방사능량, 기상상태, 반경 80 km 이내 지역사회의 각종 자료를 주민선량 피폭평가 프로그램(ODCM)에 입력하여 평가한다. 한빛5·6호기의 경우 방사성핵종을 제거하기 위해 이온교환수지를 이용하여 액체방사성폐기물을 처리하고 있다.

원자로에는 핵분열과 부식생성물에 의해 발생하는 수많은 방사성핵종이 존재한다. 액체방사성폐기물에는 최종안전성분석보고서(FSAR : Final Safety Analysis Report)에 규정되어 있지 않은 핵종들이 종종 검출되는 경우가 있다. 안티몬(Sb)의 경우가 그러하다. 안티몬(Sb)은 FSAR에서 생성원을 규정하지 않은 FSAR 미반영 핵종으로써 액체폐기물처리계통 처리설비인 LRDP(S)Liquid Radwaste Demineralize Package System)에 의해 제거되지 않는다. 따라서, 안티몬(Sb)은 기준치 미만의 액체방사성폐기물 배출시 제거되지 않은 채 그대로 환경으로 배출된다.

이에 본 논문에서는 법적 제한치에는 미치지 못하는 미미한 수준의 방사능농도이지만, 액체 방사성폐기물 배출 Zero Release라는 관점에서 안티몬(Sb) 배출에 의한 환경영향을 최소화하기 위해 안티몬(Sb) 생성원인에 대해 고찰하고, 안티몬(Sb) 제거방안을 분석하고 실증시험을 통하여 현장에 적용 가능성을 확인함으로써 원자력발전소에서 배출되는 액체 방사성폐기물에 의한 환경영향을 최소화하는데 기여하고자 한다.

## 제2장 액체폐기물 계통 및 방사성 핵종

### 제1절 액체폐기물 계통

#### 1. 계통 설계

액체폐기물 처리계통은 원자력발전소 정상운전 기간동안 발생하는 방사능 오염폐액 혹은 오염 가능성이 있는 폐액을 수집하여 처리한 후 배출하는 기능을 하며, 설계기준 연료손상 운전기간동안에도 10 CFR 20의 방사성핵종 농도를 제한치 이하로 방사성핵종 농도를 감소시키기에 충분한 처리 용량, 다중성 및 융통성을 갖도록 설계되었다.

주요기능으로는

- 방사성 및 오염가능성이 있는 액체폐기물 수집
- 액체방사성폐기물 소외로 배출시 배출 허용농도 제한치 이내로 유지되도록 방사성폐액 처리

## 2. 계통 구성

한빛5·6호기 액체폐기물처리계통은 방사성액체 폐액내 고 용존고형물 폐액을 제거하기 위해 원심분리기를 통하여 처리하며, 방사성미립자 및 이온성분을 제거할 수 있는 방사성 폐액 탈염기 처리계통(LRDPS)과 성능향상을 위한 LRDPS 전처리설비인 MF/RO막 등으로 구성되어 있다.

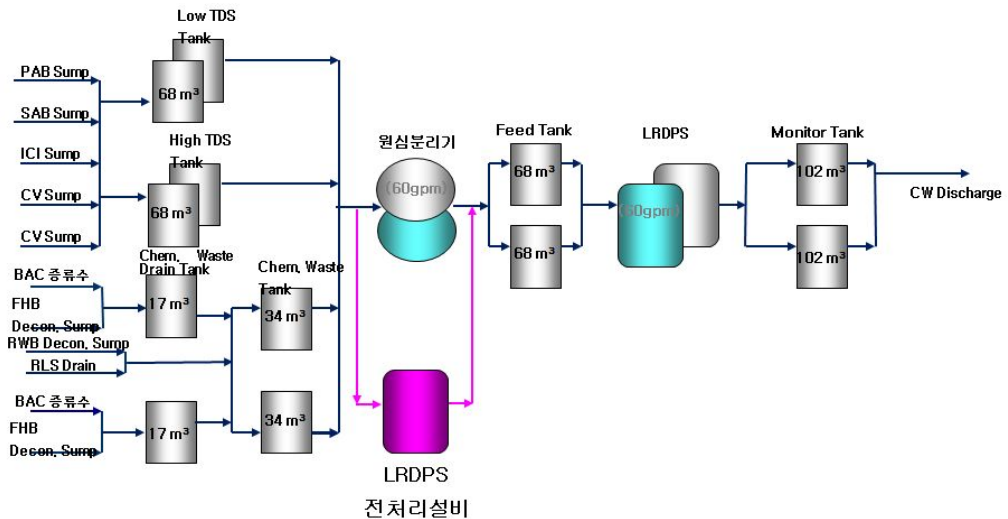


그림 1.1 액체폐기물처리계통 개략도

방사성 폐액 탈염기 처리계통(LRDPS)은 폐액으로부터 방사성 핵종을 흡착/

여과 Bed와 이온교환기 Vessel을 통해 제거되며, 6개의 Vessel로 구성되어 있으며 유입되는 폐액을 연속적으로 처리하도록 설계되어 있다. 방사선관리구역에서 발생하는 특성이 다른 다양한 유형의 액체방사성폐기물은 전량 집수조로 유입되어 서로 혼합되고 이 과정에서 응축수 등 비오염 폐액의 오염 확산으로 대량의 방사성 액체폐기물이 발생하게 된다. 또한, 봉산 및 방식제 합류수, 제염 및 세탁폐수 등 고전도도 폐액과 슬러지 등 고탁도의 농축폐액도 유입된다.

## 제2절 한빛3발 액체 방사성폐기물 관리

### 1. 연도별 총 액체폐기물 배출 실적

한빛3발전소 연도별 액체폐기물 배출량은 배출 설계값을 초과하지 않으나 배출평가 결과 안티몬 핵종이 상당히 많이 차지함을 알 수 있었다. 아래의 표(표 2.1)는 2005년부터 2014년까지 평가된 액체폐기물 배출량이다.

표 2.1 연도별 총 액체폐기물 배출 방사능량

연도(년)	배출농도(TBq)
2005	1.82E-02
2006	1.17E-02
2007	7.52E-04
2008	5.10E-04
2009	7.93E-04
2010	3.33E-05
2011	2.25E-04
2012	4.48E-04
2013	3.42E-04
2014	2.26E-03

#### ○ 배출 설계값

핵분열 및 방사화생성물 배출 설계값은 4.58E-02 TBq 임.

#### ○ 배출 평가

주요 배출핵종으로 Co-58, Sb-125, Co-60, Cs-134, Cs-137 등이 있으며, 높은 배출 방사능농도 핵종 순서 임.

## 2. 연도별 안티몬(Sb) 배출 실적

아래 표(표 2.2)는 한빛3발전소 연도별 액체폐기물 배출량 중 안티몬 핵종의 배출량을 평가한 결과이다. 이와 같이 매년 꾸준히 안티몬 핵종이 배출되고 있음을 알 수 있다.

표 2.2 연도별 안티몬(Sb) 배출 방사능량

연도(년)	배출량(TBq)	
	Sb-124	Sb-125
2005	1.24E-03	6.72E-05
2006	5.00E-04	1.23E-04
2007	1.18E-04	1.58E-04
2008	2.88E-05	6.09E-05
2009	1.75E-05	1.03E-04
2010	LLD 미만	8.11E-06
2011	3.98E-05	1.27E-04
2012	4.97E-05	2.08E-04
2013	1.48E-06	5.40E-05
2014	2.89E-04	5.11E-04

## 제3절 방사성핵종

### 1. 원자로냉각재(RCS) 방사성 핵종

핵연료는 원자로냉각재계통(RCS : Reactor Coolant System)에서 발견되는 다양한 방사성 핵종들을 만들어 내는 일차적인 생성원이라 할 수 있다. 또한 원자로냉각재계통을 구성하는 구조재료 역시 중성자와의 반응을 통해 다양한 핵종을 만들어 낸다. 아래의 표(표 2.3)는 한빛3발전소 원자로냉각재계통에 존재하는 방사성핵종과 그중 FSAR에 미반영된 핵종을 조사, 정리하였다. 안티몬(Sb)은 정상운전중에는 검출되지 않았으며, 계획예방정비기간(표 2.4)에 검출되었다.



표 2.3 한빛3발전소 RCS 방사성 핵종

구분	원자로냉각재(RCS) 핵종	FSAR 미반영 핵종
정상운전 (5호기 9차)	Na-24, Co-58, Rb-88,89 I-132,133,134,135 Xe-135m, Cs-138, Y-88 Ar-41, Kr-85m,87,88 Xe-133,135,138	검출 안됨
계획 예방정비 (5호기 9차)	Na-24, Cr-51, Mn-54,56, Co-57,58,60, Fe-59, Kr-87, Nb-95,97, Zr-95,97 I-124,132,133,134 Ar-41, Xe-133,135,135m Sn-113, <u>Sb-122,124,125</u> Te-132	<u>Sb-122, 124, 125</u>

※ 안티몬 핵종 방사능량

- Sb-124 7.75E-01    - Sb-125 4.12E+00

표 2.4 한빛3발전소 계획예방정비 현황

구분	5호기	6호기	비 고
1차 OH	'03. 3.17~5.28	'03.11.19~'04. 4. 5	
2차 OH	'03.12.31~'04. 4.28	'05. 1.18~2.20	
3차 OH	'05. 5.20~6.26	'06. 2.28~3.29	
4차 OH	'06.11.12~12.10	'07. 6.16~7.19	
5차 OH	'08. 4. 4~5. 8	'08.11. 5~12. 2	
6차 OH	'09. 8.23~9.23	'10. 3.18~4.16	
7차 OH	'10.12.22~'11. 1.16	'11. 6.20~7.14	
8차 OH	'12. 4.30~5.31	'12.11. 6~'13. 1. 3	
9차 OH	'13.12.12~'14. 3.15	'14. 5.16~7.18	

## 2. 한빛 3발전소 재장전수탱크(RWT) 방사성 핵종

안티몬 핵종은 계획예방정비기간 중 원자로냉각재계통 및 액체폐기물계통에서 검출되었다. 따라서 이에 대한 안티몬 유입원을 분석하였다. 그 결과 계획예방정비기간 중 발생하는 안티몬 핵종의 대부분은 재장전수탱크(RWT)에서 유입됨을 알 수 있었다(표 2.5). 또한 그중 일부는 수용탱크(HUT)로 유입되어 다시 재장전수탱크(RWT)로 이동하여 원자로냉각재로 유입되고, 정비작업 등을 위한 계통배수에 의해 액체폐기물계통으로 수집되어 검출되었다.

표 2.5 재장전수탱크(RWT) 방사성 핵종

구분	원자로냉각재(RCS) 핵종	FSAR 미반영 핵종
정상운전 (5호기9차)	Mn-54, Co-58,60 Sb-125, Cs-137	Sb-125 : 9.17E-01
계획 예방정비 (5호기9차)	Cr-51, Mn-54, Co-58,60 Fe-59, Nb-95, Zr-95 Sb-124,125	Sb-124 : 6.43E-01 Sb-125 : 3.39E+00

표 2.6 수용탱크(HUT) 방사성 핵종

구분	원자로냉각재(RCS) 핵종	FSAR 미반영 핵종
정상운전 (5호기9차)	Sb-125, Xe-133, Cs-134,137	Sb-125 : 2.23E-01
계획 예방정비 (5호기9차)	Co-58,60, I-123, Te-123 Sb-124,125, Cs-137	Sb-124 : 2.64E-02 Sb-125 : 2.38E-01

## 3. 주민 및 환경 선량평가

### ○ 주민선량 피폭평가 프로그램(ODCM)

기체 및 액체 방사성폐기물의 방출로 인해 인근 주민이 받는 방사선 영향은 배출 핵종별 방사능량, 기상상태, 반경80km 이내 지역사회의 각종 자료를 발전소 인근 주민선량 피폭평가 프로그램(ODCM : Offsite Dose

Calculation Manual)에 입력하여 평가한다. 당해기간의 기체 및 액체 방사성 배출물의 양에 근거하여 주민피폭선량을 계산하고, 이를 바탕으로 방사성폐기물 배출관리 제한 및 원전 운영에 따른 영향평가를 수행하고 있다. 아래의 표(표 2.7)는 2008년~2012년 까지 한빛본부 액체방사성폐기물 총 방출에 의한 주민선량 평가값으로 기준치 대비 매우 낮은 수준으로 유지되어 있음을 확인하였다. 이는 액체 방사성폐기물 중에서 미량 검출되는 특이 핵종이 주민선량에 미치는 영향은 아주 미미함을 알 수 있었다.

표 2.7 액체폐기물 배출에 따른 유효선량 평가

[단위 : mSv/yr-man]

구분	기준치	주민선량(유효선량)	비고
2008	0.25	7.23E-06	
2009	0.25	8.22E-06	
2010	0.25	3.76E-06	
2011	0.25	4.18E-06	
2012	0.25	2.95E-05	

○ 액체폐기물에 의한 환경영향 평가

액체 폐기물 배출에 의한 피폭선량은 기술지침서에 명시된 제한치와 비교해 볼 때 매우 적은 양으로 주변 주민 및 환경에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 평가되었다.

### 제3장 안티몬(Sb) 생성원 및 존재 형태

#### 제1절 방사성 핵종 생성과 거동

##### 1. 원자로에서 생성되는 방사성핵종

핵연료는 원자로냉각재계통에서 발견되는 수많은 방사성 핵종들을 만들어

낸다. 원자로냉각재계통을 구성하는 재료의 원소들 또한 방사성핵종들로 전환한다. 원자로냉각재 내에서 이러한 방사성 핵종들의 농도, 즉 방사능은 어떤 부품들의 부식을 변화, 핵연료의 건전성 또는 원자로냉각재의 미세한 화학상태 변화를 파악하는 수단이 된다. N-16은 증기발생기 튜브의 누설을 감시하는 아주 유용한 핵종이다. 그러나 N-16은 반감기가 짧아(7초) 1차 계통내 상태나 감시에는 가치가 없다.

원자로냉각재에서 발견되는 방사성 핵종들은 두 가지 과정으로 생성된다.

- 핵연료의 U-235와 기타 다른 핵종들의 핵분열 또는 계통표면에서 트랩프 (Tramp) 핵종들의 핵분열에 의한 생성
- 원자로계통으로 유입되는 화학약품, 물, 불순물 및 부식생성물의 방사화로 의한 생성

표 3.1 원자로냉각재에서 발견되는 방사성 핵종 및 생성원(시료채취 후 1~2일)

Radionuclide	Reaction	Source
$^{58}\text{Co}$	$^{58}\text{Ni}(n,p)$	Nickel Alloys
$^{97}\text{Zr}-^{97}\text{Nb}$	$^{96}\text{Zr}(n,\gamma)$ , FP	Tramp U/Pu, Fuel Cladding
$^{99}\text{Mo}/^{99}\text{Tc}$	FP	Tramp U/Pu, Fuel Stainless steel
$^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$	$^{94}\text{Zr}(n,\gamma)$ , FP	Tramp U/Pu, Fuel Cladding
$^{239}\text{Np}$	$^{238}\text{U}(n,\gamma)$	Fuel
$^{134,136,137}\text{Cs}$	FP	Tramp Pu, Fuel
$^{122}\text{Sb}$	$^{121}\text{Sb}(n,\gamma)$	Start up source, RCP bearing alloy
$^{86}\text{Rb}$	FP	Tramp U/Pu, Fuel
$^{89}\text{Zr}$	$^{90}\text{Zr}(n,2n)$	Fuel clad
$^{187}\text{W}$	$^{186}\text{W}(n,\gamma)$	Weld Rod Residue, Stellite
$^{81}\text{Cr}$	$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)$	Stainless steel Corrosion
$^{54}\text{Mn}$	$^{54}\text{Fe}(n,p)$	Corrosion
$^{60}\text{Co}$	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)$	Cobalt bearing components

표 3.2 시료채취 후 1~2주 사이에 측정되는 핵종

Radionuclide	Reaction	Source
$^{140}\text{Ba}$ - $^{140}\text{La}$	FP	Tramp U/Pu, Fuel
$^7\text{Be}$	$^7\text{Li}(p,n)$ , FP	Lithium hydroxide
$^{59}\text{Fe}$	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)$	Corrosion
$^{75}\text{Se}$	$^{74}\text{Se}(n,\gamma)$	RCP Oil Contaminant
$^{47}\text{Ca}$ - $^{47}\text{Sc}$	$^{46}\text{Ca}(n,\gamma)$	Contaminant in additive chemicals
$^{241}\text{Am}$	TRU	Fuel
$^{110m,108m}\text{Ag}$	$^{109,107}\text{Ag}(n,\gamma)$	Control Rod Wear
$^{94}\text{Nb}$	$^{93}\text{Nb}(n,\gamma)$ , FP	Fuel Clad, Fuel
$^{103}\text{Ru}$	FP	Fuel
$^{124,125}\text{Sb}$	$^{123}\text{Sb}(n,\gamma)$ , $^{124}\text{Sn}(n,\gamma)$	Startup Source, RCP Bearing alloy, Fuel clad
$^{65}\text{Zn}$	$^{64}\text{Zn}(n,\gamma)$	Corrosion, Chemical additive
$^{46}\text{Sc}$	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)$	Trace element in Zinc Cladding
$^{60}\text{Co}$	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)$	Cobalt bearing components
$^{57}\text{Co}$	$^{57}\text{Fe}(p,n)$	Stainless steel
$^{109,115m}\text{Cd}$	$^{108}\text{Cd}(n,\gamma)$ , $^{114}\text{Cd}(n,\gamma)$	Control Rod, Wear

## 2. 방사화 생성물의 거동

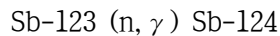
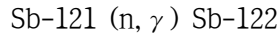
핵연료 결합이 없을 경우 방사화생성물은 RCS 액체 시료의 감마 방사능의 대부분을 차지한다. 주요한 영향 핵종은 Co-58, Mn-56, Co-60, Na-24, Be-7, Cr-51 그리고 511 keV의 소멸 피크의 기여 핵종인 C-11, N-13 및 F-18 이다.  $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ - $^{97}\text{Nb}$  의 전이평형 쌍은 핵연료 피복재로부터 지르코늄의 방사화 결과이다. 이들 방사성 핵종들의 방사능은 핵연료의 상태에 관계없이 상대적으로 일정하다.

어떤 구성품의 표시자로 이용되는 방사성 핵종은 상당히 중요하다. Ag-110m는 원자로 제어봉으로부터 나온다. 따라서 만약 제어봉 재질이 침식 되면 Ag-110m 농도가 증가하게 된다. Sb-122,124,125는 유출수펌프 베어링 감손이 있을 때 생성되며, Sb-125는 원자로냉각재 펌프 밀봉재(seal)의 감손을 의

미하고, Sb-122, Sb-124는 2차 중성자에 의한 손상을 의미한다.

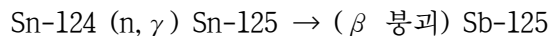
### 3. Sb-122/124 및 Sb-125 생성원

원전 일차계통에서 생성되는 Sb-122와 Sb-124는 안티몬 원소인 Sb-121(천연 동위원소비 57.2%)과 Sb-123(천연 동위원소비 42.8%)의  $(n, \gamma)$  반응에 의해 생성된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다;



원자로의 가동이나 정지 후 재기동시에 사용하는 중성자 선원을 2차 중성자 선원이라고 하는데, 보통 스테인레스강 피복재 내에 Sb-Be 합금이 캡슐화 되어 있다. 2차 중성자 선원 중의 안티몬 원소의 방사화에 의해 Sb-122와 Sb-124가 생성되며, 이렇게 생성된 Sb-122와 Sb-124는 노심 내에 위치한 중성자 선원의 피복재 손상에 의해 일차 냉각재로 유입되기도 한다. 국내 원전의 경우 2000년대 중반 이후부터 무 중성자 선원 장전 운전[Sb-Be의  $(\gamma, n)$  반응을 이용하지 않고 조사된 연료에 포함된 Cm-242, Cm-244의 자발핵분열 이용]을 적용하면서 중성자 선원의 손상에 의한 Sb-122/124 핵종의 냉각재 유입원이 제거된 상황이다. 하지만 Sb-122와 Sb-124는 2차 중성자 선원 이외에도 RCP(Reactor Coolant Pump) 씬(Seal)(안티몬 원소를 함유한 흑연 베어링)의 열화에 의해 일차 냉각재로 유입되기도 한다. 최근에는 Sb-122와 Sb-124 핵종에 의한 선량을 증가를 예방하기 위해 RCP 씬의 재질도 Sb-free 재질로 변경되는 추세이다.

원전 일차계통에서 검출되는 Sb-125는 지르코늄 합금의 미량 성분원소인 Sn-124(천연동위원소비 5.8%)의 방사화에 의해 생성된 Sn-125의  $\beta$  붕괴에 의해 생성된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다;



Sn-125의 반감기는 9.64일인 반면, Sb-125의 반감기는 2.8년이다. 따라서 지르코늄 합금의 미량성분인 Sn-124의 방사화에 의해 Sn-125가 생성되면, 상대적으로 짧은 기간 내에 Sb-125와 방사평형을 이루게 된다.

한편, Sb-125는 핵분열 과정에서도 생성될 수 있는 핵종이나, 분열수율은 0.03~0.1 % 정도로 낮다(표 1 참조). 따라서 일차계통 환경에서 검출되는 대부분의 Sb-125는 핵분열 핵종이기보다는 Sn-124의 방사화 핵종으로 간주됨이 타당하다.

표 3.3 U-235와 Pu-239의 주요 핵분열 생성물

핵종	반감기	분열 수율 (%)		
		U-235	Pu-239	(U+Pu) / 2
Br-84	31.80 m	0.967	0.444	0.706
Kr-85m	4.48 h	1.300	0.565	0.933
Kr-85	10.72 y	0.285	0.128	0.207
Kr-87	1.34 h	2.520	0.990	1.755
Kr-88	2.84 h	3.550	1.320	2.435
Sb-125	2.76 y	0.029	0.115	0.072
Rh-105	35.40 h	0.972	5.360	3.166

한빛 제3발전소의 경우 7주기 이후부터 2차 중성자 선원을 장전하지 않고 있으며, 또한 RCP Seal 재질 역시 2002~2003년 사이에 Carbon Carbide에서 Sb-free 재질인 Silicon Carbide 재질로 변경한 바 있다. 따라서 현 시점에서는 일차냉각재로 Sb-122와 Sb-124를 제공하는 주요 생성원은 일단 제거된 것으로 판단된다. 표 3.4는 한빛5호기 7차~9차 정지시 화학처리 기간 동안 일차냉각재를 통해 제거된 Sb-122와 Sb-124 핵종의 양을 보여주고 있다.

표 3.4 한빛5호기의 Sb-122와 Sb-124 제거량

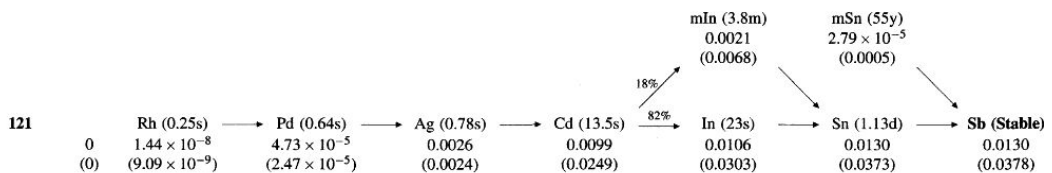
(단위: GBq)

구 분	7주기	8주기	9주기
Sb-122	70	70	72
Sb-124	8	13	44

비록 앞서 언급했던 주요 생성원이 모두 제거되었음에도 불구하고, 표 3.4에 서처럼 여전히 일차계통 내에는 안티몬 핵종의 생성원(Sb-121와 Sb-123)이 존재

하고 있는 것으로 판단된다. 더욱이 Sb-122와 Sb-124의 반감기가 각각 2.7일과 60일인 점을 생각한다면 이러한 추론은 타당한 것으로 보인다. 현 시점에서 고려될 수 있는 안티몬 핵종의 생성원은 다음과 같다.

- 각종 펌프류의 성능 향상을 목적으로 탄소 베어링 재질에 안티몬 원소가 포함되어 있다는 점을 감안한다면 RCP 이외에도 유출수 계통의 펌프 재질도 확인해볼 필요가 있다.
- 정상운전 중 안티몬 핵종은 주로 입자상의 형태로 존재한다. 즉, 이전 주기에 일차계통으로 유입된 Sb-121과 Sb-123은 정상운전 중에는 CVCS 정화계통을 통해 잘 제거되지 않고, 계통 크러드에 침적된 형태로 존재하고 있을 가능성이 높다. 그러다가 발전소 정지시 과산화수소의 주입으로 인해 산화환경이 형성되면 이 중 일부가 이온성으로 전환되면서 제거될 수 있다. EDF나 Palo Verde 등의 발전소에서는 안티몬 핵종의 농도가 증가되면 이들 핵종의 제거량 증가를 위해 발전소 정지시 과산화수소의 주입량을 늘리거나, 과산화수소 주입 이후의 용존산소 농도를 3 ppm 이상 유지하는 전략을 활용하기도 한다.
- 안티몬 원소는 스테인레스강 재료의 불순성분으로 존재하므로 스테인레스강의 일반부식에 의해 냉각재로 용출될 수 있다. Ringhals 원전에서 제공한 자료에서는 일반부식에 의한 안티몬 원소의 용출량은 1~1.5 g 수준으로 보인다. 일단 냉각재로 용출된 안티몬 원소는 노내 방사화에 의해 Sb-122와 Sb-124 핵종으로 변환된다.
- Sb-122와 Sb-124의 선구물질(precursor)인 Sb-121과 Sb-123 역시 핵분열에 의해 생성 가능하다(그림 3.1 참조). 하지만 Sb-125와 마찬가지로 분열 수율이 매우 낮기 때문에 핵분열에 의한 생성 가능성 역시 낮은 것으로 판단된다.





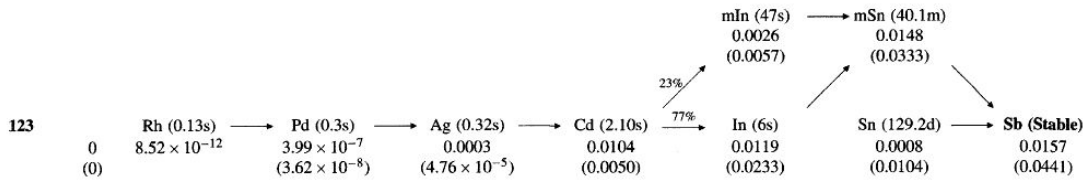


그림 3.1 핵분열 핵종의 붕괴사슬

## 제2절 안티몬(Sb) 존재 형태

안티몬은 pH와 산화환원 전위에 의해 -3가~+5가의 형태로 존재할 수 있다. 일반적인 액체 방사성폐액 조건에서는(pH는 6~9 범위, 산화환원 전위는 +0 이상; 그림 3.2의 사각형 부분 참조) 대부분 입자상의  $\text{HSbO}_2$ 나 음이온인  $\text{Sb}(\text{OH})_6^-$ 의 형태로 존재한다. 따라서 안티몬은 음이온교환수지로 제거 가능하다. 발전소의 운전 경험에 따르면 안티몬 핵종은 단기간에만 제거되고, 이후에는 잘 제거되지 않는 특성을 보인다. 안티몬에 대한 수지의 선택도는 붕산과 유사하며, 타 음이온에 비해 선택도가 매우 낮다. 따라서 신 수지에 대해서는 잘 제거되는 현상을 보이다가, 이후에는 수지에 의해 제거된 안티몬 핵종이 액체 방사성폐액 중의 타 핵종에 의해 재용출되는 현상을 나타낸다(그림 4.1 참조).

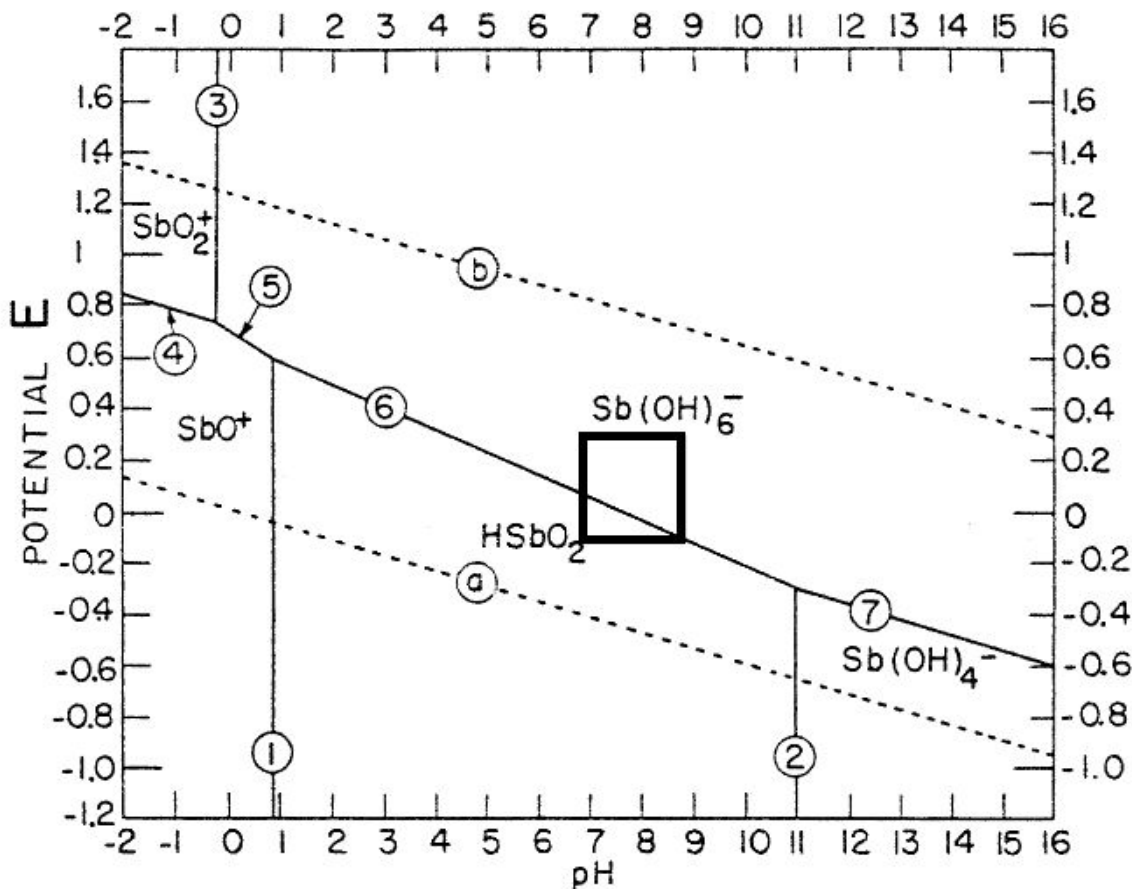


그림 3.2 안티몬의 Pourbaix Diagram

### 제3절 안티몬(Sb) 제거되지 않는 이유

안티몬(Sb)이 포함된 액체방사성폐기물이 액체폐기물처리계통 방사성 폐액 탈염기 처리계통(LRDPS)에 방사성미립자 및 이온성분을 제거하고 통과한 후 단에서 Sb-124/125가 검출되며, 이를 제거하기 위해 방사성 폐액 탈염기 처리계통(LRDPS) 재순환 운전을 반복 수행하여도 안티몬(Sb)은 제거되지 않았다. Co-60 의 대부분의 핵종들은 LRDPS 통과 운전 후 제거되거나 일부 검출이 되긴 하였으나 방사능농도는 감소되었다. 그러나 Sb-124, Sb-125 핵종은 LRDPS 통과 후에도 제거되지 않고 그대로 검출되었다.(일부 농도 변화는 희석효과로 판단됨) Co-58의 경우는 LRDPS 재처리 운전 후에도 검출되긴 하나

방사능농도가 감소하므로 LRDPS 처리운전이 타당하나, Sb-124, Sb-125 핵종은 LRDPS 수지탑으로 제거 되지 않으므로 LRDPS 처리 운전은 불필요한 것으로 판단되었다.

안티몬(Sb)이 제거되지 않는 이유에 대해 검토한 결과 안티몬(Sb)은 타 음이온에 비해 선택도가 매우 낮아 신 수지에서는 단기간 잘 제거되다가 이후에는 수지에 의해 제거된 안티몬(Sb) 핵종이 타 핵종에 의해 재 용출됨을 알았다.

표 3.5 액체방사성폐기물 LRDPS 2회 통과 운전 후 안티몬 방사능량 변화

구분	총 감마방사능량(Bq/cc)		
	전	후	
		1회	2회
액체 폐기물 (A)	<Co-58 등 8종> - total : 9.19E+00 - Co-58 : 8.54E+00 - <u>Sb-124</u> : 1.78E-01 - <u>Sb-125</u> : 2.56E-01	- Co-58 : 2.37E-02 - <u>Sb-124</u> : 1.39E-01 - <u>Sb-125</u> : 2.24E-01	- Co-58 : 5.78E-03 - <u>Sb-124</u> : 1.28E-01 - <u>Sb-125</u> : 1.89E-01
액체 폐기물 (B)	<Co-58 등 12종> - total : 2.23E+01 - Co-58 : 1.81E+01 - <u>Sb-124</u> : 1.11E+00 - <u>Sb-125</u> : 1.47E+00	- Co-58 : 1.04E-02 - <u>Sb-124</u> : 7.24E-02 - <u>Sb-125</u> : 1.12E-01	- Co-58 : 7.53E-03 - <u>Sb-124</u> : 7.27E-02 - <u>Sb-125</u> : 1.18E-01

## 제4장 안티몬(Sb) 제거 메커니즘 및 제거

### 제1절 안티몬(Sb) 제거 메커니즘

Sb-124,125 핵종은 산화수 범위가 넓고 이온화 경향이 약하기 때문에 제거가 어려운 핵종으로 알려져 있으며, 일반적인 원전 폐액의 수화학적 환경(pH 6~9, ORP 0 이상)에서 대부분 미세한 입자상이나 음이온 형태로 존재하나, ORP가 200 mV 이하에서 대부분 입자상으로 존재할 가능성이 높다. 이온상태의 안티몬은 음이온교환수지에 의해 제거되나 친화력이 낮아서 유입수의 pH 변화에 의해 음이온수지에 포집된 안티몬이 방출될 수 있다. 특히, 폐액에 붕

산이 함유되어 있으면 음이온 수지는 붕산에 대한 친화력이 더 크기 때문에 안티몬을 유출시키므로 탈염기 유입수 보다 유출수의 안티몬 농도가 높아질 수 있음

## 제2절 안티몬(Sb) 제거방법 분석

그림 4.1에서 [Region 1] 구간은 신 수지에 의해 안티몬 핵종의 제거가 순조롭게 이루어지는 구간을 나타내며, [Region 2] 구간은 액체 방사성폐액에 포함된 기타 음이온 핵종이 지속적으로 제거되면서 수지에 의해 기 제거되었던 안티몬 핵종이 다시 용출되는 구간을, [Region 3]은 일부 한빛3발전소의 경우처럼 유입수의 안티몬 농도에 비해 유출수의 안티몬 농도가 더 커지는 구간을 의미한다.

그림 3.2와 4.1에서 살펴보았듯이 음이온 상태의 안티몬 핵종을 수지에 의해 제거하기는 매우 어렵다. 미국 Oconee 원전에서는 안티몬 핵종의 제거율을 높이기 위해 음이온 상태( $\text{Sb}(\text{OH})_6^-$ )의 안티몬 핵종을  $\text{HSbO}_2$ 의 입자성 핵종으로 변환시켜 미세필터를 통해 제거하려는 노력을 시도한 바 있다. 결과적으로 pH를 낮춰 입자성 핵종으로 변환시키는 방법은 그다지 효과적이지 않았으나, 환원제인  $\text{SnCl}_2$ 를 활용하는 방법이 안티몬 핵종의 제거효율을 높이는 데 효과적인 것으로 나타났다(50~100 ppm  $\text{SnCl}_2$ 와 10 ppm의 고분자전해질 물질(응집 효과 향상). 이외에도 EPRI에서는 증발기(evaporator)의 활용이 안티몬 핵종 제거에 효과적이라고 언급하고 있다. 한빛 제3발전소에서는 폐기물 처리계통에 증발기가 없는 이온교환수지탑(LRDPS)를 채택하고 있으므로 미세입자의 제거가 가능한 타 설비(예: 미세 여과막 등)의 적용을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

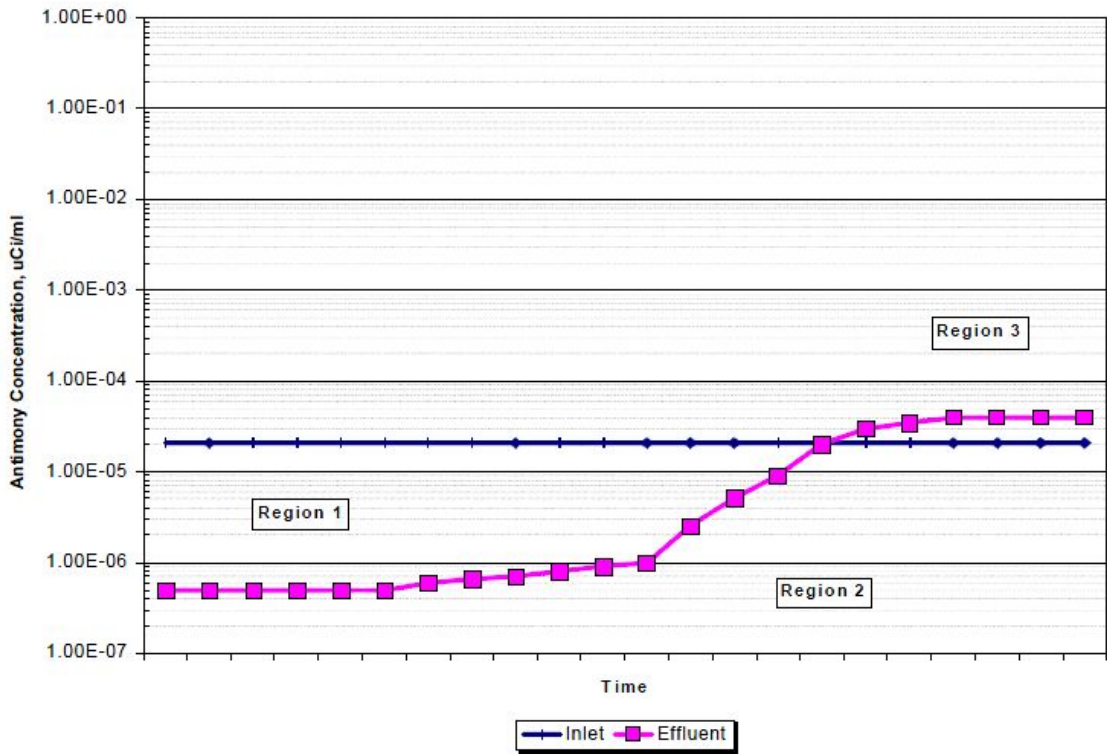


그림 4.1 전형적인 안티몬 제거 곡선

### 제3절 안티몬(Sb) 제거 방안 및 실증시험

#### 1. 제거 방안

LRS에서 방사성폐액을 처리하기 전에 핵종분석을 수행하여 안티몬 핵종이 전혀 검출되지 않는(LRDPS 최종처리수 핵종분석시 안티몬의 MDA값 미만) 경우를 제외하고, 모든 폐액을 MF/RO 설비로 전처리후 LRDPS로 최종처리 하면 배출수의 안티몬 핵종 농도가 대폭 저감될 수 있을 것으로 판단된다.

한빛56호기의 액체방사성폐기물 처리 현황을 보면, 계획예방정비 중 발생한 세탁폐액을 화학폐액탱크를 통하여 LRS로 이송하여 처리하고 세탁폐액은 보풀 등이 MF막에 미치는 영향과 낮은 TDS 농도를 반영하여 원심분리기를 이용하여 전처리 후 LRDPS로 처리하고 있으며, 다량의 방사성폐액이 발생한 경우에도 처리용량이 큰 원심분리기로 전처리하고 있다. HTDS 및 LTDS 폐액은

처리용량이 가능한 범위내에서 MF/RO설비로 전처리하고 있으며, 특히, 계획 예방정비 중 발생한 세탁폐액에는 코발트, 안티몬, 니오븀 핵종이 함유될 가능성이 매우 높다. 따라서, 원심분리기에서 제거될 수 없는 입자상/이온성 안티몬 핵종은 LRDPS 공급탱크로 유입되어 LRDPS로 최종 처리되지만, LRDPS의 이온교환수지탑을 대부분 통과하게 되고, LRDPS 공급탱크로 유입된 안티몬 핵종은 미량이지만 지속적으로 잔류하여 LRDPS 최종처리수에서 지속적으로 검출되고 있다. LRDPS 전처리설비인 MF/RO 설비의 처리수에는 안티몬 핵종이 거의 검출되지 않을 것으로 보이나, MF/RO 처리수에 대한 주기적인 핵종분석이 수행되지 않았다. 따라서 안티몬(Sb)이 검출된 액체방사성폐기물을 별도 수집하여 미세입자의 제거가 가능한 이동형 MF/RO막 설비로 운전하여 안티몬(Sb)을 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 실증 시험

### 가. 이동형 MF/RO막 개략도 및 구성

#### ○ 개략도

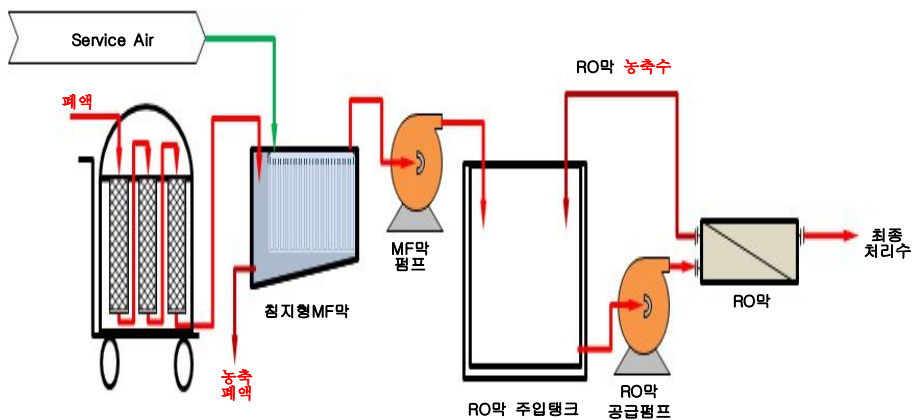


그림 4.2 이동형 MF/RO막 설비개략도

#### ○ 구성 및 제원

- MF : 0.4 마이크론 이상 입자 제거
- RO : 0.001 마이크론 이상 이온 및 입자 제거
- MF막 고-액분리조 및 RO막 공급탱크

- 폐액처리량(설계) : 0.5 m<sup>3</sup>/h

※ Bag Filter

MF/RO막 보호 및 정화 효율향상을 위해 입자가 큰 이물질 제거용으로 필요시 사용 (크기 : 200 $\mu$ m, 50 $\mu$ m, 1 $\mu$ m)



그림 4.3 이동형 MF/RO막 설비 현장 사진

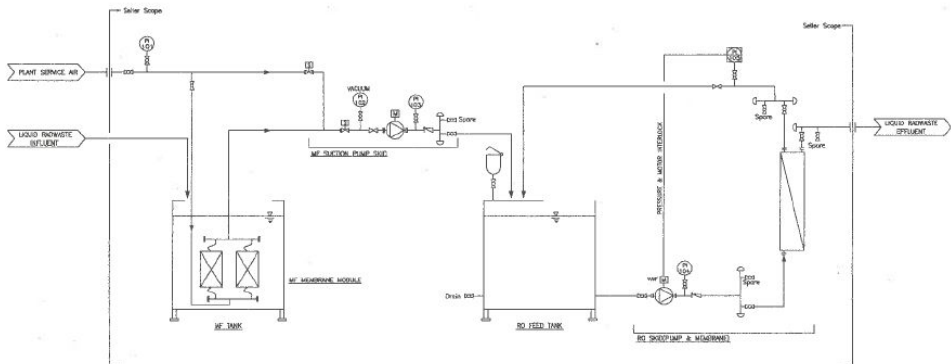


그림 4.4 이동형 MF/RO막 P&ID

## 나. 시험 결과

실증시험에 사용된 이동형 MF/RO막 설비는 입자상 핵종(0.4 $\mu$ m 이상)은 정밀여과(MF)막에 의해 제거되며, 더 미세한 입자나 콜로이드 및 이온성 핵종은 역삼투(RO)막에서 제거된다. 이에 본 논문에서는 안티몬 핵종이 함유된 폐액을 이동형 MF/RO막 설비를 이용하여 안티몬 핵종 제거를 시도하

였으며, 안티몬 제거 실증실험(2015.10)에서 안티몬을 제거 할 수 있음이 입증 되었다. 또한 안티몬 이외의 핵종 방사능량도 약 1/100 정도로 감소됨을 알 수 있었다. 그림 4.5는 폐액의 시료채취 및 분석 장소이다.

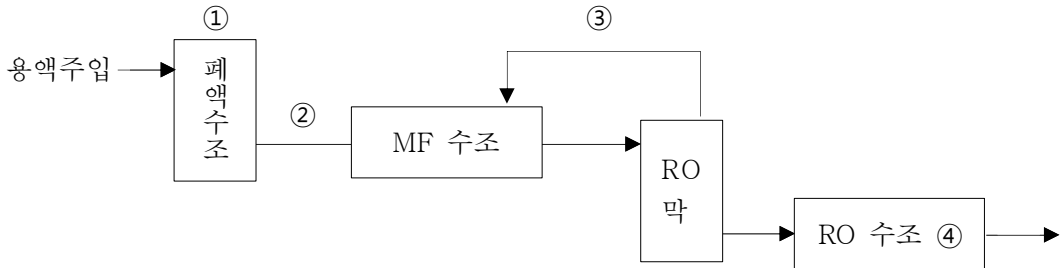


그림 4.5 이동형 MF/RO막 시료분석 장소

본 시험을 위해 안티몬(Sb)이 함유된 재장전수탱크 저장수를 이동형 MF/RO막 운전 조건에 맞는 조건의 시료로 만든 후 이동형 MF/RO막 설비로 운전하여 표 4.1과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 폐 액 량 : 350 리터
- 운전시간 : 16분
- 처 리 량 : 350 리터



표 4.1 이동형 MF/RO막을 이용한 안티몬(Sb) 제거 시험운전 결과

구 분		1회		2회	
		운전 전	운전 후	운전 전	운전 후
붕산농도(ppm)		743	330	743	360
pH		5.98	8.21	6.49	8.03
전도도( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		22.4	406	48.7	373
운전시간(분)		3		3	
유량율( $\ell/\text{pm}$ )		22		22	
폐액수조 시료① (Bq/ml)	총 비방사능	4.28E+00		4.25E+00	
	Sb-124 비방사능	1.60E-01		1.49E-01	
	Sb-125 비방사능	3.73E-01		3.30E-01	
MF 처리수 시료② (Bq/ml)	총 비방사능	3.68E+00		3.17E+00	
	Sb-124 비방사능	1.59E-01		1.64E-01	
	Sb-125 비방사능	3.76E-01		4.00E-01	
RO처리 재순환시료③ (Bq/ml)	총 비방사능	2.09E+01		1.88E+01	
	Sb-124 비방사능	2.00E-01		2.23E-01	
	Sb-125 비방사능	1.73E+00		1.63E+00	
RO 처리수 시료④ (Bq/ml)	총 비방사능	5.29E-02		4.33E-02	
	Sb-124 비방사능	MDA 미만		MDA 미만	
	Sb-125 비방사능	MDA 미만		MDA 미만	

## 제5장 결론

본 논문에서는 안티몬(Sb) 생성원과 존재 형태, 안티몬(Sb)이 제거되지 않는 이유에 대해 연구해 보았고, 미미한 수준의 방사능농도 일지라도 환경으로의 배출을 최소화 하고자 안티몬(Sb) 제거방안을 고찰하였다. 원자력발전소 일차 계통에서 생성된 방사성 핵종은 일차냉각재를 매개로 고체, 액체 및 기체 방사성폐기물로 배출된다. 연료손상 또는 트랩프 우라늄에 의해 핵연료에서 생

성된 핵분열 핵종은 냉각재에 항상 존재할 수 있다. 안티몬(Sb)의 경우 핵분열 핵종 또는 핵분열 핵종의 붕괴에 의해 생성 가능하고, 냉각재 자체 또는 냉각재 중의 불순물과 부식생성물의 방사화에 의해서도 생성 가능하다. 액체 방사성폐기물 방출의 의한 안티몬(Sb)로 인근 주민이 받는 방사선 영향을 발전소 인근 주민선량 피폭평가 프로그램(ODCM)을 활용하여 평가한 결과를 보면 기준치 대비 매우 낮은 수준으로 유지됨을 알 수 있다.

기준치보다는 매우 낮은 수준의 액체방사능 농도이지만 환경으로 배출되므로 배출되는 액체방사성폐기물 중 상당부분을 차지하는 안티몬(Sb)을 액체방사성폐기물에 의한 환경영향 최소화라는 관점에서 접근하여 제거하기로 하였다. 이온교환수지탑(LRDPS)에서는 선택도가 매우 낮아 新수지 외에는 제거되지 않는 안티몬(Sb)을 MF/RO막을 이용하여 안티몬(Sb)를 제거하는데 성공하였다. 또한, MF/RO막 설비는 안티몬(Sb) 이외의 다른 핵종들의 방사능양도 약100분의 1로 감소시키는 결과(표 4.1)를 나타냈다.

이와 같은 결과는 향후 MF/RO막 설비를 발전소 액체폐기물계통의 이온교환수지탑(LRDPS)의 전처리설비로 이용하거나 또는 보조설비로 이용하는 것보다 액체폐기물계통의 주 설비로써 설계 및 설계변경하여 이용함으로써 액체방사능량 배출량 저감은 물론 이온교환수지탑(LRDPS)의 이용능력 향상에 따른 수지 교체시기를 연장함으로써 폐수지 교체폐기물을 저감할 수 있다. 이러한 결과는 원전의 방사성폐기물 배출 및 생성 최소화라는 목표달성은 물론 지역주민 수용성 증대라는 2가지 측면에서 개선할 수 있는 기준점을 제시하였다.

## 참고문헌

- [1] Chien C. Lin, Radiochemistry in Nuclear Power Reactors, National Academy Press, Washington D.C., 1996.
- [2] Pressurized Water Reactor Primary Water Chemistry Guidelines: Volume 1, Revision 6. EPRI, Palo Alto, CA: 2007. 1014986.
- [3] 한빛5호기 9차 정지시 화학처리 결과 보고서. 한빛원자력본부 3발 화학기술팀, 2014.
- [4] PWR 원전 특이핵종 생성원인 규명 연구(Draft). 한수원중앙연구원, 2014.
- [5] Pressurized Water Reactor Rprimary Water Chemistry Guidelines: Volume 2, Revision 7(Draft). EPRI, Palo Alto, CA: 2014(to be published).
- [6] Improved Antimony Removal by a Chemical Treatment and Microfiltration Process. EPRI, Palo Alto, CA, and Duke Power Company, Charlotte, NC: 1998. TR-109443.
- [7] Strategies for Managing Liquid Effluents - Options, Actions, and Results. EPRI, Palo Alto, CA: 2003. 1008015.
- [8] 액체폐기물처리계통(LRS) 프로세스 개선을 통한 방사성폐기물 저감
- [9] 원자력발전소 방사선관리 연보. 한국수력원자력. 2014
- [10] 한국수력원자력(주), 한빛5,6호기 최종안전성분석보고서
- [11] 원자력안전법(법률 제12666호, 2014. 5.21)
- [12] 원자력안전법 : 원자력안전위원회 고시(방사선.01) "방사선방호 등에 관한 기준 고시" 제6조 배출관리기준
- [13] 원자력 수화학 편람. 한국원자력연구원. 동화기술. 2009.

## 감사의 글

현재 회사의 초급간부로 재직하면서 다른 한편으로는 아내와 세 아이를 둔 가장으로서 대학원에 입학하여 학업을 한다는 것이 너무 자신의 욕심만 부리는 게 아닌가 하는 생각이 들었다. 그리고 학업과 업무를 병행한다는 것에 대한 두려움도 조금은 있었다. 하지만 조선대학교와 한빛원자력본부간의 산학협력으로 시행되고 있는 석박사 과정은 나에게는 또 하나의 기회가 될 것 이라 생각했다. 주경야독하는 것이 결코 쉽지는 않았지만 훌륭한 교수님과 동료 대학원생들이 나에게는 힘이 되었던 것 같다.

이렇게 시작한 대학원 학업이 벌써 2년의 세월이 흘러가고 석사논문을 제출하기에 이르렀다. 지도를 위해 멀리 광주에서 오신 조선대학교 원자력공학과 정운관 교수님, 송종순 교수님, 이경진 교수님, 김진원 교수님, 나만균 교수님께 감사의 인사를 드립니다. 특히, 부족한 저에게 많은 지도를 해 주시고, 따뜻한 격려와 용기까지 주신 이경진 교수님께 깊숙이 머리 숙여 감사의 인사를 드립니다.

그리고, 논문작성에 필요한 조언과 토론 그리고 자료 추천까지 도움을 주신 동료인 최성주 차장님께도 고맙다는 말씀 전하고 싶습니다.

마지막으로, 이러한 결실이 있기까지 마음으로 응원해 준 아내와 아빠의 이러한 노력을 이해 준 아이들에게도 감사하며, 특히 학업에 지장이 없도록 넓은 아량을 베풀어 주신 서승남, 황의환 팀장님께도 감사 마음을 전합니다.

2015년 10월

이 옥 성

## 저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20147271	과 정	석사
성 명	한글 : 이 옥 성      한문 : 李 鈺 成      영문 : Lee Ock Sung				
주 소	전남 영광군 홍농읍 상하리 한수원사택 118동 804호				
연락처	E-mail : leeos725@khnp.co.kr				
논문제목	원전 액체 방사성폐기물내 안티몬(Sb) 생성/제거방안 연구				
	Nuclear power plants generate radioactive waste within the liquid antimony(Sb) and removal study				

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(      )

2015년 10월

저작자:    이 옥 성      (인)

## 조선대학교 총장 귀하