



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](#)

2011년 2월
석사학위논문

이온교환법을 적용한 원전의
방사성폐액 처리방법 개선방안 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 복 열

이온교환법을 적용한 원전의
방사성폐액 처리방법 개선방안 연구

A Study on the Improvement of Liquid Radioactive Waste Treatment
System at Nuclear Power Plant By Applying Ion Exchange Method

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 복 열

이온교환법을 적용한 원전의
방사성폐액 처리방법 개선방안 연구

지도교수 송 종 순
공동지도교수 김 진 원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 복 열

박복열의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이경진 (인)

위 원 조선대학교 교수 나만균 (인)

위 원 조선대학교 교수 송종순 (인)

2010년 11월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	iii
그림 목차	iv
ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 범위 및 방법	2
제 2 장 방사성폐액처리설비에 대한 고찰	3
제 1 절 설계 및 운전특성에 따른 분류	3
1. 단일 증발설비	3
2. 이중 증발설비	3
3. 원심분리기 및 선택성이온교환설비	4
4. 역삼투압설비	4
제 2 절 방사성폐액처리설비 운영 현황	5
1. 국내외 원전 현황	5
2. 영광5,6호기 방사성폐액처리설비	8
제 3 절 문제점 분석	14
1. 기준값 검토	14
2. 운전형태별 원인 분석	14
제 3 장 신규설비 도입 및 운영방법 개선	17
제 1 절 신규설비 도입	17
1. 전처리설비 설치	17
2. BAC 용존산소제거설비 설치	26
제 2 절 운영방법 개선	34
1. 불산폐액 회수	34
2. 세탁폐액 처리	39
3. 함유폐액 처리	47

제 3 절 효과 분석	52
1. 전처리설비 설치	52
2. BAC 용존산소제거설비 설치	54
3. 부상폐액 회수	55
4. 기타	56
제 4 장 결론	57
참고문헌	58

표 목 차

표 1.1	방사성폐액 처리 최적화를 위한 검토 분야	2
표 2.1	국내 원전 방사성폐액처리설비 현황	5
표 2.2	미국 내 PWR 원전 방사성폐액처리설비 현황	6
표 2.3	이온교환기 충전물	10
표 2.4	영광5,6호기 방사성폐액 유입량	12
표 2.5	LRS 기준 값	14
표 2.6	LRS 성능시험 결과	15
표 3.1	전처리설비 적용사례	18
표 3.2	고분자 막분리 종류	19
표 3.3	실험결과(MF-NF-RO 배열)	21
표 3.4	실험결과(UF-NF-RO 배열)	22
표 3.5	방사능 준위(폐액)별 성능시험 결과	24
표 3.6	붕소농도별 성능시험 결과	25
표 3.7	원전별 RMWT 관리 현황	29
표 3.8	용존산소 제거방식 비교	30
표 3.9	미국 원전 붕산 환경배출기준	35
표 3.10	원심분리기의 세탁폐액 처리전·후 방사성핵종 농도 변화	44
표 3.11	세탁폐액이 LRS 통과시 전기전도도 변화	46
표 3.12	해외 원전 기름 제거설비 운영 현황	50
표 3.13	LRDPS 충전물 교체 현황	52
표 3.14	200ℓ 드럼으로 환산한 양	53
표 3.15	영광5호기 6주기 BAC 운전 현황	54
표 3.16	순수 생산단가 구성	55

그림 목차

그림 2.1	방사성폐액처리계통 구성	8
그림 2.2	원심분리기 개략도	9
그림 2.3	탈염기계통 구성	11
그림 3.1	Membrane별 여과 크기	18
그림 3.2	MF 막 원리	19
그림 3.3	RO 막 구조	20
그림 3.4	실험장치 배열(MF-NF-RO)	21
그림 3.5	실험장치 배열(UF-NF-RO)	21
그림 3.6	전처리설비 신설(안)	23
그림 3.7	붕산농축기 개략도	26
그림 3.8	우회배관 신설 개념도	27
그림 3.9	PWR형 원전의 방사성폐액 처리 개념도	28
그림 3.10	용존산소제거설비 신설(안)	31
그림 3.11	중공사막모듈탈기장치 원리	32
그림 3.12	중공사막모듈탈기장치 구성	33
그림 3.13	3D 도면 작성 프로그램	37
그림 3.14	붕산수 회수 개념도	38
그림 3.15	붕산수 회수 유로	38
그림 3.16	RWT 수위 변화 그래프	39
그림 3.17	LRS로 처리시 세탁폐액의 TOC 농도 변화	42
그림 3.18	원심분리기의 세탁폐액 처리전·후 TOC 농도 변화	43
그림 3.19	LRDPS의 세탁폐액 처리시 TOC 농도 변화	44
그림 3.20	LRDPS의 세탁폐액 처리시 방사성핵종 농도 변화	46
그림 3.21	LRS의 세탁폐액 처리시 방사능 농도 변화	46

ABSTRACT

A Study on the Improvement of Liquid Radioactive Waste Treatment System at Nuclear Power Plant By Applying Ion Exchange Method

By Park, Bok Yeol

Adviser : Prof. Song, Jong Soon, Ph.D.

Prof. Kim, Jin Weon, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Liquid radioactive waste treatment method of using evaporator was widely used from Kori 1 to Uljin 3&4, but a liquid radioactive waste treatment method that uses an ion exchange method instead of an evaporator was adopted aiming to minimize amount of radioactive waste and radiation exposure. However, the same equipment was introduced and applied for the first time in Korea and had experienced difficulties in securing credibility for the equipment and handling of liquid radioactive waste with inadequate data about performance and experience in operation and maintenance. In this study, examination, application, and effect analysis was performed on the optimization measure for handling liquid radioactive waste of Yonggwang Nuclear Power Unit 5 and 6(YGN 5&6) that applies an ion exchange method.

When special liquid radioactive waste or high level radioactive waste are flowed into the Liquid Radwaste System(LRS), concentration of the processed liquid waste only satisfies design basis value($1.85\text{E}-01\text{Bq/cc}$) of LRS but intermittently can't satisfy plant standard($1.85\text{E}-02\text{Bq/cc}$) of YGN 5&6. Therefore domestic and overseas application cases were studied to improve performance of an ion exchange equipment through the pretreatment of liquid radioactive waste flowed into LRS.

The distillate water occurring during operation of Boric Acid Concentrator(BAC) should be collected with Reactor Makeup Water Tank(RMWT), however it is transferred to LRS and processed because of high concentration of dissolved oxygen within the distillate water as RMWT limits the concentration of dissolved oxygen to 0.1ppm. This is because fuel cladding can be damaged if BAC distillate water that includes with RMWT and used as supplementary water for a Reactor. However, there is a possibility of operation failure of LRS if the distillate water, which is created about 109m³ per day when BAC is operated consecutively, is flowed into LRS with liquid radioactive waste occurring during normal operation as it exceeds capacity of LRS. In order to solve this problem, installation of a new dissolved oxygen removal equipment was promoted and it was set as that the dissolved oxygen concentration the entrance must satisfy less than 100ppb when the dissolved oxygen concentration of the BAC distillate water flowed based on the design standard is less than 1000ppb.

Cooling water remaining in the bottom of tank or the pipe located under the pump at the time of drainage for maintenance operation at the primary cooling water that contains the boric acid water can't be collected to the collection tank and drained to the floor of building, so it increasing amount of liquid radioactive waste. Therefore the boric acid water was collected with Refueling Water tank(RWT) by developing a 3D drawing program using AUTO CAD and a compulsory drainage method through compressed air pressurizing in order to collect boric acid water that is disposed.

Effects according to improvement of the liquid radioactive waste treatment method were analyzed as follows.

First, LRDPs filling exchange volume had decreased after installing the pretreatment equipment. If it is converted into the 200ℓ waste drum, it is so about 30drums are reduced yearly.

Second, installation of the dissolved oxygen removal equipment to collect BAC distillate water to RMWT and to resue it can reduce about 10 million won of demineralized water supplementary cost per 1Rx-year(based on 1 unit).

Third, if boric acid is collected by applying the 3D drawing program and the compulsory draining method then more than about 700 million won of financial benefits can be gained through reduction of drainage time when the relevant operation is the main process of the maintenance period.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

우리나라는 1978년 고리1호기가 상업운전을 시작한 이후 현재 총 20기의 원자력발전소가 상업 운전되고 있는데 각 발전소별로 다소 상이한 방사성폐액처리방식을 적용하고 있다. 방사성폐액처리계통은 발전소의 예상운전사고를 포함한 정상운전 기간 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.

방사성폐액을 처리하기 위해 증발기를 이용한 방식을 세계적으로 폭넓게 사용하여 왔으며 처리 성능 면에서 우수한 결과를 보였다. 그러나 증발기 운전 시 농축폐액의 고화처리에 따르는 고체방사성폐기물량의 증가, 폐액 내에 존재하는 불순물 및 화학물질에 의한 부식 및 막힘, 거품발생 등으로 인한 잦은 고장 및 정비로 인한 작업자 방사선 피폭선량의 증가 등의 문제점이 발생하기 시작했다. 또한 폐액 내 붕산의 결정화 성질 때문에 폐액 농축도를 높이는데 제한을 받게 되므로 증발기에만 의존하는 폐액처리법으로는 폐기물 감용 효과를 크게 기대할 수 없게 되었다. 이러한 문제점을 보완하고자 개선방안을 끊임없이 강구해 왔고 미국의 대부분의 발전소^[6]에서는 증발기 대체설비인 이온교환설비를 이용하여 방사성폐액을 처리하고 있다.

국내원전의 경우 고리 1호기 이후 울진 3,4호기까지 증발기를 이용한 폐액 처리방식이 주류를 이루다가 영광 5,6호기부터 폐기물 발생량 저감 및 작업자의 방사선 피폭 최소화를 목표로 증발기 대신 원심분리기 및 선택성이온교환설비를 이용한 폐액 처리방식을 도입하였다. 그런데 동 설비가 국내 최초로 도입, 적용됨에 따라 성능관련 자료가 미흡할 뿐만 아니라 운영 및 정비경험이 축적되지 않아 설비의 신뢰성 확보 및 방사성폐액 처리에 어려움을 겪은 바 있다. 또한 운전연수 경과에 따른 원심분리기의 성능저하와 계획예방정비기간 중 발생하는 다량의 악성 폐기물로 인한 방사성폐액처리계통의 과부하를 경감시킬 필요성이 끊임없이 대두되었다. 따라서 본 연구에서는 현재 운전 중인 방사성폐액처리계통의 설비측면의 문제점을 분석하여 개선안을 제시하였고 또한 운전측면의 보완사항을 검토하여 반영함으로써 이온교환설비를 적용한 방사성폐액 처리계통이 최적으로 운전될 수 있는 방안을 고찰하였다.

제 2 절 연구 범위 및 방법

이온교환설비를 적용하고 있는 영광5,6호기를 대상으로 방사성폐액 처리 최적화 방안을 수립하기 위해 검토 분야를 다음과 같이 분류하였다.

표1.1 방사성폐액 처리 최적화를 위한 검토 분야

검토 분야		검토 항목
폐액 수집처리		<ul style="list-style-type: none"> · 봉산농축기(BAC) 증류수 · 세탁폐액 · 화학폐액(제염폐액) · 함유폐액 · 하절기 응축수 처리
설비 운영	원심분리기	<ul style="list-style-type: none"> · 성능개선 · 응집제 사용 · 우회운전
	이온교환설비 (탈염기)	<ul style="list-style-type: none"> · 성능개선 · 수지관리 · 재순환운전
폐액 배출처리		<ul style="list-style-type: none"> · 배출관리 · 사고폐액 처리 · 봉산수 처리

표1.1의 검토 분야 중 주 처리설비인 원심분리기 및 이온교환설비의 부하를 줄여서 효과적인 방사성폐액 처리를 가능토록 하기 위해서는 방사성폐액의 발생을 근본적으로 저감할 수 있는 폐액 수집처리 및 설비운영 분야에 대한 검토가 우선되어야 하며 폐액 수집처리 분야는 투자비가 적으면서 단기간 내에 개선효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었다. 따라서 영광5,6호기 방사성 폐액 처리설비의 개선방안을 도출하기 위해서 각종 시료를 이용한 실험을 통해 이온교환설비의 구체적인 문제점을 분석하였으며 분석결과를 근거로 설비보완 및 운전방법 개선방안을 제시하였다.

설비보완 측면으로는 신규설비 도입 또는 운영 중인 설비의 개선을 고려하였으며 개선안을 도출하기 위해 국내외 원전의 운영사례 조사 및 분석, 계약 및 설계측면의 하자 여부 검토를 수행하였다. 또한 운전방법 개선을 위해 운전 및 정비측면의 보완 필요성, 배출 목표치의 적절성, 방사성폐액 처리와 관련된 각종 규제기준 등을 검토하였다.

제 2 장 방사성폐액처리설비에 대한 고찰

제 1 절 설계 및 운전특성에 따른 분류

1. 단일 증발설비

초기에 국내의 원전에 도입된 설비로 호기별 처리개념 및 단순 방출개념으로 설계되었다. 고리1,2호기 및 울진1,2호기가 포함된다. 동 설비에서 방사성폐액은 처리방법에 따라 세탁 및 Hot Shower 탱크, 바닥배수탱크 및 방사성폐액수용탱크 등 3개의 탱크에 수집된다. 세탁 및 Hot Shower 탱크에 수집된 폐액은 단순 여과 처리되며 바닥배수 폐액은 여과 및 탈염처리공정을 거친다. 방사성폐액수용탱크에 수집된 방사성폐액은 증발설비에 의해 처리되며 증발설비에서 처리된 증류수는 탈염 처리된다.

동 설비의 특징은 저 용량의 단일 증발설비를 적용하고 있다는 것이며 다중성 개념이 적용되지 않아서 운영 중 단일 증발설비 고장으로 인해 방사성폐액의 처리에 문제가 발생할 수 있다.

2. 이중 증발설비

동 설비의 계통 구성은 단일 증발설비와 유사하나 처리용량이 증가되었으며 운전성 향상을 위해 다중성 개념으로 설계되었다. 고리3,4호기, 영광1,2,3,4호기, 울진 3,4호기가 해당된다. 방사성폐액은 처리방법에 따라 3개의 처리경로(고용존고형물폐액, 저용존고형물폐액, 화학폐액)로 구분된다. 제염폐액은 화학폐액 처리경로로 이송되어 여과 처리되며 저용존고형물폐액은 여과 및 탈염 처리된다. 고용존고형물폐액은 증발설비에 의해 처리되며 증발설비에서 처리된 증류수는 탈염 처리된다. 계통 운전성 향상을 위해 예상운전과도상태를 수용할 수 있는 용량으로 설계되었고 계통 신뢰성 향상을 위해 2대의 증발설비가 설치되었다.

동 설비는 여과기 교체빈도 증가, 유입폐액에 동반되는 유분 및 부유고체로 인한 증발설비의 기능 저하 등과 같은 문제점이 발생할 수 있다. 증발설비는 제염성능이 우수함에도 불구하고 다음과 같은 문제점^[6]이 발생하면서 대체설비 도입의 필요성이 제기되었다.

1) 기포발생

콜로이드 상 액체 또는 표면장력 억제제 및 미세한 고체를 함유한 방사성폐액을 증발처리할 때 발생되며 이를 방지하기 위해서는 폐액중의 비누, 세제 등의 기포유발 물질의 유입을 최소화해야 한다. 기포가 발생되면 증발기의 액면높이를 증가시켜 증발기 상부의 증발공간을 감소시키므로 충분히 증발이 이루어지지 않고 제염계수가 감소하는 원인이 된다.

2) 물방울 형성

비등이 급격한 경우에 발생되며 이로 인한 제염계수 저하를 막기 위해 증발기 내 액면과 증기 출구사이에 충분한 공간을 확보해야 한다.

3) 물방울 동반

증발시 증기상에 존재하는 액적이 침강하지 않고 증기와 함께 이동하는 현상으로 이 현상은 증기속도가 커질수록 현저해지며 증발시 제염계수 저하에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중의 하나이다. 비말동반에 의한 방사성핵종의 이동을 감소시키기 위해 사이클론 분리기 또는 충전탑이 사용된다.

3. 원심분리기 및 선택성이온교환설비

동 설비는 여과방식 및 증발기 대신 원심분리기 및 이온교환설비를 채택하고 있으며 영광5,6호기와 울진5,6호기가 해당된다. 원심분리기 및 이온교환설비는 각각 유럽 및 미국의 원전에서 성능이 검증된 설비이며 동 설비에서 발생하는 폐수지 및 슬러지 발생량은 증발기의 농축폐액 및 폐 여과기 발생량에 비해 매우 적어서 고체 방사성폐기물 발생량이 감소되고 증발기가 없어서 정비원의 방사선 피폭 감소 및 정비비용이 감소되는 장점이 있다.

4. 역삼투압설비

역삼투압설비는 3.0항의 원심분리설비 대신 역삼투압설비를 적용하고 있다. 처리 효율성 증대와 처리된 폐액의 재사용율 증대를 위해 역삼투압설비 및 이온교환설비를 적용한다. 역삼투압설비는 미국 Surry 및 Wolf Creek 원전에서 사용하고 있다. 국내의 경우는 신고리1,2호기^[10]와 신월성1,2호기가 역삼투압설비 및 이온교환설비를 적용하여 설계되었다.

제 2 절 방사성폐액처리설비 운영 현황

1. 국내외 원전 현황

국내 원전에서는 방사성폐액 처리 최적화를 위해 지속적으로 설비개선을 추진해 왔는데 현황은 표2.1과 같다. 한편 미국은 대부분의 원전에서 이온교환기를 주 처리설비로 사용하고 있으며 현황은 표2.2와 같다.

표2.1 국내 원전 방사성폐액처리설비 현황

발전소명	상업운전년도	최초설계 (주 처리설비)	설비개선
고리1호기	1978	증발기	
고리2호기	1983	증발기	선택성이온교환설비 전처리설비
고리3호기	1985	증발기	
고리4호기	1985		
영광1호기	1986	증발기	
영광2호기	1986		
영광3호기	1994	증발기	
영광4호기	1995		
영광5호기	2002	원심분리기/ 선택성이온교환기	
영광6호기	2003		
울진1호기	1988	증발기	선택성이온교환설비 전처리설비
울진2호기	1989		
울진3호기	1997	증발기	
울진4호기	1998		
울진5호기	2004	원심분리기/ 선택성이온교환기	
울진6호기	2005		
신고리1호기	2010.12.31(예정)	역삼투압설비/ 선택성이온교환기	
신고리2호기	2011.12.31(예정)		

표2.2 미국 내 PWR 원전 방사성 폐액처리설비 현황^[6]

발전소명	용량(MWe)	상업운전	주 처리설비
Palo Verde 1	1221	1986	증발기
Palo Verde 2	1221	1986	증발기
Palo Verde 3	1221	1988	증발기
Calvert Cliff 1	825	1975	이온교환기
Calvert Cliff 2	825	1977	이온교환기
Robinson 2	683	1971	이온교환기
Shearon Harris	860	1987	이온교환기
Braidwood 1	1120	1988	이온교환기
Braidwood 2	1120	1988	이온교환기
Byron 1	1105	1985	이온교환기
Byron 2	1105	1987	이온교환기
Zion 1	1040	1973	이온교환기
Zion 2	1040	1974	이온교환기
Haddam Neck	590	1968	이온교환기
Indian Point 2	975	1974	이온교환기
Palisades	780	1971	증발기
Catawba 1	1129	1985	이온교환기
Catawba 2	1129	1986	이온교환기
Mcguire 1	1129	1981	이온교환기
Mcguire 2	1129	1984	이온교환기
Oconee 1	846	1973	이온교환기
Oconee 2	846	1974	이온교환기
Oconee 3	846	1974	이온교환기
Beaver Valley 1	810	1976	이온교환기
Beaver Valley 2	833	1987	이온교환기
Waterford 3	1075	1995	이온교환기
St.Luce 1	839	1976	이온교환기
St.Luce 2	839	1983	이온교환기

표2.2 미국 내 PWR 원전 방사성폐액처리설비 현황^[6]

발전소명	용량(MWe)	상업운전	주 처리설비
Turkey Point 3	666	1972	이온교환기
Turkey Point 4	666	1973	이온교환기
Crystal River 3	825	1977	이온교환기
Alvin W Vogtle 1	1100	1987	이온교환기
Alvin W Vogtle 2	1097	1989	이온교환기
Three Miles Island 1	786	1974	증발기
South Texas Project 1	1250	1988	이온교환기
South Texas Project 2	1250	1989	이온교환기
Donald C. Cook 1	1020	1975	이온교환기
Donald C. Cook 2	1090	1978	이온교환기
Maine Yankee	860	1972	이온교환기
Indian Point 3	965	1976	이온교환기
Seabrook	1150	1990	이온교환기
Millstone 2	875	1975	이온교환기
Millstone 3	1149	1986	이온교환기
Prairie Island 1	503	1973	이온교환기
Prairie Island 2	500	1974	이온교환기
Fort Calhoun	478	1973	이온교환기
Diablo Canyon 1	1073	1985	이온교환기
Diablo Canyon 2	1087	1986	이온교환기
Salem 1	1106	1977	이온교환기
Salem 2	1106	1981	이온교환기
R.E. Ginna	470	1970	이온교환기
Virgil C. Summer	885	1984	이온교환기
San Onofre 2	1070	1983	이온교환기
San Onofre 3	1080	1984	이온교환기
Josept M. Farley 1	814	1977	이온교환기
Josept M. Farley 2	822	1981	이온교환기

2. 영광5,6호기 방사성 폐액처리설비

2.1 계통구성

영광5,6호기 방사성 폐액처리설비의 구성 및 기능은 다음과 같다.

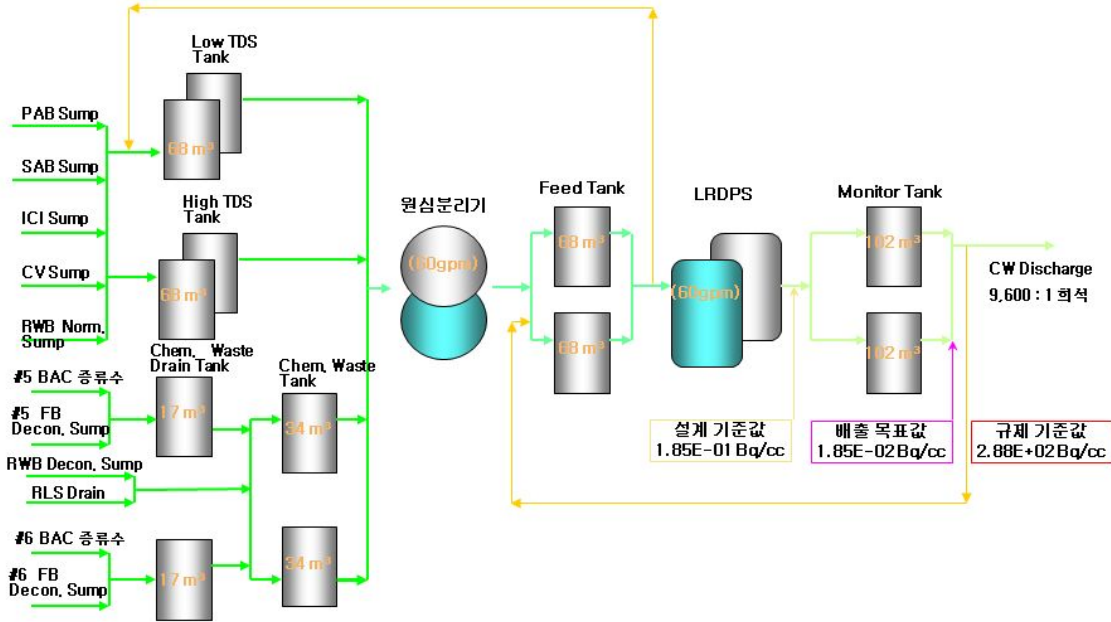


그림2.1 방사성 폐액처리계통 구성

2.1.1 원심분리기(Centrifuge)

원심분리기는 방사성 폐액 내에 포함된 부유입자를 제거하여 탈염기계통의 성능을 향상시킨다. 디켄터, 세퍼레이터, 정량펌프, 슬러리펌프, 슬러리탱크 등으로 구성되어 있으며 필요시 원심분리기로 처리하기 전에 폐액을 침전제로 전 처리하여 원심분리기의 성능을 높여 준다. 원심분리기는 선택적이온교환설비 전단에 위치하며 폐액 내 부유물을 분리 및 탈수, 유리수를 포함하지 않는 슬러지(Sludge)를 생성하여 55갤런 드럼에 포장하는 기능을 갖추고 있다. 폐액 내 부유물질 및 입자상 방사성물질(Cobalt)의 제거효율을 높이기 위해 Decanter내에 응고침전제를 첨가하도록 설계되어 있다. 원심분리기의 슬러지 농축도는 체적비의 3%로서 체적 감용이 우수하며 정상운전 중 다음과 같은 특성을 갖는 폐액을 처리하는데 적합하도록 설계되었다.

- 1) pH : 6~8
- 2) Specific Conductivity : 20~72 $\mu\text{s}/\text{cm}$
- 3) 붕소농도 : 820 ppm
- 4) Total Organic Carbon : 4~65 ppm
- 5) Total Suspended Solid : 185 ppm
- 6) Activity
 - Co-58 : 1.52e+02 Bq/cc
 - Co-60 : 1.70e+01 Bq/cc

원심분리기는 입자상 방사성 핵종인 Cobalt에 대해 제염계수(Decontamination Factor)가 10 미만이며 폐액내 직경 6mm이상까지의 부유물을 제거하고 탈수하는 Decanter(수평형 원심분리기)와 직경 0.1 μm 까지의 부유물을 분리하여 슬러리(Slurry)형태로 슬러리탱크에 저장하는 Separator(수직형 원심분리기)로 구성된다.

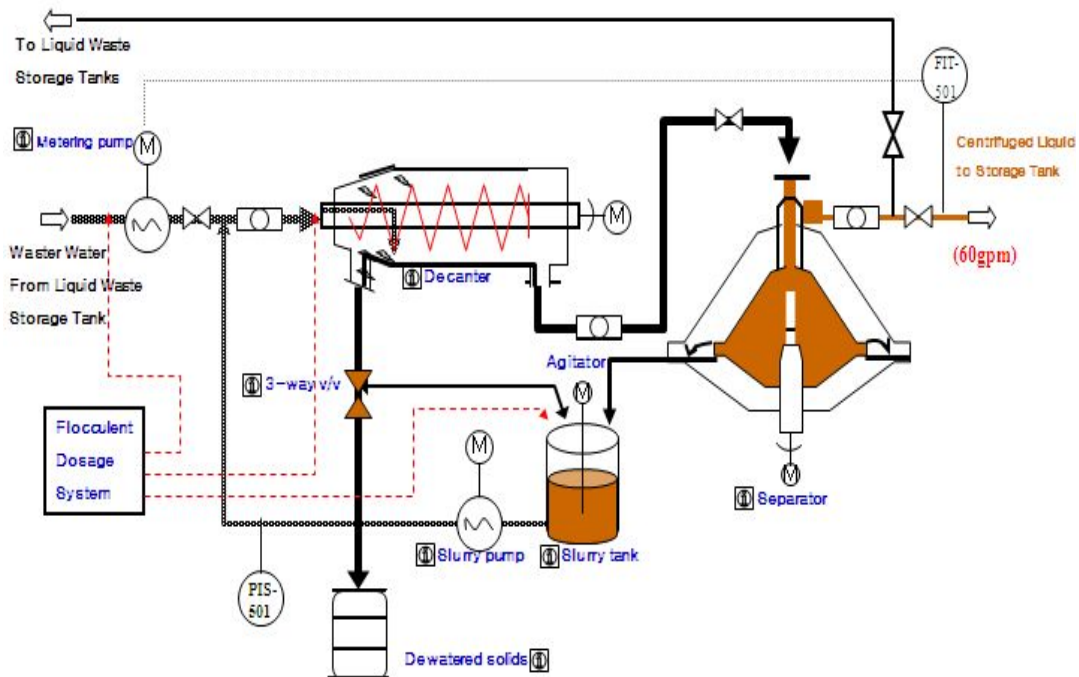


그림2.2 원심분리기 개략도

2.1.2 LRDPS(Liquid Radwaste Demineralizer Package System)

방사성폐액내 주 방사성 핵종인 Cesium, Cobalt 및 그 외 이온들(Sodium, Potassium, Calcium, Magnesium)을 각각 대응하는 이온교환수지에 의해 선택적으로 제거하는 설비로서 다음과 같이 구성된다.

- 1) 활성탄(유기물)흡착탑 : 2대
- 2) Cs 선택성이온교환탑 : 1대
- 3) 음이온교환탑 : 1대
- 4) 양이온교환탑 : 1대
- 5) 혼합(정화)이온교환탑 : 1대

표2.3 이온교환설비 충전물

항목	활성탄흡착탑	Cs선택성이온교환탑	양이온교환탑	음이온교환탑	정화이온교환탑
충전물 사양	CN-400-20	D-230	CN-200	CN-100	CN-300
재질	Activated Carbon	Inorganic	Poly Styrene	Poly Styrene	Poly Styrene
교환탑수	2대×2계열	1대×2계열	1대×2계열	1대×2계열	1대×2계열
총 충전량	6.8m ³	2.55m ³	2.55m ³	2.55m ³	2.55m ³

방사성폐액내에 함유되어 있는 콜로이드성 물질 및 기름 성분 등의 유기물질 흡착을 위해 활성탄이 충전된 유기물질흡착탑(활성탄베드)이 전단에 2대 설치되어 있으며 다량의 기름이 유입될 경우 병렬 또는 직렬로 운전할 수 있도록 되어 있다. 세슘은 알카리금속으로 원자로냉각재중에 양이온으로 존재하고 있으나 기존의 유기이온수지로 처리할 경우 다량의 비방사성 양이온도 제거하여 일찍 포화되어 수지의 수명이 단축된다. 따라서 양이온중 비방사성이온을 제외한 세슘만을 선택적으로 제거할 수 있는 무기이온교환수지가 1대 설치되어 있다. 양이온탈염기는 원자로냉각재중에 함유되어 있는 코발트 핵종의 제거를 위해 설치되어 있으며 마지막으로 유기성 양이온과 음이온수지를 섞어 양이온, 음이온 모두를 제거할 수 있는 혼상탈염기가 설치되어 있다.

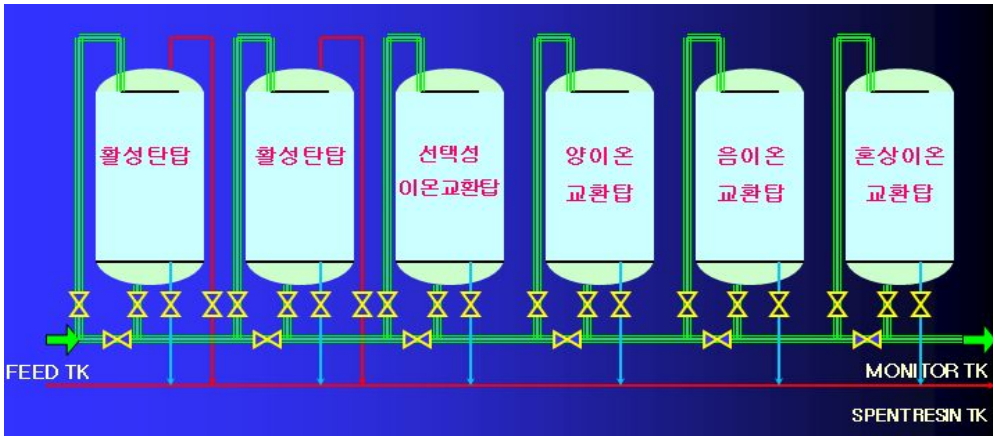


그림2.3 탈염기계통 구성

선택성이온교환설비는 정상운전 중 다음과 같은 특성을 갖는 폐액을 처리하도록 설계되었다.

- 1) pH : 6~8
- 2) Specific Conductivity : 20~72 $\mu\text{s}/\text{cm}$
- 3) 붕소농도 : 800 ppm
- 4) Total Organic Carbon : 4~65 ppm
- 5) Total Suspended Solid : < 10 ppm
- 6) Activity
 - Co-58 : 1.517e+01 Bq/cc
 - Co-60 : 1.702e+00 Bq/cc
 - Cs-134 : 2.405e+01 Bq/cc
 - I-131 : 1.406e+02 Bq/cc

2.2 계통운전

2.2.1 방사성폐액 유입원

표2.4에서 알 수 있듯이 방사성폐액의 주 유입원은 고용준고형물폐액, 저용준고형물폐액, 화학폐액, 세탁폐액으로 구분되며 2차측 복수탈염기 재생 시 발생된 폐수는 일반화학폐수 처리절차에 따라 처리하다가 증기발생기 튜브 누설과 같은 사고가 발생할 경우에는 액체폐기물처리계통으로 유입시켜 처리한다.

표2.4 영광5,6호기 방사성폐액 유입량

발생원	일일 예상 발생량(gpd/호기)	비고
고용존/저용존 고형물폐액 · 원자로냉각재펌프 밀봉수 · 1차냉각재 누설 및 기타 · 폐수지탱크 배수 · 1차냉각계통 기기 배수 · 보조건물 기기 배수 · 보조건물 바닥 배수 · 1차시료채취계통 배수 · 핵연료건물 바닥 배수	20 10 10 500 80 200 200 700	66%
화학폐액 · 기기 및 지역제염 폐액	400	15%
세정제 폐액 · 세탁폐액 · 샤워폐액	300 200	19%
2차계통 오염으로 인한 복수탈염기 재생폐액 ^{주)} · 고용존고형물폐액 · 저용존고형물폐액 · 화학폐액	20,000 20,000 10,000	

주) 일반적으로 바다로 방출되며 오염 준위가 제한치 이상일 때 액체폐기물처리계통으로 유입시켜 처리한다.

2.2.2 방사성폐액별 처리방법

1) 방사성 세탁수 처리

오염 가능지역으로부터 발생된 세탁수, 세면수 및 출입통제건물 바닥배수 등을 수집하여 시료분석결과 폐액의 방사능 준위가 낮은 경우 방사성세탁계통 배수 필터로 처리한 뒤 액체방사성폐기물계통 방출배관을 거쳐 소외방출하고 방사능 준위가 높은 경우에는 화학폐액배수탱크로 이송하여 처리한다.

2) 저용존고형물 처리

정상운전 중 저용존고형물탱크에는 여러 건물에서 발생하는 방사능 준위가 낮은 저용존고형물폐액이 수집된다. 또한 폐수지탱크로부터의 분리수 및 수지 이송수도 저용존고형물탱크에 수집된다. 필요시 저용존고형물탱크는 고용존고형물탱크의 보조탱크로도 사용될 수 있다. 저용존고형물탱크에 수집된 폐액은 대부분 전기전도도와 방사능 준위가 낮은 폐액이므로 대부분의 저용존고형물폐액은 주입탱크로 이송하여 탈염기계통에서 처리한다. 탈염기계통에서 처리된 폐액은 감시탱크로 이송하여 고용존고형물폐액과 같은 공정으로 처리된다.

3) 고용존고형물 처리

정상운전 시 고용존고형물탱크에는 핵연료건물, 1차 보조건물, 2차 보조건물 및 방사성폐기물건물 내 바닥 및 기기 배수와 격납건물 내 바닥 배수들이 수집된다. 또한 복수탈염기 재생폐액과 증기발생기취출계통 오염폐액도 고용존고형물탱크에 수집된다. 고용존고형물탱크에 수집되는 폐액은 대부분 부유물질이 많이 함유되어 있으며 일반적으로 전기전도도와 방사능 준위가 높은 폐액이므로 부유물질을 제거하기 위해 원심분리기로 이송한다. 원심분리기에서 처리된 폐액은 주입탱크로 이송되며 원심분리 과정에서 발생된 슬러지는 탈수 처리되어 55갤런 드럼에 포장된 후 임시저장고로 운반되어 일정기간 저장된다. 폐액으로 채워진 주입탱크는 펌프를 이용한 재순환 과정을 통해 탱크 내용물을 균질하게 섞은 후, 시료분석을 통해 다음 단계 공정에 적절하도록 황산 또는 가성소다로 전 처리를 한다. 전 처리된 폐액은 유기물질 흡착대, 선택성 이온교환기와 일반 이온교환기로 구성된 탈염기계통에서 처리되어 방사성핵종이 제거된다. 탈염기계통에서 처리된 폐액은 최종적으로 감시탱크로 이송된다. 감시탱크에 수집된 폐액은 시료분석을 통해 환경으로 방출되기에 적절한 경우, 순환수 배수로를 통해 소외로 방출된다.

4) 화학폐액 처리

화학폐액탱크는 2차 보조건물 및 출입통제건물내 세탁기기 및 방사화학 실험실로부터 발생된 폐액과 제염시설로부터 발생된 폐액을 수집한다. 또한 화학폐액탱크에는 복수탈염기 재생폐액과 증기발생기취출계통 오염폐액도 수집될 수 있다. 화학폐액탱크에 수집된 화학폐기물은 시료 채취하여 폐액의 화학 및 방사능 특성을 분석한 뒤 상기의 저용존고형물폐액과 동일한 폐액처리 공정으로 처리된다.

제 3 절 문제점 분석

1. 기준값 검토

이온교환설비 출구 폐액의 방사능 농도 설계값이 사업소 배출 목표값보다 10배 정도 높아서 간헐적으로 배출기준을 불만족 하는 것으로 분석되었다. 설계값은 이온교환방식을 적용하는 외국의 운영실적을 참고하였으며 배출 목표값은 주처리설비가 이온교환방식인 발전소의 설계값을 고려하여 조정된 것으로 조사되었다. 그러나 이온교환방식을 적용하는 해외 55개 원전의 사례를 조사한 결과 대부분 규제값을 배출기준으로 적용하고 있었다.

표2.5 LRS 기준값

항 목	제한치(Bq/cc)
발전소 배출 목표값	1.85 E-02 (LLD)
이온교환설비의 설계기준값	1.85 E-01
방출 제한값	2.88 E+02

2. 운전형태별 원인 분석

액체방사성폐기물처리계통(LRS: Liquid Radwaste System)에서 처리된 폐액의 방사능 농도가 이온교환설비의 설계기준값(1.85E-01Bq/cc)은 만족하나, 발전소 배출 목표값(1.85E-02 Bq/cc)을 불만족하는 경우가 간헐적으로 발생했으며 이 경우 폐액을 재순환시켜 처리하는데 따른 손실이 발생하였다. 발전소 배출 목표값 불만족 원인을 분석하기 위해 LRS로 폐액을 통과시키면서 원심분리기 전단, 이온교환기 전단 및 후단에서 시료를 채취하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

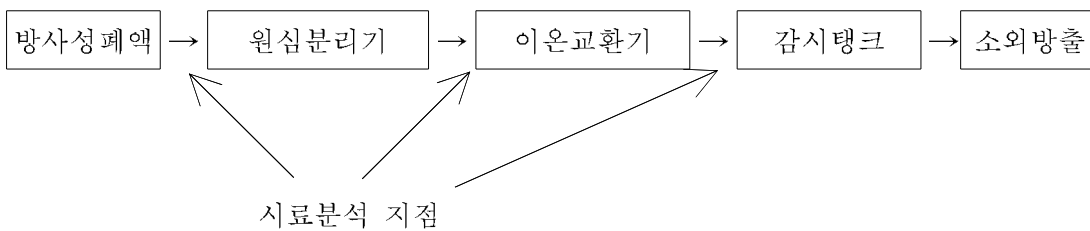


표2.6 LRS 성능시험 결과

(방사능농도, 단위 Bq/cc)

시험 회수	원심분리기 전단	이온교환기 전단		이온교환기 후단		제한치 만족여부	
		Train A	Train B	Train A	Train B	설계값 ^{주2)} (1.85E-01)	배출목표값 (1.85E-02)
1	1.32E+01	2.29E-01	-	< LLD ^{주1)}	-	만족	만족
2	6.12E+00	1.19E-01	-	< LLD	-	만족	만족
3	8.73E-01	8.76E-02	-	3.83E-02	-	만족	불만족
4	2.58E-01	5.74E-02	-	< LLD	-	만족	만족
5	4.82E+00	1.00E+00	-	5.32E-02	-	만족	불만족
6	1.21E+00	9.53E-01	1.00E-01	9.87E-02	3.70E-02	만족	불만족
7	1.71E+01	1.95E-01	-	2.38E-02	-	만족	불만족
8	6.35E-01	6.68E-02	-	< LLD	-	만족	만족
9	6.00E-01	-	2.68E-01	-	< LLD	만족	만족
10	3.43E-01	-	2.02E-01	-	< LLD	만족	만족

주1) LLD : Lower Limit of Detection,

주2) 이온교환설비의 설계기준값

2.1 증류수 미회수

방산농축기(BAC : Boric Acid Concentrator)의 증류수가 회수되지 않고 LRS로 유입되어 방사성 폐액으로 처리됨에 따라 계통의 과부하를 초래한다. BAC를 연속운전 할 경우 일일 약 109m³의 증류수가 발생하므로 정상운전 중 발생하는 방사성 폐액과 함께 LRS로 유입될 경우 LRS의 폐액 처리용량을 초과함으로써 계통의 운전불능 상태를 유발할 가능성이 있다.

2.2 폐액 수집 부적절

특수폐액이나 고방사성 폐액이 분리되지 않고 혼합 수집 및 처리되어 설비의 성능을 저하시킨다.

2.3 설비 노후화

원심분리기 운전연수가 경과함에 따라 입자성 물질 제거성능이 저하되어 배출 방사능 농도가 증가하며 이온교환수지는 교체 후 일정기간이 지나면 성능저하로 이온성 물질 제거능이 저하되고 특정핵종 제거성능이 불충분하여 배출 방사능 농도가 증가한다.

2.4 봉산폐액 미회수

정상운전 또는 계획예방정비기간 중 정비를 위해 봉산을 함유한 계통수를 건물 바닥으로 배수하는 경우 고농도의 봉산수가 LRS로 유입되어 이온교환설비의 효율을 저하시킨다.

2.5 작업구간 선정 부적절

현재 사용중인 밸브목록과 계통도면(P&ID)에는 밸브 및 배관의 위치가 1차원적으로 표기되어 있어서 정비작업을 위한 배수 구간을 정확하게 선정할 수 없으므로 불필요한 구간의 배수가 수행되고 있다. 또한 정비작업을 위한 배수 시 탱크 바닥이나 펌프 위치(높이) 이하의 배관에 잔류하는 계통수는 탱크(재장전수탱크, 수용탱크, 원자로 배수탱크, 기기배수탱크 등)로 회수할 수 없어서 건물바닥으로 배수되어 방사성폐액 발생을 증가시키고 있다.

2.6 비정상운전

발전소 비정상 상황 시 발생하는 폐액(복수탈염설비 재생폐액)이 LRS로 유입될 경우 LRS의 성능 저하로 일시적으로 이온교환기 후단의 방사능 농도가 이온교환설비의 설계기준($1.85E-01\text{Bq/cc}$)은 만족하나 발전소 배출기준($1.85E-02\text{Bq/cc}$)을 만족시키지 못한다.

제 3 장 신규설비 도입 및 운영방법 개선

2장에서 분석한 문제점 해결을 위하여 신규설비 도입 및 운영방법 개선방안을 검토하였다. LRS의 전반적인 성능향상을 위해 전처리설비 설치, BAC 증류수 회수를 위해 용존산소제거설비 설치, 방사성폐액 회수를 위해 강제배수방안 개발을 추진하였다.

제 1 절 신규설비 도입

1. 전처리설비 설치

1.1 적용사례 검토

이온교환설비의 방사성폐액 처리 효율을 개선하기 위하여 해외 원전에서 적용하고 있는 방사성폐액 처리방식 및 국내 원전 사례를 검토하였다.

미국의 Wolf Creek, Commanche Peak, Dresden, Nine Mile Point, Pilgrim 등 7개 발전소에서는 역삼투압 및 한외투과방식을 적용하고 있었으며 캐나다의 AECL, Bruce 발전소에서는 역삼투압 및 나노여과방식을 적용하고 있었다. 국내의 경우 고리2호기 및 울진1,2호기에서 정밀여과 및 나노여과방식을 적용하고 있었다.

고리2호기는 액체방사성폐기물 처리시스템으로 증발기를 도입했으나 증발기 설비상 문제점 및 기포형성, Carry Over 등으로 인한 운영상 문제점으로 처리성능(제염계수)이 크게 저하되자 증발기 대체설비로 선택성이온교환설비(SIES : Selective Ion Exchange System)를 1999년도에 도입하였다. 그러나 방사성 폐액에 함유된 부유물질과 기름성분 등에 의해 선택성이온교환설비의 활성탄과 이온교환수지가 쉽게 오염되는 등의 제반 문제점이 나타나 선택성이온교환설비의 정상적인 운전이 불가능하였을 뿐만 아니라 입자성 핵종인 Ag-110m의 제거에 어려움이 있었으므로 이를 해결하기 위해 2003년 10월부터 이온교환설비의 전처리설비(MF: Microfiltration → NF: Nanofiltration)를 설치하여 운영하고 있다.

울진1,2호기는 액체방사성폐기물 주처리 공정으로 증발기 1대를 운영해 오다 증발기 비정상 상태를 고려한 여유설비로서 고리2호기와 같은 SIES를 동일한 시점에 도입하였다. 울진1,2호기도 고리2호기와 동일한 이유로 2005년 12월 이온교환설비의 전처리설비(Microfiltration → Nanofiltration)를 도입했다.

표3.1 전처리설비 적용 사례

적용 방식	적용 발전소	처리 대상
정밀여과(전처리) 및 나노여과	고리2호기 울진1,2호기	선택성이온교환기 전처리 - 총현탁고형물(TSS), 탁도 및 방사성 핵종
역삼투	울진1,2호기	사용후연료저장조내 실리카
역삼투(나노여과)	AECL Chalk River Laboratory(캐나다)	1차계통 정화 및 붕산수 회수
기존 전처리공정 및 역삼투	Nine Mile Point(미국) Pilgrim(미국)	BWR 바닥배수 및 기타 폐기물
한외여과(전처리) 및 역삼투	Wolf Creek(미국)	PWR 바닥배수, OH폐기물, 폐수지 이송수
	Comanche Peak(미국)	바닥배수, 폐수지 이송수, 붕산회수
	Dresden(미국)	액체폐기물내 TRU로 오염된 폐액

1.2 막분리(Membrane) 원리 및 특성

1.2.1 막분리(Membrane) 개요

막분리 기술은 분리막의 세공크기(수mm~수십 μ m)와 막 표면 전하에 따라 원수 및 하폐수 중에 존재하는 처리대상물질(유기/무기 오염물질, 미생물 등)을 거의 완벽하게 분리하여 제거할 수 있는 고도의 분리공정이다.

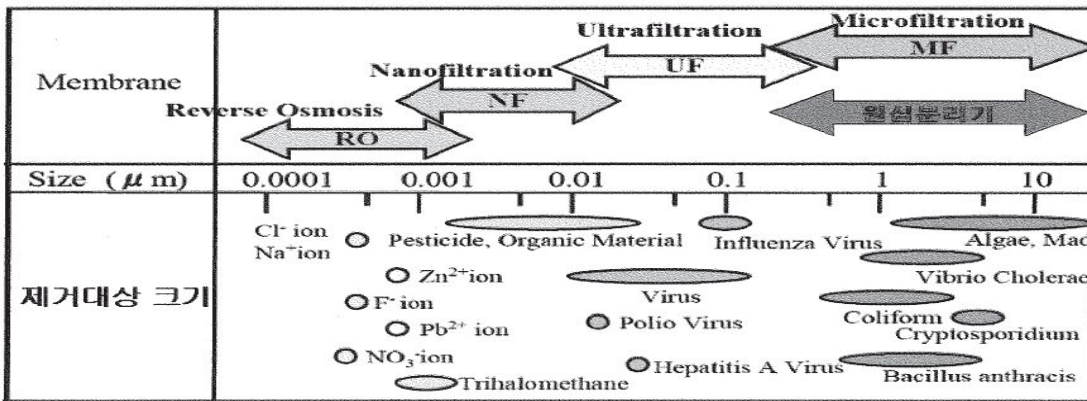


그림3.1 Membrane 별 여과 크기

표3.2 고분자 막분리 종류^[20]

여과공정	기공 (Pore Size)	구동력(kg/cm ²)	제거물질
역삼투막 (Reverse Osmosis, RO)	5~15Å	13.565	물속의 이온물질과 분자량이 100이상인 유기물질
나노필터 (Nanofiltration, NF)	10~20Å	3.517	다가이온과 분자량 300 이상인 유기물질
한외여과 (Ultrafiltration, UF)	15Å ~ 1.0μm	0.514	분자량 1,000~100,000 사이의 유기물질 콜로이드, Virus 및 Bacteria
정밀여과 (Microfiltration, MF)	0.1μm	3	부유물질, 에멀전, 박테리아 및 효소

1.2.2 MF Membrane(정밀여과막)

정밀여과(Microfiltration)는 크기가 0.1~10μm 정도인 용질을 분리하는 막분리 공정이며 사용할 막은 공경이 0.2~0.4μm인 침지형막으로 콜로이드 분산입자, 바이러스 등을 제거한다.

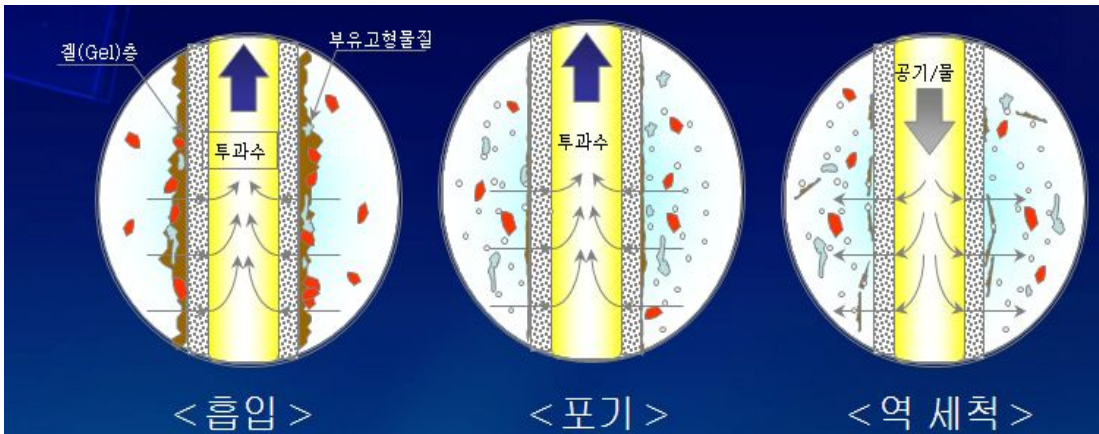


그림3.2 MF 막 원리

1.2.3 RO 막

역삼투막(Reverse Osmosis)은 공경이 약 10\AA 내외이고 세공이 거의 존재하지 않으므로 일반적으로 비공성막이라고 할 수 있으며 이는 유기고분자가 micelle을 형성하고 있는 micelle간의 간격을 통해 물질투과가 행해진다. 이것은 분자량 수백에서 수천의 물질을 저지하는 것을 주목적으로 개발되어 저탈염율을 가지고 있지만 종래의 해수담수화에 사용되는 역삼투막이 50기압 정도의 고압으로 운전되는 것에 비해 10기압 정도의 압력으로 운전이 가능하여 Loose RO막 또는 NF막이라고 한다. RO/NF막의 제거 대상 입자의 크기는 평균적으로 $1 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 이다.

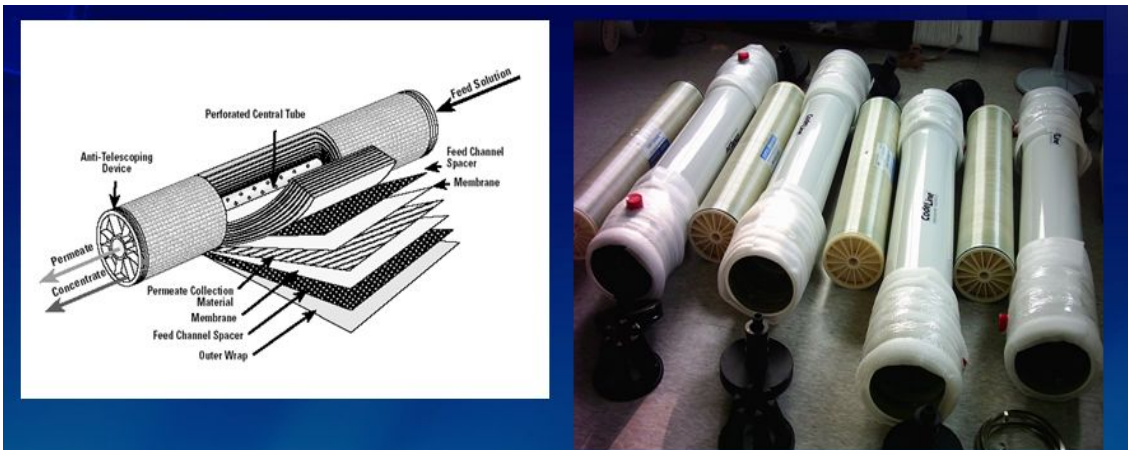


그림3.3 RO막 구조

1.3 Pilot 설비를 이용한 실험

소규모 실험장치(MF, UF, NF & RO막)를 제작하여 3회에 걸쳐 실험을 수행하였으며 실험 결과 탁도 개선, 방사성 핵종 포획능력 및 방사능 준위 감소측면에서 MF(Microfiltration)-RO(Reverse Osmosis)로 구성된 장치가 가장 성능이 우수한 것으로 판명되었다.

1.3.1 실험-1

Membrane을 MF-NF-RO 순서로 배열한 후 고용준고형물탱크내의 방사성폐액을 통과시켜 처리전후의 TSS(Total Suspended Solids), pH, 방사성핵종 제거 성능을 분석하였다.

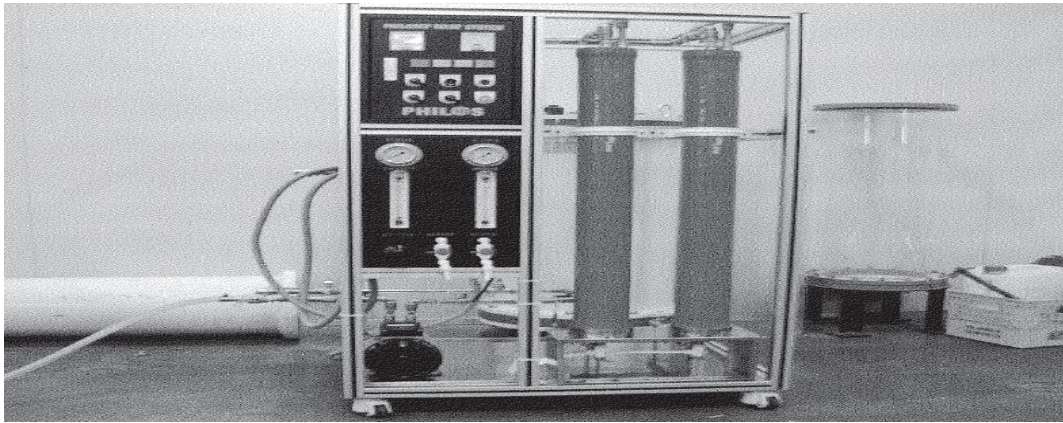
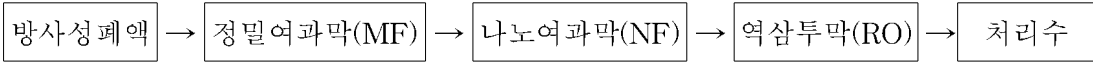


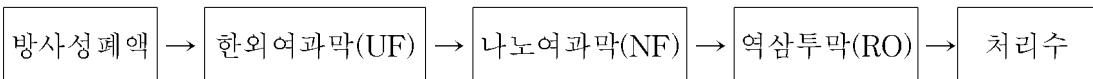
그림3.4 실험장치 배열(MF-NF-RO)

표3.3 실험결과(MF-NF-RO 배열)

구분	원수	MF	NF	RO
pH	6.62	6.55	6.72	6.02
TSS(ppm)	3	1	1	1
방사성 핵종	Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Fe-59, Sb-122, Sb-124	Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Fe-59, Sb-124	Mn-54, Co-58	Mn-54, Co-58
방사능(Bq/cc)	1.82E+02	2.20E+02	4.06E-01	1.41E+00

1.3.2 실험-2

Membrane을 UF-NF-RO 순서로 배열한 후 고용존고형물탱크내의 방사성 폐액을 통과시켜 성능을 분석하였다.



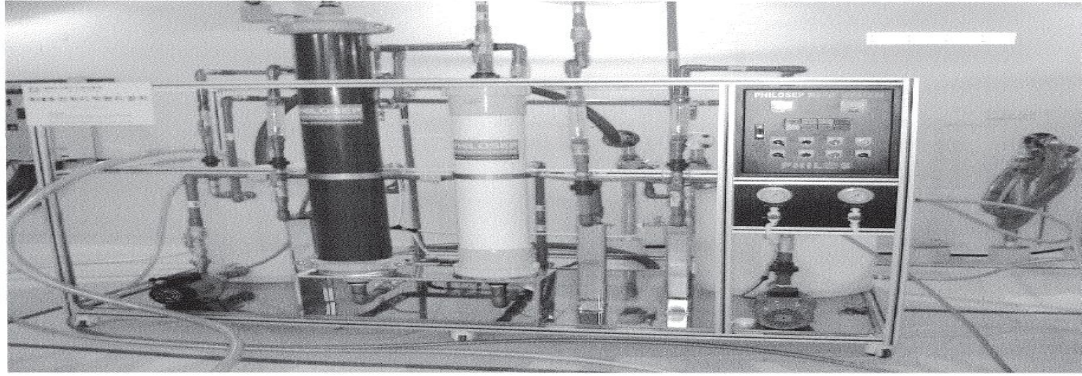


그림3.5 실험장치 배열(UF-NF-RO)

표3.4 실험결과(UF-NF-RO 배열)

구분	원수	UF	NF	RO
pH	6.54	6.54	6.72	5.98
TSS(ppm)	6	1	1	1
방사성 핵종	Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Fe-59, Sb-122, Sb-124	Mn-54, Co-57, Co-58, Co-60, Fe-59, Sb-124	Mn-54, Co-58	Mn-54, Co-58, Co-60
방사능(Bq/cc)	2.79E+02	2.60E+02	4.60E-01	1.46E+00

1.4 설치 및 성능시험

1.4.1 설계기준 및 계통구성

Pilot 설비를 이용한 실험결과를 근거로 처리용량 30 gpm(7 ton/hr)의 MF-RO막으로 계통을 구성했다. MF막은 탁도 1NTU(Nephelometric Turbidity Units)이하 및 부유물질 98%이상을 제거, RO막은 용존고형물 제거율을 98.6%로 설계하였다.

- 1) MF Membrane : 14개
- 2) RO Membrane : 9개
- 3) MF & RO 수조 용량 : 각각 10 ton
- 4) MF & RO 이송펌프 : 각각 2대
- 5) 제어판넬

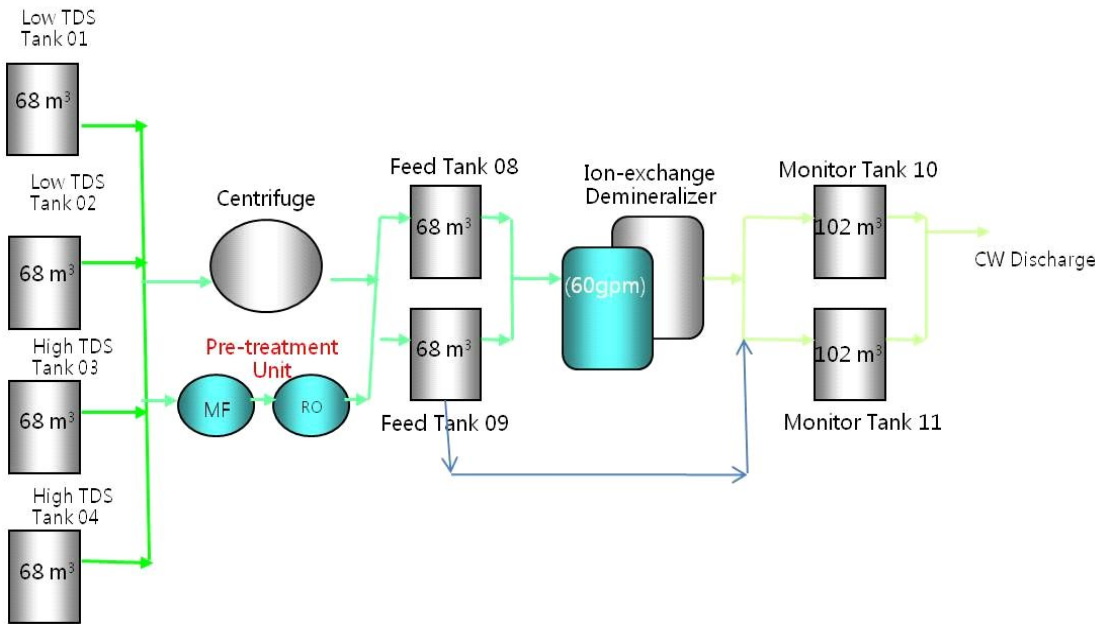


그림3.6 전처리설비 신설(안)

1.4.2 소요비용

- 1) 설계비 : 1.5억원
- 2) MF/RO막 제작 및 설치 : 4.0억원
- 3) 증발기 제작 및 설치 : 0.5억원

1.4.3 성능시험

1) 개별 성능시험

MF Membrane 및 RO Membrane 개별 성능시험을 위해 계획예방정비기간 중 발생한 폐액 통과시험을 수행했으며 시험결과는 설계값 7 ton/hr를 만족하였다.

2) 방사능 준위(폐액)별 성능시험

계획예방정비기간 중 발생한 방사성폐액을 통과시켜서 성능시험을 수행했으며 시험결과 방사능 농도가 1/100~1/1000 수준으로 감소됨을 확인하였다.

3) 붕소농도별 성능시험

방사성폐액의 붕소농도별 제거효율을 파악하기 위한 시험을 수행했으며 시험결과 붕소농도 1,000 ppm 이하에서는 양호한 성능을 나타냈으나 1,000 ppm 이상에서는 포화속도 증가로 제 기능을 발휘하지 못했다.

표3.5 방사능 준위(폐액)별 성능시험 결과

○ 시료-1(영광5호기 고용존고형물탱크)

구분	폐액(원수)	MF 처리수	RO 처리수
방사성 핵종	Co-58등 11개 핵종	Co-58 Mn-54	Co-58 Mn-54
TSS(ppm)	33	0	0
전도도($\mu\text{s}/\text{cm}$)	574	368	34.5
pH	6.9	6.8	6.1
방사능농도(Bq/cc)	6.12E+01	3.78E-01	2.48E-01

○ 시료-2(영광5호기 고용존고형물탱크)

구분	폐액(원수)	MF 처리수	RO 처리수
방사성 핵종	Co-58등 12개 핵종	Co-58 Mn-54	Co-58 Mn-54
TSS(ppm)	33	0	0
전도도($\mu\text{s}/\text{cm}$)	325	368	80
pH	6.9	6.8	6.1
방사능농도(Bq/cc)	6.12E+01	5.41E+01	2.25E-01

○ 시료-3(영광6호기 저용존고형물탱크)

구분	폐액(원수)	MF 처리수	RO 처리수
방사성 핵종	Co-58등 6개 핵종	Co-58 Mn-54	Co-58,60 Mn-54 Sb-124
TSS(ppm)	33	0	0
전도도($\mu\text{s}/\text{cm}$)	76	74	23
pH	6.7	7.7	7.4
방사능농도(Bq/cc)	1.35E+01	1.38E+00	3.12E-01

표3.6 붕소농도별 성능시험 결과

○ 시료-1(붕소농도 265 ppm, 화학폐액탱크)

구분	폐액(원수)	MF 처리수	RO 처리수
방사성 핵종	Co-58등 4개 핵종	Co-58	Co-58
TSS(ppm)	117	235	15.30
전도도($\mu\text{s}/\text{cm}$)	14	0	0
pH	4.67	6.91	6.56
방사능농도(Bq/cc)	3.83E+00	3.07E+00	3.23E-02

○ 시료-2(붕소농도 583 ppm, 저용준고형물탱크)

구분	폐액(원수)	MF 처리수	RO 처리수
방사성 핵종	Co-58등 6개 핵종	Co-58	Co-58
TSS(ppm)	85.3	0	0
전도도($\mu\text{s}/\text{cm}$)	80	123	37
pH	7.4	6.89	6.12
방사능농도(Bq/cc)	1.54E+00	4.79E+00	6.40E-02

○ 시료-3(붕소농도 991 ppm, 저용준고형물탱크)

구분	폐액(원수)	MF 처리수	RO 처리수
방사성 핵종	Co-58등 10개 핵종	Co-58	Co-58
TSS(ppm)	6	2	0
전도도($\mu\text{s}/\text{cm}$)	85.3	251	28
pH	7.4	7.6	6.8
방사능농도(Bq/cc)	1.33E+01	9.81E+00	9.30E-02

2. BAC 용존산소제거설비 설치

2.1 증류수 처리 현황

붕산농축기(BAC : Boric Acid Concentrator) 운전 시 발생하는 증류수(Distillate Water)는 원자로보충수탱크(RMWT : Reactor Makeup Water Tank)로 회수하여야 하나, 증류수 내 고농도의 용존산소 때문에 용존산소 농도를 0.1ppm으로 제한하고 있는 RMWT로 회수하지 못하고 액체방사성폐기물처리계통(LRS : Liquid Radwaste System)으로 이송하여 처리하고 있다. 이는 고농도의 용존산소를 포함하는 BAC 증류수를 RMWT로 회수하여 원자로 보충수로 사용할 경우 원전연료 피복재 손상 등의 문제점이 발생할 수 있기 때문이다.

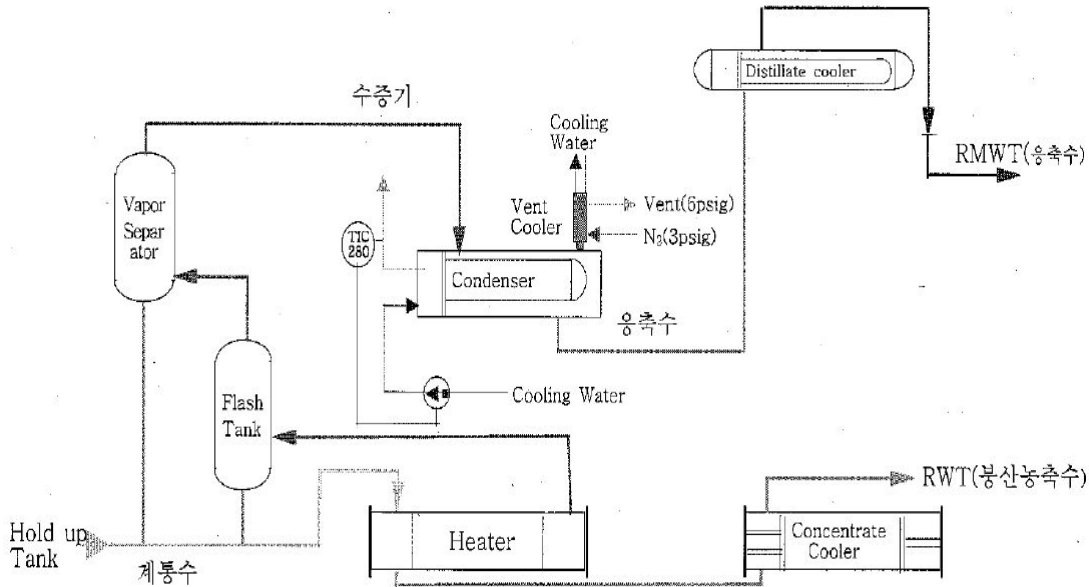


그림3.7 붕산농축기 개략도

2.2 설계개념 검토

BAC는 증발공정을 이용하여 공정 유체의 붕소를 농축한다. 붕산농축기로 유입된 공정 유체는 수증기 가열기를 순환하면서 가열된다. 순환류에서 나오는 증기는 제습기에 의해 동반 액체가 제거되고 응축되어 RMWT로 이송되고 농축액은 냉각되어 재장전수탱크(RWT : Refueling Water Tank)로 이송되어 1차계통수로 재사용되도록 설계되었다.

2.3 용존산소 영향 분석

핵연료 피복재는 물과 접촉하고 있으므로 일정시간 경과 후 산화반응($Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2+2H_2$)에 의해 산화막이 생성되며 산화막을 통해 침투한 산소이온이 산화막의 계면에서 Zr과 반응하여 ZrO_2 가 생성되고 수소이온은 산화막과 Zr의 계면부위에 포화된다. 이 반응은 계속적으로 확산하여 금속과 산화막이 접하는 계면에서는 연속적인 산화반응이 일어난다. 따라서 핵연료 피복재의 부식을 방지하기 위해서는 원자로냉각재의 용존산소농도를 0.1ppm 이하로 유지해야 한다.

2.4 증류수 회수방안 검토

BAC 증류수 미회수에 따른 경제적 손실을 방지하고 액체방사성폐기물처리계통(LRS)의 부하를 경감시킬 수 있도록 BAC 증류수를 RMWT로 회수하기 위해 적용 가능한 방안들을 검토하였다.

2.4.1 우회배관 신설

1) 개선방안

BAC 운전시 LRS의 폐액수집탱크 1대를 전용으로 사용하여 시료분석 후 소외배출 기준 만족시 LRS의 배출구 측으로 직접 배출할 수 있도록 우회배관을 신설한다.

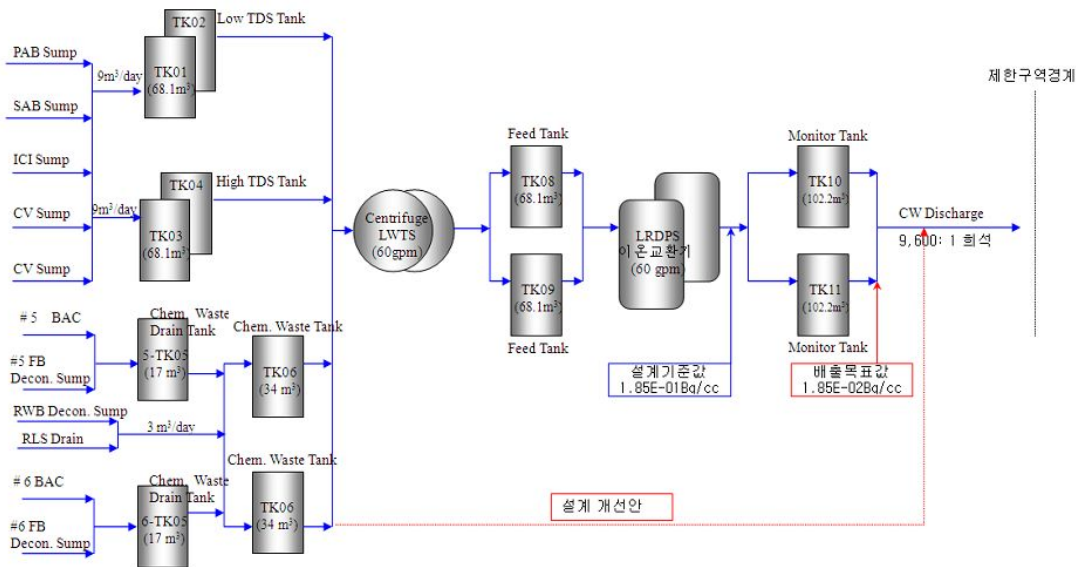


그림3.8 우회배관 신설 개념도

2) 타당성 검토

ANSI/ANS-55.6(Liquid Radioactive Waste Processing System for Light Water Reactor Plants)의 계통구성 요건에는 LRS로 수집된 폐기물은 방사능량에 관계없이 처리과정을 거친 후 Monitor Tank를 거쳐 배출 관리자의 통제 하에 배출하도록 되어 있다. 따라서 Chemical Waste Tank 후단에서 Monitor Tank Pump 후단으로 우회 배관을 연결하여 직접 배출하는 것은 계통 구성에 대한 코드 요건에 부합하지 않으며 계통수를 낭비함에 따른 경제적 손실을 초래할 수 있으므로 적용에서 배제하였다.

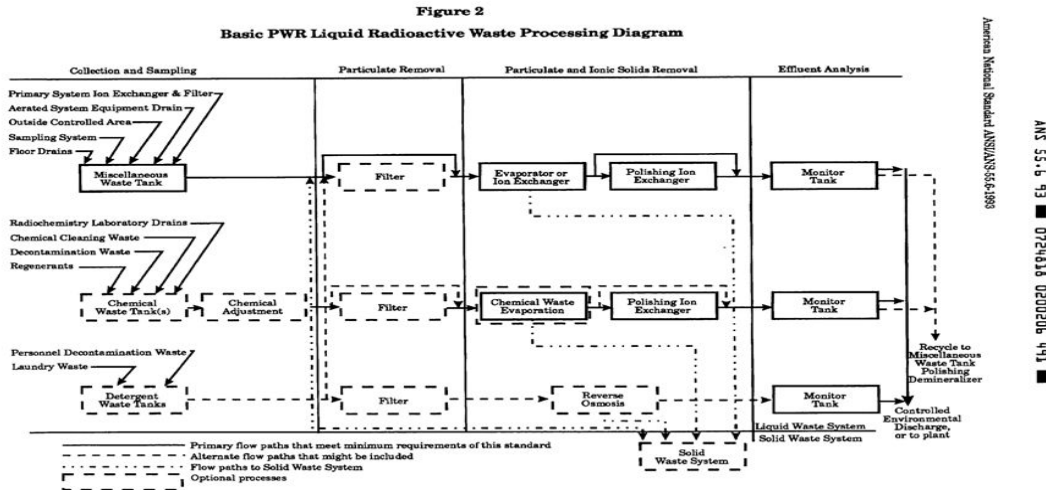


그림3.9 PWR형 원전의 방사성폐액 처리 개념도^[14]

2.4.2 용존산소 제거설비 신설

1) 개선방안

BAC 증류수를 RMWT로 회수하여 1차 계통수로 재사용할 수 있도록 BAC에 용존산소 제거설비를 추가로 설치한다.

2) 타당성 검토

BAC 증류수의 최대유량(14gpm)을 고려하여 관련 배관에 용존산소 제거설비를 설치할 경우 BAC 성능과 무관하게 증류수 내 용존산소 농도를 0.1ppm 이하로 유지할 수 있을 것으로 추정되었다. 용존산소 제거설비의 적절성 검토를 위한 참고 자료로 국내원전의 RMWT 관리 현황을 조사한 결과는 표3.7과 같다.

표3.7 원전별 RMWT 관리 현황

항목 호기	수질분석현황			RMWT 형태		용존산소 제거설비
	pH	전기전도도 (mS/cm)	용존산소농도 (ppm)	차단막 형태	가압	
고리1	NA	NA	< 100	Rubber Diaphragm	N/A	CORS ^{주)}
	6.0	0.46	28			
고리2	5.3	3.26	2,000	Rubber Diaphragm	N/A	CORS
고리3	6~8	< 1	< 100	Rubber Diaphragm	질소	진공탈기
	6.2	0.58	70			
고리4	6.4	0.67	70	Floating Roof	질소	진공탈기
영광1	NA	NA	< 100	Rubber Diaphragm	질소	진공탈기
	6.2	0.5	70			
영광2	6.2	0.5	70	Rubber Diaphragm	질소	진공탈기
영광3	6~8	< 1	N/A	Floating Roof	N/A	진공탈기
	5.8	1	3,000			
영광4	5.9	1	4,000	Floating Roof	N/A	진공탈기
영광5	6~8	< 1	N/A	N/A	질소	CORS
	5.9	0.5	5			
영광6	5.9	0.4	5	N/A	질소	CORS
울진1	6~8	< 1	< 100	Floating Roof	N/A	CORS
	6.0	0.71	40			
울진2	6.0	0.73	35	Floating Roof	N/A	CORS
울진3	6~8	< 0.2	N/A	N/A	질소	진공탈기
	6.0	0.75	600			
울진4	6.0	0.75	650	N/A	질소	진공탈기
울진5	6~8	< 1	N/A	N/A	질소	CORS
	6.2	0.5	5			
울진6	6.3	0.4	5	N/A	질소	CORS

주) Catalytic Oxygen Removal System

2.4.3 용존산소 제거방식 비교

용존산소 제거방식에는 물리적 방법(가열탈기법, 진공탈기법), 촉매수지 이용법(고분자 수지촉매 이용법, 활성탄 이용법) 및 탈기막 이용법이 있으며 각 방법에 대한 장·단점을 검토한 결과는 표3.8과 같다.

표3.8 용존산소 제거방식 비교

방법	처리기술	장 점	단 점
물리적 탈기법	가열탈기법 (수증기 가열 탈기처리)	<ul style="list-style-type: none"> · 운전 중 추가 약품 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 보조증기 공급장치 필요 · 넓은 설치면적 · 운전비 과다
	진공 탈기법	<ul style="list-style-type: none"> · 모든 종류의 용존기체 제거 · 검증된 기술로 많이 사용 · 운전 중 추가 약품 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 넓은 설치 면적 · 설치비 및 운전비 과다 · 진공펌프 성능유지 및 관리 필요
촉매 수지 이용법	고분자 수지 촉매이용법 (수소)	<ul style="list-style-type: none"> · 저농도 용존산소 유지 · 반응속도 빠름 · 계통 특성에 맞는 설계 가능 · 설치면적 작고 운전비 저렴 · 설치 및 운전이 용이 	<ul style="list-style-type: none"> · 수소가스 폭발위험
	고분자 수지 촉매이용법 (하이드라진)	<ul style="list-style-type: none"> · 설치 및 운전 용이 · 운전비용 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> · 상온에서 용존산소 제거효율 저조 · 고온에서 암모니아 생성으로 부식 유발가능 · 장치비용 과다
	활성탄 이용법	<ul style="list-style-type: none"> · 상온에서 운전 가능 · 설치비/운전비/원료비 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> · 활성탄에 의한 2차 불순물 발생 우려 · 기술 실증 필요
탈기막 (중공 사막) 이용법	중공사막 모듈이용법	<ul style="list-style-type: none"> · 별도의 화학물질을 공급하지 않음 · 설치 및 운전이 용이 · 장치비용 및 운전비용 저렴 · 설비 소형 	

2.4.4 검토 결과

LRS 우회배관 신설은 관련 코드요건에 위배되어 적용할 수 없으며 BAC에 용존산소 제거설비를 신설하는 것이 최적의 대안으로 검토되었다. 따라서 적용 가능한 용존산소 제거설비를 검토한 결과 중공사막모듈을 이용한 용존산소 제거설비가 최적으로 분석되었다. 동 설비는 1998년부터 월성1호기 냉각재계통에 설치되어 운전중이며 용존산소 제거효율이 우수함이 입증된 설비로 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 기존 탱크를 설비개선하지 않고 탱크에 부착하여 사용할 수 있으므로 설치 소요면적이 적다.
- 2) 장치 제작비 면에서 중공사막 모듈 탈기장치는 CORS보다 3배 이상 저가이며 전단에 소형의 정화 탈염기만 설치하면 추가적인 가스 구입비 등 운전비용이 소요되지 않아 훨씬 경제적이며 폭발성 가스를 사용하지 않아 안전하다.
- 3) CORS는 수소 주입 등 운전원의 지속적인 별도 관리가 요구되나, 중공사막 모듈 탈기장치는 운전원의 지속적인 관리가 필요 없어서 간편하고 정비가 용이하다.

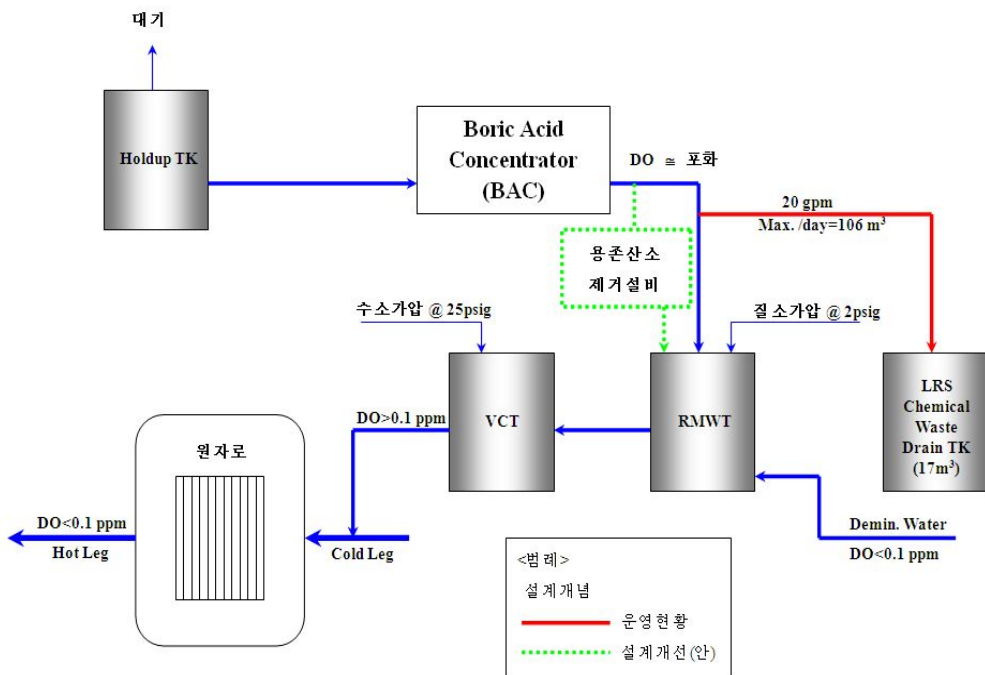


그림3.10 용존산소 제거설비 신설(안)

2.5 용존산소제거설비 설치 및 성능시험

2.5.1 설비도입

검토 결과를 근거로 탈기막식 용존산소 제거설비를 도입하였다.

- 1) 형식 및 수량 : 탈기막식(Membrane Type) 1대
- 2) 구성 : 탈기막(Membrane), 진공펌프(Watering Vacuum Pump), 냉동기 등
- 3) 원리^[9]

- BAC 증류수를 탈기막 외측으로 통과시키면 증류수중의 용존산소가 탈기막 내측의 진공에 의해 탈기되면서 용존산소 제거
- 수용액상과 기체상을 소수성(疏水性) 막을 이용하여 서로 섞이지 않고 접할 수 있도록 하여 수용액상으로부터 용존산소를 효과적으로 분리, 제거
- 소수성(疏水性: 물과 친화력이 적은 성질) 막은 액체상과 기체상이 막의 작은 구멍(0.03 μm) 사이로 서로 섞이지 않고 접할 수 있도록 하는 지지체 역할
- 소수성 탈기막의 한쪽 면을 통해 적절한 유속으로 물을 흘려주고 막의 다른 쪽에서는 진공을 걸어 수용액 속으로부터 용존산소를 막의 작은 구멍을 통하여 진공 측으로 제거, 물은 탈기막의 소수성 특징 때문에 막을 통과할 수 없음

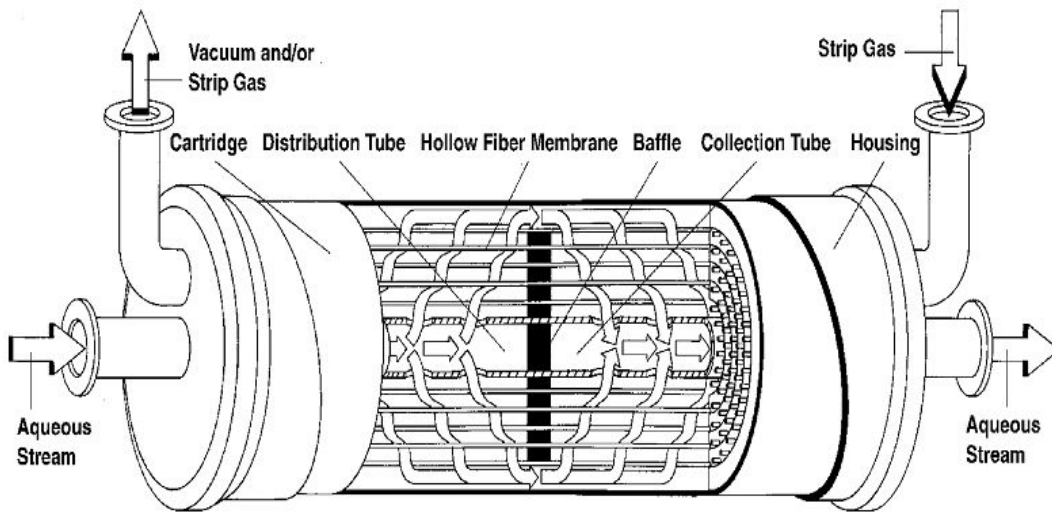


그림3.11 중공사막 모듈 탈기장치 원리



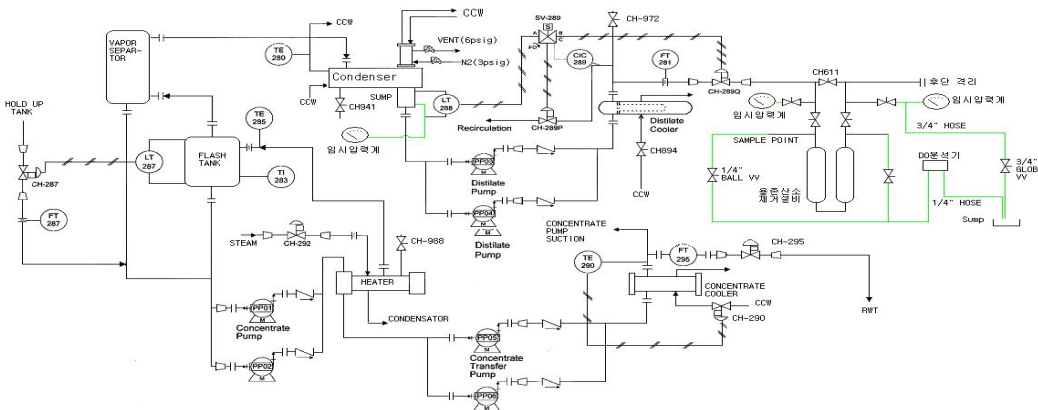
그림3.12 중공사막 모듈 탈기장치 구성

2.5.2 성능시험

1) 설계기준

용존산소제거설비로 유입되는 BAC 증류수의 용존산소 농도가 1000ppb 이하일 때 용존산소제거설비 출구 측의 용존산소 농도가 100ppb 이하이어야 한다.

2) 성능시험 유로



3) 시험결과

성능시험 수행 결과는 설계기준을 만족하였다.

- 용존산소제거설비로 유입되는 BAC 증류수의 용존산소 농도 : 209ppm
- 용존산소제거설비 운전시간 : 200분 연속운전
- 용존산소제거설비 배출수의 용존산소농도 : 운전기간 중 20ppb 이하 유지

제 2 절 운영방법 개선

1. 봉산폐액 회수

1.1 봉산폐액 발생 현황

원자력발전소는 매 운전주기마다 일정량의 봉산을 소모하고 있는데 특히 정비기간 중 1차계통에서 배수되는 계통수가 소모된 봉산의 대부분을 차지하고 있다. 이와 같이 계통에서 배수된 봉산수는 LRS로 유입되어 LRS의 부하를 증가시킨다. 또한 소모된 봉산을 보충하는데 불필요한 비용이 지출된다. 한편 봉소는 방충제 등으로 사용되고 있지만 인체에 유해하므로 소외환경으로의 배출을 엄격히 규제할 필요가 있다. 따라서 봉산의 소모를 최소화 하여 LRS의 부하를 경감시키고 봉산 보충에 따른 비용손실을 최소화 할 수 있는 방법을 검토하였다.

1.2 규제요건 검토

1.2.1 화학물질 배출 규제기준

‘수질환경보전법’에서 화학물질 배출을 규제하고 있으나, 본 법규에 의해 규제받는 화학물질 중 봉소는 포함되어 있지 않다.

1.2.2 음용수 수질기준

음용수는 먹는 물 관리법의 환경부령인 ‘먹는 물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙’에 의한 먹는 물 수질기준이 적용된다. 본 규칙에서는 음용수중의 허용 봉소농도를 0.3ppm으로 규정하고 있다.

1.2.3 미국 내 원전의 봉산 환경 배출기준

미국 내 55기의 발전소를 대상으로 환경으로 배출하는 봉소농도에 대한 기준(EPRI TR-101160)을 조사하였다.

표3.9 미국 원전 봉산 환경배출기준^[16]

조사대상	미 제한 발전소	제한 발전소			
		농도 제한(ppm)		배출량 제한(kg/day)	
55개 발전소	46	2,000~4,000	25	102	0.2
		· Catawba ^{1,2} · Ginna · Haddam · Neck	TMI 1	Indian Point ^{2,3}	Millstone ²

1.3 봉산제거 및 회수방안 비교 분석

1.3.1 봉산 제거

방사성폐액 처리방식을 증발기 또는 탈이온막방법으로 변경함으로써 환경으로 배출되는 봉산농도를 어느 정도 낮출 수 있을 것으로 판단되나, 증발기 또는 탈이온막방법을 이용하여 폐액을 처리하는 경우 필연적으로 농축 폐액이 발생되며 이들 폐액을 처리하기 위한 고화설비의 추가 도입이 요구된다.

1.3.2 봉산 회수

LRS로 유입된 폐액은 이물질을 다량 함유하고 있어 이들 폐액을 증발기 또는 탈이온막방법을 이용하여 폐액을 처리하더라도 봉산을 회수하여 재사용할 수는 없다. 따라서 봉산회수 방법은 1차 계통수가 폐기물화 되어 이물질과 혼합되기 이전에 회수하는 방법이 강구되어야 한다. 즉 LRS로 유입되는 봉산폐액의 대부분은 계획예방정비기간 중 계통 내 봉산수를 수용탱크(Hold Up Tank)로 회수 시 탱크 바닥이나 펌프 위치(높이) 이하의 배관에 잔류하는 것으로서 탱크나 배관 등의 점검 및 작업 시 바닥으로 배수되어 LRS로 유입되는 것이다. 이러한 잔류 봉산수는 임시회수장치(임시펌프 및 저장탱크 등)를 이용하여 원자로배수탱크(RDT)나 기기배수탱크(EDT)로 회수하여 다음 주기 운전 시 재사용하는 방법 등을 통해 봉산폐액의 양을 줄여야 한다.

1.3.3 검토 결과

붕산 제거 및 회수와 관련하여 방사성폐액 처리방식을 증발기 또는 탈이온막 방법으로 교체하더라도 붕산을 회수하여 재사용이 불가능 할 뿐만 아니라 오히려 농축폐액을 처리하기 위한 고화설비를 추가 설치해야 하므로 이에 따른 설치 및 운전비용 증가, 작업자 피폭증가, 처분대상 고체폐기물 발생량 증가 등 많은 역효과가 수반된다. 따라서 원자력발전소로부터 환경으로 배출되는 붕산에 의한 환경영향 최소화, 붕산폐액 처리 및 회수를 위해 방사성폐액 처리방식을 변경하는 것은 적절치 않으며 붕산 소모량을 최소화하기 위해서는 1차 계통수 배출에 대한 철저한 관리감독 및 붕산 회수방안의 개발이 요구되었다.

1.4 붕산 회수방안 개발

1.4.1 3D도면 작성 프로그램 개발

1) 목적

작업구간 이외의 구간에 대한 추가적인 배수를 방지하여 방사성폐액 발생량 저감 및 작업시간 단축

2) 사용 프로그램

Auto CAD

3) 사용 방법

- 주요계통의 밸브 및 배관에 대한 사전 정보(위치, 길이, 내경 등) 입력
- 작업구간 결정
- 해당 밸브번호 입력
- 선택한 구간 내 입체도면 표시
- 입체도면을 활용하여 작업구간의 배수 예상 물량 산출

4) 대상계통 선정

- 정비작업 시 방사성폐액을 발생시키는 1차측 주요계통
(원자로냉각재계통, 안전주입계통/정지냉각계통, 격납건물 살수계통, 화학 및 체적제어계통)
- 방사성폐액을 발생시키지 않으나, 특정 화학물질을 함유하고 있어서 방사성폐액처리설비의 기능을 저하시키는 계통(1차기기냉각수계통)

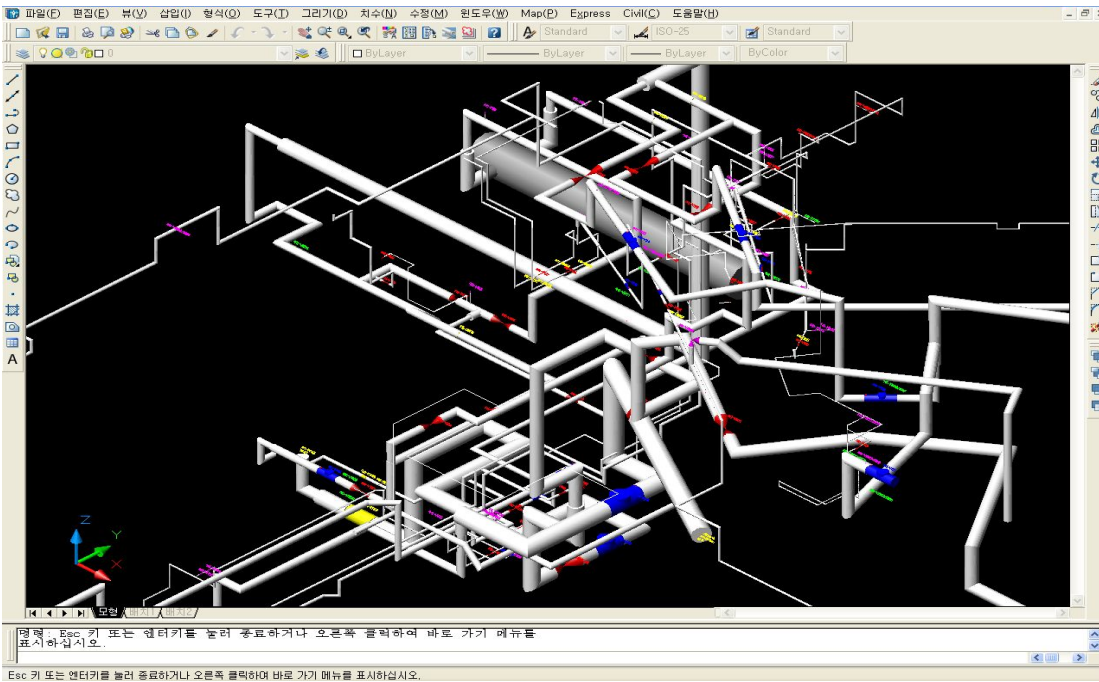


그림3.13 3D 도면 작성 프로그램

1.4.2 봉산 회수방안 개발

탱크 바닥이나 펌프 위치(높이) 이하의 배관에 잔류하는 봉산수를 회수하여 재사용하기 위해 강제 배수방안을 개발하였다. 대상 구간은 회수할 물량이 많으며 회수가 용이할 것으로 판단되는 1차계통 내 대구경 배관을 선정하였다.

1) 회수방법

배수가 필요한 구간 내에서 상대적으로 Elevation이 높은 부위에 위치한 배기밸브로 압축공기를 가압하여 저압안전주입펌프/격납건물살수펌프 재순환 배관을 통해 봉산수를 밀어냄으로써 재장전수탱크(RWT)로 회수하였다.

2) 실증시험

봉산수 회수 대상 구간은 그림3.15와 같이 안전주입계통(B계열 RWT부터 저압 안전주입펌프 전단까지) 및 격납건물살수계통(B계열 격납건물살수펌프 전단까지)으로 선정했다. 실증시험 전 3D도면 작성 프로그램을 이용하여 회수 예상 물량을 산출(28m³)했으며 재장전수탱크(RWT) 수위 상승분으로 환산한 실제 회수 물량은 25.2m³이었다.

RWT 수위 변화 추이

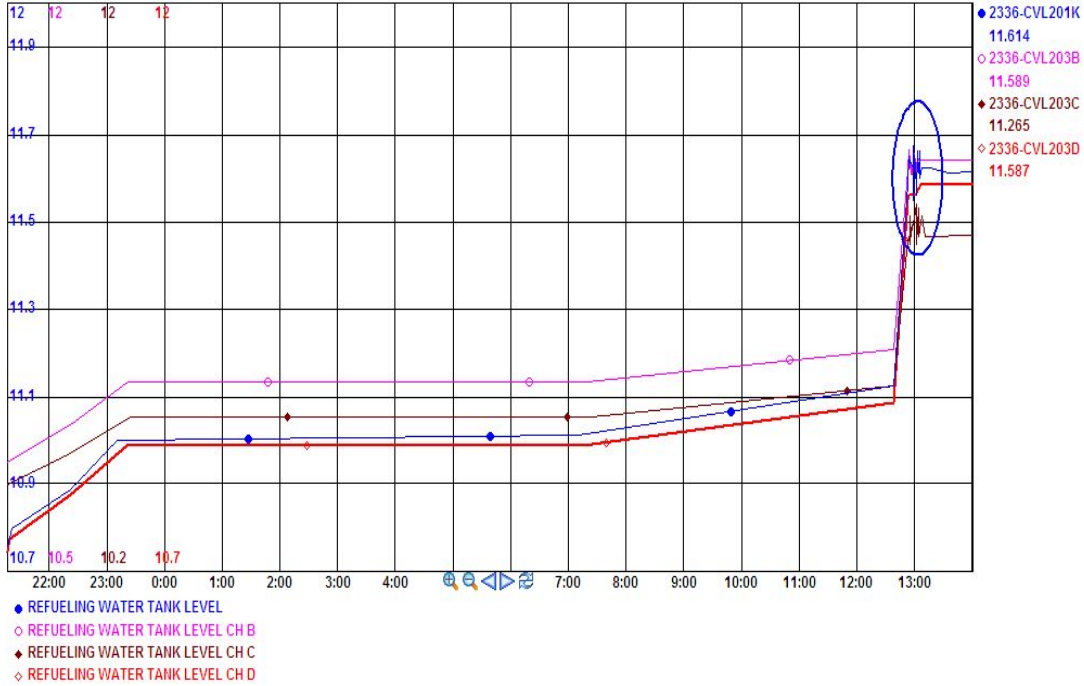


그림3.16 RWT 수위 변화 그래프

2. 세탁폐액 처리

2.1 세탁폐액의 영향

방사선관리구역 작업용품 세탁폐액은 소외환경으로 직접 배출이 불가능할 경우 방사성물질을 제거하기 위해 LRS로 유입된다. 세탁폐액은 세제의 주성분인 이온성계면활성제 및 방사선관리구역 작업복 제염을 위해 사용하는 제염제를 포함한다. 세제 및 제염제는 주성분인 계면활성제를 다량 함유하고 있어 선택적이온교환설비(LRDPS) 내 활성탄흡착제와 이온교환수지 각각의 고유 성능인 흡착과 이온교환에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 본 절에서는 현재 사용되고 있는 세제 및 제염제가 LRDPS내 활성탄흡착제(Activated Carbon Adsorbent)와 이온교환수지(Ion Exchange Resin)에 미치는 영향을 분석하여 LRDPS의 성능을 제고할 수 있는 방안을 제시하였다.

2.2 계면활성제 고찰

계면이란 기체와 액체, 액체와 액체, 액체와 고체가 서로 맞닿은 경계면이다. 계면활성제란 이런 계면의 경계를 완화시키는 역할을 하기 때문에 계면이 가지고 있던 표면장력을 약하게 한다. 계면활성제는 세제용으로 많이 사용되는 것 이외에도 식품과 화장품의 유화제, 보습제로도 많이 사용되고 있다. 계면활성제는 약간의 화학구조를 변형시켜도 특성이 크게 달라져 종류도 다양하다.

2.1.1 음이온성 계면활성제

물에 녹았을 때 친수기가 마이너스(-)로 대전하는 것으로 세정제로 널리 사용되는 비누가 대표적이다. 기포력, 분산력, 세정력이 뛰어나기 때문에 보디샴푸, 세안제 등에 사용된다.

2.1.2 양이온성 계면활성제

물에 녹았을 때 친수기가 플러스(+)로 대전하는 것으로 모발 표면에 대한 흡착성이 뛰어나기 때문에 모발용 린스, 섬유의 유연방지제로 사용된다.

2.3 설계개념 검토

방사성세탁계통 배수탱크(RLS Drain Tank)에 수집되는 폐액은 방사선관리구역 세탁실에서 발생하는 세탁폐액, 출입통제건물 내 인체 제염폐액 및 해당지역 바닥배수이다. 배수탱크로 이송된 폐액은 소외환경으로 직접 배출여부를 결정하기 위해 충분한 시간동안 재순환운전을 수행하여 균질성(Homogeneity)을 확보한 뒤 시료를 채취·분석한다. 분석 결과 감마방출핵종의 방사능 농도가 Zero-Release 개념에 해당하는 검출하한치(LLD : 감마방출핵종에 대해 $1.85 \times 10^{-2} \text{Bq/cc}$)^[8] 미만인 경우에 한하여 LRS Monitor Tank 배출배관을 통해 액체유출물 감시기(RMS Effluent Monitor) 감시 하에 소외환경으로 배출되고 검출하한치를 초과할 경우 LRS의 Chemical Waste Tank로 이송하여 원심분리설비와 탈염기(LRDPS)를 통해 처리된다. 필요시 원심분리설비를 우회하여 직접 탈염기로 이송할 수 있고 Chemical Waste Tank에 산(酸)제(Acid)나 가성(苛性)제(Caustic)를 첨가하여 폐액의 수소이온농도를 중성으로 유지한다.

2.4 총유기탄소(TOC)농도 분석

2.4.1 총유기탄소 측정의 중요성

총유기탄소(TOC : Total Organic Carbon)는 용존성유기탄소(DOC)와 입자성유기탄소(POC)의 합이다. 하천의 유기성 오염 증가원인을 파악하는데 있어 전통적인 측정방법인 BOD(생물학적 산소 요구량), COD(화학적 산소 요구량) 측정만으로는 오염원인 분석이 어렵다는 사실이 20세기말이 되면서 보편화 되고 있다. 따라서 하천의 오염을 BOD, COD만으로 평가하는 것에서 한 단계 더 나아가 고분자 유기성 오염물의 현황을 파악하기 위하여 총유기탄소(TOC=POC+DOC)로 평가된 수치로써 하천의 오염 저감대책을 수립하고 있다. 독일, 스위스, 미국 등에서는 이미 TOC로 관리하고 있으며 일본도 TOC를 도입하였다. 즉 현행 오염관리를 위해 측정되고 있는 COD 측정과 더불어 용해성 유기물도 함께 측정되어야 내부 생성 유기물 평가가 가능하며 이를 위해서는 총유기탄소(TOC)도 함께 측정되어야 한다.

2.4.2 총유기탄소 농도 측정

1) 이론적 세제농도

방사선관리구역 작업용품 세탁기로부터 세탁배수탱크(RLS Drain Tank)로 이송되기 전의 세탁폐액 내 세제의 농도를 세탁 시 사용하는 용수량과 세제량을 고려하여 정량적으로 계산하였다.

○ 입력변수

- 세탁기 드럼체적 : 500 ℓ
- 1회 세탁 시 드럼 내 이송되는 세탁용수 량 : 250 ℓ
- 1회 세탁 시 행균 회수 : 3회

○ 이론적 세제농도

- 1회 세탁 시 발생하는 총 세탁폐액 : $(250 \text{ ℓ}/\text{회}-\text{호기}) \times 4\text{회} = 1\text{m}^3/\text{회}-\text{호기}$
- 1회 세탁 시 사용되는 세제량
: $(45\text{grams}/\text{spoon}-\text{회}) \times 5\text{spoons} = 225\text{grams}/\text{회}-\text{호기}$
- 세탁폐액 내 세제농도 : $(225 \text{ grams}/\text{회}-\text{호기}) \div (1\text{m}^3/\text{회}-\text{호기}) = 22.5\text{ppm}$

2) 세제농도 측정시험

이론적 세제농도는 위항과 같이 계산할 수 있으나, 세탁배수탱크에 최종 수집되는 폐액은 세탁폐액 뿐만 아니라 인체제염실 제염수, 공기조화실 응축수, 기타 출입통제건물 바닥배수가 포함되므로 결국 세탁배수탱크에서의 세제농도는 상당히 낮아질 것으로 예상되었으며 측정시험을 통해 확인하였다. 배수탱크에서 채취한 폐액 내 세제농도는 직접 측정(Methylene Blue法)이 불가능하기 때문에 세제의 음이온성계면활성제의 화학식이 $\text{NaO}_3\text{SO}(\text{CH}_2)_{11}\text{CH}_3$ 인 점을 고려하여 TOC(Total Organic Carbon : 총유기탄소) 농도를 측정함으로써 간접적으로 측정하였다.

3) 시험결과

TOC Meter를 이용하여 TOC 농도를 3회 측정된 결과 평균값은 4.64ppm으로 정량적으로 계산한 순수하게 세탁기로부터 발생하는 세제농도 22.5ppm보다 훨씬 작음을 알 수 있다. 배수탱크 내 폐액은 다시 LRS의 Chemical Waste Tank로 모이게 되므로 Chemical Waste Tank로 유입되는 기타 다른 폐액원으로부터의 TOC량에 의존하여 추가로 희석되거나 농축될 수 있다. 본 시험을 위해 분석한 시료의 경우 Chemical Waste Tank에서의 TOC농도는 2.77ppm으로 감소하였다. 그림3.17은 세탁폐액이 원심분리기 및 탈염기 통과 시 TOC 변화를 보여준다.

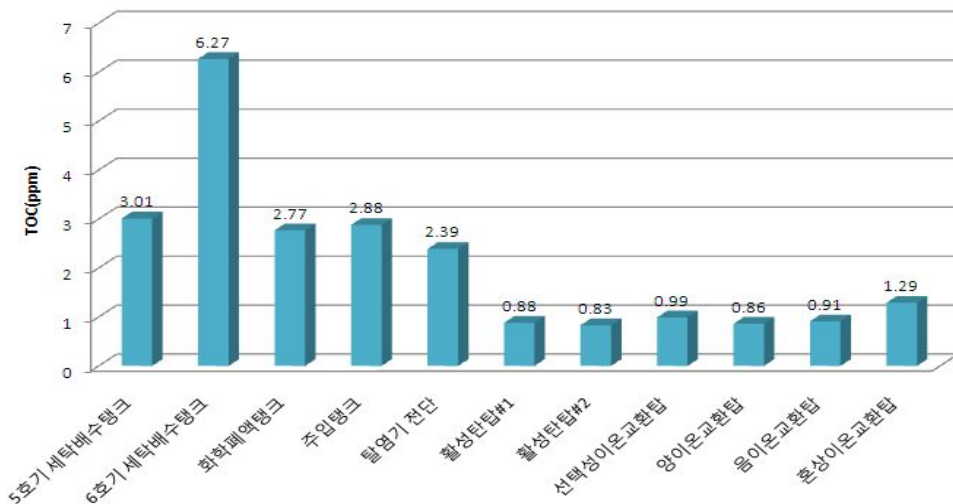


그림3.17 LRS로 처리 시 세탁폐액의 TOC 농도 변화

2.5 세탁폐액의 영향 분석

2.5.1 시험방법

세제 및 제염제가 함유된 방사성폐액을 원심분리기 및 탈염기를 순차적으로 통과시키면서 시료를 채취하여 TOC 농도와 방사능 농도를 분석하였다.

2.5.2 시험결과

1) 원심분리기에서의 영향

세탁폐액이 원심분리기를 통과하기 전·후 TOC 농도 변화와 방사성핵종의 농도 변화를 분석하였다. TOC의 경우 처리전에 저 농도이므로 처리 후에도 측정오차범위 내에서 거의 변화가 없었으나, 처리 전·후의 폐액을 육안으로 확인해 본 결과 폐액의 투명도가 확연히 구분될 정도로 처리 후 폐액은 처리 전 폐액에 비해 아주 맑은 상태를 나타내었는데 이는 원심분리기에서 처리 시 대부분의 세제 성분이 제거됨을 확인시켜 주는 결과로 볼 수 있다.

방사성물질의 경우에는 제염계수가 97로서 대부분의 방사성 핵종이 원심분리기에서 제거됨을 확인할 수 있었다.

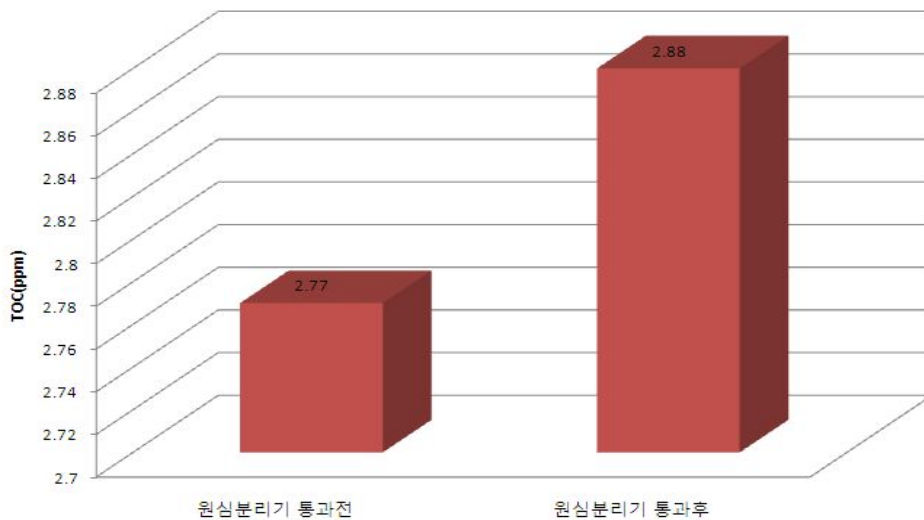


그림3.18 원심분리기의 세탁폐액 처리전·후 TOC 농도 변화

표3.10 원심분리기의 세탁폐액 처리전·후 방사성핵종 농도 변화

측정지점	방사성핵종 농도(Bq/cc)			
	Zn-65	Co-65	Co-58	Mn-54
원심분리기 통과 전	4.16×10^{-2}	5.84×10^{-1}	2.22×10^{-1}	3.88×10^{-1}
원심분리기 처리 후	0	0	3.78×10^{-3}	8.52×10^{-3}

2) 활성탄흡착제에 대한 영향

음이온성 계면활성제는 활성탄흡착탑에 의해 거의 100% 흡착제거가 가능하고 세제성분과 함께 기타 유기물질의 경우도 최대 80% 이상 제거가 가능함은 고도정수처리시설에서 널리 알려진 사실이다. 시험 결과 LRDPS 활성탄흡착탑의 TOC 제거율은 최대 65.5%였다. 그림3.19는 세탁폐액이 다량 포함된 폐액을 원심분리기를 이용하여 전 처리를 수행한 뒤 LRDPS로 공급 후 활성탄흡착탑 전·후단에서의 TOC 농도 변화를 보여준다.

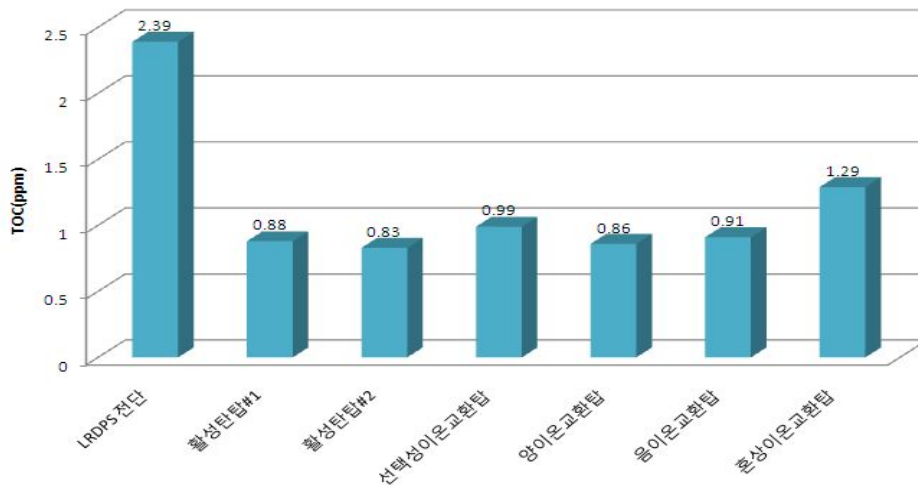


그림3.19 LRDPS의 세탁폐액 처리 시 TOC 농도 변화

시험결과에서 알 수 있듯이 많은 양의 유기물질은 활성탄흡착탑에서 제거되기 때문에 이온교환수지로 유입되는 유기물질의 농도는 불과 수 ppm정도로서 이온교환수지의 성능을 저하시키지 않을 것으로 판단할 수 있으나, 지속적인 고농도 세탁 폐액의 유입은 상대적으로 활성탄 흡착제의 수명을 단축시키고 결국은 활성탄흡착제의 교체로 인한 고체폐기물 발생량을 증가시키는 결과를 초래할 것이다.

3) 이온교환수지에 대한 영향

활성탄흡착탑에서 흡착되지 않고 이온교환수지탑 특히 음이온 교환수지탑으로 유입된 음이온성 계면활성제의 경우 설펜산 계열인 황산기($-S_3^-Na^+$)가 음이온교환수지와 교환작용을 하게 됨으로써 음이온 교환 량이 소량 감소될 것으로 예상된다. 그러나 액체방사성 폐기물 내 용존고형물(Dissolved Solid) 중 주요 제거 대상인 방사성 물질은 +2가인 금속이온성으로서 양이온교환수지에서 이온교환이 일어남을 고려할 때 전반적인 이온교환수지탑의 용존 고형방사성 물질의 제거 성능에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 물론 폐액 내 용존 고형방사성물질 중 Iodine이나 Antimony 핵종은 각각 -1가 및 -3가의 음이온성을 갖는 경우도 있으므로 꾸준한 고농도 세탁폐액의 음이온 교환수지탑으로의 유입은 결과적으로 방사성 Iodine과 Antimony 핵종의 이온 교환 량을 감소시키거나 기존의 교환되어 수지에 결합되어 있던 Iodine 또는 Antimony 핵종과 재 이온교환이 일어날 것으로 예상할 수 있겠지만 LRDPS의 활성탄흡착탑을 통과한 후 이온교환수지탑으로 유입되는 폐액의 TOC 농도가 수 ppm임을 고려할 때 이러한 상황이나 정도는 크게 고려할 만한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 앞에서 활성탄흡착탑을 통과한 폐액내 TSS 농도가 수 ppm 이내로서 현행 사용량의 세제에 포함된 음이온성계면활성제는 전반적인 탈염기의 방사성물질 제거 성능 저하와는 무관함을 그림3.20을 통해 알 수 있다. 세탁용수는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} 등 2가 양이온 금속인 경도물질의 양이온성 용존고형물을 포함하는 원수(Raw Water)이므로 세탁폐액이 탈염기(LRDPS)의 양이온 교환수지의 수명을 급격히 감소시킬 수 있다는 추론이 가능하므로 이에 대한 영향을 분석하기 위해 세탁용수부터 탈염기(LRDPS) 후단에 이르기까지 시료에 대한 전기전도도를 측정함으로써 이온함량 변화를 간접적으로 파악하였다. 표3.11에서 알 수 있듯이 세탁용수에 포함된 정도의 양이온성 용존고형물은 RLS Drain Tank, Chemical Waste Tank에 수집 및 원심분리기를 통과하면서 점차 그 농도가 감소하고 탈염기를 통과하면서는 감소하지 않았다. 이것은 원수에 포함된 경도물질인 양이온성 용존고형물과 이온교환수지와 이온교환이 현저하게 일어나지 않는다는 것을 나타낸다.

2.5.3 분석결과

방사선관리구역 작업용품 세탁 시 사용하는 세제가 LRDPS에 미치는 영향은 성능 시험 결과 고려할 만한 수준이 아님을 확인할 수 있었다. 그러나 세탁폐액의 지속적인 LRS로의 유입과 활성탄흡착제의 흡착용량을 초과하는 농도의 세제를 사용할 경우에는 원심분리기로 전 처리를 수행할 경우라도 결국 활성탄흡착탑의 고차압 발생이나 단기간 내 흡착포화를 유발할 가능성이 높아 잦은 역세정(Backwashing)운전이나 흡착제의 교체를 고려해야 하고 그렇지 않을 경우 필연적으로 이온교환수지의 성능저하를 가져오게 된다. 따라서 활성탄흡착탑의 역세정 횟수나 흡착제 교체주기를 연장하고 아울러 이온교환수지의 성능 저하를 방지하기 위해서는 첫째, 세제 및 첨가되는 계면활성제가 주성분인 제염제의 사용량을 최저수준으로 낮춘다. 둘째, 세제는 비이온성 계면활성제를 사용한다. 셋째, 방사성폐액 처리설비로서 증발기(Evaporator)를 사용하는 발전소에서 사용중인 무세제 세탁방식을 도입해야 한다. 특히 세제를 포함하는 세탁폐액에 대해서는 반드시 원심분리기로 전처리를 수행하여 잔류 세제와 부유고형물을 제거한 후 방사능 농도에 따라 LRDPS로 처리해야 한다.

3. 함유폐액 처리

3.1 함유폐액의 특성

기름이 LRS로 다량 유입되는 경우 LRDPS 내 활성탄흡착제의 흡착능력을 급속히 저하시킴으로써 잦은 활성탄 교체를 유발할 수 있으며 또한 활성탄흡착제의 흡착능력 저하로 이온교환수지탑으로까지 유입될 경우 이온교환수지와 물리적인 결합에 의해 수지 알갱이를 코팅하게 되고 이온교환수지의 고유 성능인 이온교환 특성을 저해하게 된다. 따라서 LRDPS 성능 최적화를 위해서는 LRS로 유입되는 기름을 최소화할 필요가 있으므로 기름성분 제거를 위한 설계개념, 기름성분 유입에 따른 활성탄 및 수지의 영향, 기름 제거방법, 국내외 발전소의 기름 제거설비 운영현황 등에 대한 검토를 통해 최적의 LRS 기름성분 유입 방지방안을 제시하였다.

3.2 설계개념 검토

방사선관리구역 내 각종 기기로부터 바닥 배수구를 통해 LRS로 유입되는 기름으로 인한 LRDPS내 이온교환수지의 성능 저하를 방지하기 위해 다음과 같은 순서에 따라 기름유입을 방지하도록 설계되어 있다.

3.2.1 기기에서 누출방지

기름을 사용하는 기기에 대한 기름누출 방지요건을 적용하여 운전원이 인지하지 못하는 기름누출사고를 방지한다.

3.2.2 발생원에서 제거

다량의 기름이 발생할 가능성이 있는 지역에서 작업 시 기름누출 방지 Curb를 설치하여 집수조에 유입되지 않도록 하고 Curb 지역에 수집된 기름은 별도의 기름 처리 설비로 이송하여 처리한다. 집수조에서 기름 제거 흡착포 및 Skimming 설비를 이용하여 제거한다.

3.2.3 집수조 이후에서 제거

이온교환수지탑 전단에 2대의 활성탄흡착탑을 직렬로 설치하여 40ppm 미만의 기름을 제거한다.

3.3 활성탄흡착제 및 이온교환수지에 미치는 영향 분석

40ppm 미만의 기름 폐액에 대해 활성탄흡착탑 전·후단의 고차압 발생 시까지 운전할 경우 활성탄흡착탑 체적의 10,000배 이상을 처리할 수 있도록 설계되어 있고 활성탄흡착탑에 기름성분이 유입되는 경우 기름성분이 활성탄의 미세 공극들에 스며들어 흡착되게 된다. 그러나 고농도 기름폐액이 활성탄흡착탑에 유입되는 경우 활성탄은 빠른 시간 내에 포화상태에 도달하게 되고 운전원이 인지하지 못하는 사이에 후단의 이온교환수지탑으로 유입될 가능성이 있다. 기름성분이 이온교환수지탑에 유입되는 경우 기름성분과 수지사이의 물리적인 결합에 의해 수지 알갱이의 표면을 덮거나 수지 알갱이 내부에 들어가 이온교환수지의 고유성능인 이온교환 특성을 저해하게 된다.

3.4 기름폐액 분리방법 검토

LRS내 다량의 기름 유입은 LRDPS 성능을 저하시키므로 기름이 LRS로 유입되기 전에 최대한 줄여야 한다. 미국 EPRI^[16]에서도 기름을 사전에 분리·제거토록 권고하고 있다. 해외 원전에서 현재 적용하고 있는 기름 분리방법은 크게 2가지로 분류되는데 각 건물 바닥 집수조에서 제거하는 방법과 LRS내에서 제거하는 방법이다.

3.4.1 바닥 집수조에서 유수 분리방법

1) 기름 흡수재를 이용하는 방법

바닥 집수조에 많은 기름이 유입되었을 경우, 운전원이 기름 흡수재를 이용하여 기름폐기물을 제거하는 방법이다. 이 방법은 운전원이 수동으로 모든 작업을 수행하므로 번거롭다는 단점이 있다.

2) 유수 분리펌프를 이용하는 방법

바닥 집수조에 다량의 기름이 유입되었을 경우, 운전원이 이동식 유수분리펌프를 이용하여 기름을 제거하는 방법으로서 바닥 집수조에 유수분리펌프 설치가 용이하도록 설치공간 확보가 집수조 설계 시 반영되어야 한다.

3.4.2 LRS내에서 유수 분리하는 방법

1) Cartridge Type Oil Coalescer 설치

기름을 포함한 유체가 Cartridge를 통과하면서 비중의 차이로 기름이 분리되는 방식으로 Housing과 교체 가능한 Cartridge로 이루어져 있다. 미국 내 발전소 중 Fermi 원자력 발전소에서 Cartridge Type Oil Coalescer를 사용하는 것으로 조사되었으나, 사용한지 얼마 되지 않아서 막힘(Plugging)현상으로 LRS의 높은 압력 강하를 유발하게 되었고 이로 인한 빈번한 Cartridge 교체로 가동비용 증가, 방사성 폐기물 증가 및 작업자의 피폭 방사선량 증가로 현재는 사용하고 있지 않고 있다.

2) Plate Type Oil Coalescer

Cartridge Type과 유사하게 기름을 포함한 유체가 Plate Bundle을 통과하면서 비중의 차이로 기름이 분리되는 방식으로 여러 종류가 있으나 대부분 사각형의 Tank와 Plate Bundle 및 Skimmer 등으로 이루어져 있다. 미국 내 4개 이상의 원전에서 Plate Type Oil Coalescer 를 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 특히 조지아 전력회사에서는 새로 설계한 방사성폐기물 처리설비를 자사의 North Anna 원전과 Surry 원전에 설치하였는데 최신 처리설비에 Oil 제거용으로 Plate Type Oil Coalescer를 사용하였다. 이들 Plate Type Oil Coalescer는 바닥 배수 및 기기배수 계통에서 기름을 분리하는데 성공적으로 사용되고 있으며 관련 기기를 보수할 필요성이 적고 기기의 성능이 좋은 것으로 조사되었다. 즉 해외 원전의 경우 대부분의 발전소에서 LRS로 유입되는 폐액 내 기름제거를 위한 가장 보편적인 방법으로 집수조에서 제거하는 방식을 적용하고 있다.

3.5 기름 유입방지 활동 및 제거설비 검토

3.5.1 해외 원전

해외 원전의 기름 제거설비 운영현황은 다음과 같다.

표3.12 해외 원전 기름 제거설비 운영현황^[16]

발전소명	설비용량	기름 제거설비
Salem Nuclear Generating Station (미국, PWR)	1106MWe	· 기름 흡착탑을 이온교환기 전단에 설치하여 기름제거
Trojan Nuclear Plant (미국, PWR)	1095MWe	· 기본적으로 집수조에서 제거 · 소량의 기름은 기름흡착포를 이용 · 다량의 기름은 집수조 표면의 기름층을 55갤런 드럼으로 이송후 드럼 내에서 기름과 물을 분리시키고 기름이 제거된 물은 다시 집수조로 회송
Laguna Verdi (멕시코, BWR)	654MWe	· 기본적으로 집수조에서 제거 · 유수분리기 이용 · 집수조 바닥에 침전되어 있는 기름 슬러지를 제거하여 방사성 폐액내의 유기물질 근원 제거 · 집수조에서 LRS로 이송 전 시료채취 가능한 장치 설치 · 기름Tracking System을 개발하여 원전에서 사용되는 전반적인 기름 추적 관리 · 전체 기름의 Material Balance를 적용하여 배수계통으로 유입되는 기름 파악 · 실제로 집수조를 검사하여 누출량 확인
Oconee (미국, PWR)	846MWe	· 기본적으로 집수조에서 제거 · Skimmer 이용
Seabrook (미국, PWR)	1150MWe	· 기본적으로 집수조에서 제거 · Weir를 설치이용
TMI (미국, PWR)	786MWe	· 기본적으로 집수조에서 제거 · 기름흡착 Bag 이용
Surry (미국, PWR)	781MWe	· 폐기물수집탱크에서 특수 넘침관을 이용하여 제거하고 LRS에 수평형 기름제거설비를 설치하여 여분의 기름 제거

3.5.2 국내 원전

영광5,6호기의 경우 방사선관리구역 내에서 생성되는 폐기름의 대부분은 계획예방 정비기간 중 원자로냉각재펌프에서 배유되는 12드럼(55갤런), 기타 충전펌프 등 각종 기기에서 발생하는 폐유 약 4드럼으로 전량 수거하여 자체처분 또는 위탁처리하고 있다. 따라서 LRS로 유입되는 기름은 부주의로 인해 바닥에 버려져 집수조에 모이는 정도로 추정된다. 영광5,6호기에서는 LRS로 기름이 유입되는 것을 방지하기 위해 관리적 차원의 감시활동(Administrative Control)과 물리적 제거방법을 병행하고 있다. 관리적 차원의 감시활동으로 주기적으로 각 건물 내 집수조를 점검하고 있으며 물리적 제거방법으로 각 건물 바닥 배수구에 기름흡착포를 설치하고 기름성분 발견시 기름흡착포 및 이동형 기름제거설비를 이용하여 1차적으로 제거하고 활성탄흡착탑을 이용하여 최종 제거한다.

3.6 검토 결과

기름이 LRS로 다량 유입되는 경우 LRDPDS 내 활성탄흡착제의 흡착능력을 급속히 저하시킴으로써 잦은 활성탄 교체를 유발할 수 있으며 연이어 활성탄흡착제의 흡착능력 저하로 이온교환수지탑으로까지 유입될 경우 이온교환수지와 물리적인 결합에 의해 수지 알갱이를 코팅하게 되어 이온교환수지의 고유 성능인 이온교환 특성을 저해한다. 따라서 LRDPDS 성능 최적화를 위해서는 LRS로 유입되는 기름을 최소화할 필요가 있다. 한편 국내외 원전의 기름 제거설비 운영현황을 조사해 본 결과 대부분의 발전소에서 LRS로 유입되는 폐액 내 기름제거를 위한 노력들이 경주되고 있으며 구체적인 방법들은 발전소 특성 및 편의에 따라 다양하나 가장 보편적인 방법은 집수조에서 제거하는 것으로 조사되었다. 이온교환수지탑으로 기름유입을 최대한 억제하기 위한 노력의 일환으로 관리구역 내 기름 누출 가능성이 있는 지역의 모든 배수구에 기름흡착포를 설치하고 집수조 감시 주기를 최소한으로 단축 시행하며 감시 결과 소량의 기름이 발견된 경우 기름흡착포를 이용하여 얇은 기름막을 제거한다. 다량의 기름이 발견된 경우 이동식유수분리설비로 기름을 분리하여 별도의 드럼에 수집하고 폐액은 다시 집수조로 회송시킨다. 또한 기름 제거용 Pillow를 집수조에 띄워 운영함으로써 감시 주기 사이의 기름 누출에 대비한다. 이러한 유수분리설비를 사용할 경우 집수조 내 기름의 함량을 10ppm 이하로 충분히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

제 3 절 효과 분석

1. 전처리설비 설치

1.1 LRDPs 충전물 교체량

전처리설비 설치전,후 LRDPs 충전물(활성탄, 이온교환수지) 교체현황은 표3.13과 같다. 상업운전직후인 2004년도 및 2005년도에는 LRS의 성능이 정상적으로 유지되고 있었으므로 충전물 교체량이 적었으나, LRS의 성능저하 현상 발생 및 악성폐기물이 생성되기 시작한 2006년도에는 충전물 교체량이 급증한 것을 알 수 있다. 2006년 11월 전처리설비 설치 후 성능시험이 시작되었으며 2007년 2월 성능시험이 완료되었는데 전처리설비가 정상적으로 운전되기 시작한 2008년도부터는 충전물 교체량이 감소되었다. 전처리설비 운전과 무관하게 충전물 교체량이 연도별로 다소 차이가 나는 것은 계획예방정비 기간의 차이가 원인으로 추정된다. 계획예방정비 기간 중에는 방사능 농도가 높은 방사성폐액이 다량 발생하므로 방사성폐액처리설비의 부하를 증가시켜서 수지의 포화시간을 단축시키기 때문이다.

표3.13 LRDPs 충전물 교체 현황

○ A계열

(단위 : ℓ)

연도	활성탄탑-1	활성탄탑-2	선택성 이온교환탑	양이온 교환탑	음이온 교환탑	혼상탑	합계
2004	2700	2700	0	1270	1270	1270	9210
2005	2450	1250	0	0	0	0	3700
2006	2400	2400	0	2132	2232	1982	11146
2007	2400	1200	0	2200	2200	2200	10200
2008	0	0	0	0	0	0	0
2009	0	0	0	1200	1200	1200	3600

○ B계열

(단위 : ℓ)

연도	활성탄탑-1	활성탄탑-2	선택성 이온교환탑	양이온 교환탑	음이온 교환탑	혼상탑	합계
2004	2700	2700	0	1270	1270	1270	9210
2005	1250	1250	0	0	0	0	2500
2006	2300	2300	0	2982	2332	3182	13096
2007	1200	1200	0	2165	2257	1116	7938
2008	1200	0	0	1100	1082	1096	4478
2009	1200	1200	0	1200	1200	1200	6000

○ 교체 총량

(단위 : ℓ)

연도	활성탄탑-1	활성탄탑-2	선택성 이온교환탑	양이온 교환탑	음이온 교환탑	혼상탑	합계
2004	5400	5400	0	2540	2540	2540	18420
2005	3700	2500	0	0	0	0	6200
2006	4700	4700	0	5114	4564	5164	24242
2007	3600	2400	0	4365	4457	3316	18138
2008	1200	0	0	1100	1082	1096	4478
2009	1200	1200	0	2400	2400	2400	9600

1.2 폐기물 드럼 발생량

표3.13의 충전물 교체량을 200ℓ 폐기물 드럼으로 환산하면 다음과 같다.

표3.14 200ℓ 드럼으로 환산한 양

연도	충전물 교체량(ℓ)	드럼 수	비 고
2004	18420	92.1	
2005	6200	31.0	
2006	24242	121.2	
2007	18138	90.7	2007년 2월 : 전처리설비 정상운전
2008	4478	22.4	
2009	9600	48.0	

전처리설비 설치전인 2004년부터 2006년까지 연 평균 환산 드럼 수는 81.4개이고 전처리설비 설치후인 2007년부터 2009년까지 연 평균 환산 드럼 수는 53.7개로서 전처리 설비 운전으로 연간 약 30 드럼이 감소하는 것으로 분석되었다.

1.3 방사선 피폭량

관련 자료의 수집이 어려워서 정량적으로 평가하기는 어려우나, LRDPs 충전물 교체량이 감소함에 따라 충전물 교체 작업시간 감소로 작업자의 방사선 피폭량이 감소될 것으로 예상되며 방사성폐액을 재순환하여 처리하지 않고 상시 발전소 배출 목표값 (1.85E-02Bq/cc) 이하로 방출이 가능할 것으로 추정된다.

2. BAC 용존산소제거설비 설치

2.1 순수 생산비용

BAC 증류수를 회수하지 않고 방사성폐액으로 처리함으로써 RMWT를 순수계통에서 보충하는데 소요되는 비용을 다음과 같이 계산할 수 있다.

- BAC 연속운전 시 일일 최대 증류수 발생량 : 109m³ (근거 : 운전자료)
- BAC 운전일수 : 21.7day/Rx-yr (표3.15 참조)
- 증류수 발생량 : 2,365.3m³/Rx-yr (109m³/day × 21.7day/Rx-yr)
- 순수 생산단가 : 3,822원/m³ (2008년 영광5,6호기 기준 / 표3.16 참조)

계산 결과에서 알 수 있듯이 1개 호기 기준으로 1주기당 약 1천만 원의 순수 보충비용이 추가로 소요되는 것으로 추정되었으며 BAC 증류수를 회수하여 재사용하는 경우 이 비용을 절감할 수 있다.

표3.15 영광5호기 6주기 BAC 운전현황

BAC 기동	BAC 정지	운전시간(hr)	비고
2008. 5.11 20:10	2008. 5.15 13:40	89.1	2008.4.4 10:00 계통병해 2008.5.8 05:56 계통병입 2009.8.23 10:00 계통병해
2008. 6. 9 22:15	2008. 6.12 18:35	68.3	
2008.11.13 22:00	2008.11.14 10:40	12.7	
2009. 3.17 22:25	2009. 3.19 16:15	41.8	
2009. 6. 2 13:25	2009. 6. 4 21:30	56.1	
2009. 7. 8 22:00	2009. 7.11 23:00	73.0	
2009. 7.31 11:20	2009. 8. 3 17:00	77.7	
2009. 8.17 10:00	2009. 8.21 16:30	102.5	
누계		521.2(21.7day)	

표3.16 순수 생산단가 구성

항 목	산출 내역
여과수 사용비	여과수 사용량(m ³) × 여과수 단가(원/m ³)
공업약품 사용비	황산, 가성소다, 활성탄
전력비	순수생산 소요전력, 활성탄탑 재생전력
인건비	순수생산설비 운전원
감가상각비	토목감가상각비, 기계감가상각비

2.2 정비비용 및 방사선 피폭

BAC 증류수를 방사성폐액으로 처리하기 위한 원심분리기의 운전시간이 감소함에 따라 기기의 고장 빈도가 감소해 정비 비용이 감소하며 또한 정비원의 방사선 피폭량이 감소하게 된다. 원심분리기 운전시간은 1주기 당(1개 호기 기준) 약 11일이 감소할 것으로 예측되었다.

- BAC 증류수 발생량 : 2,365.3 m³/Rx-yr
- 원심분리기 처리용량 : 9 ton/hr
- 원심분리기 운전시간 : 263 hr(10.9일)

3. 봉산폐액 회수

실증시험을 통해 동 방법 적용 시 작업구간의 배수시간이 현저히 단축됨을 확인할 수 있었으며 다른 계통으로 확대 적용하는데 아무런 문제점이 없음을 입증하였다. 봉산수를 회수하여 재사용함으로써 매 주기 봉산 보충에 소요되는 비용을 절감할 수 있으며 배수시간 단축을 통한 계획예방정비 공기 단축으로 주 공정일 경우 약 7억 원 이상의 경제적 효과를 얻는 것으로 분석되었다.

3.1 봉산 보충비용

- 봉산 회수량 : 56,000 ℓ × 4,200mg/ℓ (ppm) × 6.1 = 1.43 ton
 - 회수 물량 : 27m³(A계열) + 25m³(B계열) + 4m³(RCP Casing Vent) = 56m³
 - RWT 봉소농도 : 4,200ppm
 - 봉소 비율 : 61(H₃BO₃) / 10(B)
- 절감 액 : 1.43 ton × 1,245 \$/ton = \$ 1,780

3.2 인건비

- 봉산보충(Batching) 작업 투입 인원 : 2명
- 1회 Batching 량 : 225 kg
- 1일 Batching 횟수 : 6회
- Batching 횟수 감소 : 6.4회 (1,430kg / 225kg)
- 작업량 감소 : 2MD
- 절감 액 : 153,000원

3.3 배수시간

- 계열 당 배수시간이 약 9시간(10시간 → 1시간) 단축되어 계획예방정비(O/H) 공기단축으로 발전량 증가효과 유발
- 주공정일 경우 약 7억원의 경제적 효과
: $1,000,000 \text{ kWh} \times 9 \text{ hr} \times 2\text{계열} \times 40\text{원/kWh} = 720,000,000\text{원}$

3.4 방사성폐액 처리설비 운전시간

- 봉산수 회수량 : 56 ton (4,000 ppm)
- 처리 물량 : 224 ton (LRS 전처리설비 운전조건 : 1,000 ppm)
- LRS 전처리설비 용량 : 7 ton/hr
- 단축시간 : 32 hr

4. 기타

방사선관리구역 작업용품 세탁 시 사용하는 세제가 LRDPS에 미치는 영향은 고려할 만한 수준이 아님을 확인했으나, 활성탄흡착탑의 흡착제 교체주기를 연장하고 이온교환수지의 성능저하를 방지하기 위해서는 세제 및 제염제의 사용량을 최저수준으로 낮춰야 하며 세제는 비이온성 계면활성제를 사용하고 가능하면 무세제 세탁방식을 도입해야 한다. 또한 LRS로 기름유입을 최대한 억제하기 위해서는 해외원전과 같이 배수구에 기름 흡착포 설치, 집수조 감시 주기 단축, 이동식 유수분리설비를 이용한 기름 분리, 집수조에 기름 제거용 Pillow 설치 등의 방법을 적용해야 한다. 이와 같은 최적의 폐액수집 처리 및 관리는 정량적으로 그 효과를 산출하기는 어려우나, LRS의 방사성폐액 처리 성능 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다.

제 4 장 결론

국내에서 영광5,6호기에 최초로 적용된 이온교환법에 의한 방사성폐액처리설비의 운영과정에서 도출된 개선필요사항을 보완하기 위해 분야별 최적의 방안 검토 및 개선 작업을 수행했으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

진처리설비 도입으로 충전물 교체주기가 연장되어 고체폐기물 발생량이 200ℓ 드럼 기준, 연 평균 약 30드럼 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 BAC 증류수를 회수하여 재사용하기 위한 용존산소제거설비 설치는 1주기 당(1개 호기 기준) 약 1천만 원의 순수 보충비용 절감 효과가 있으며 방사성폐액처리계통의 운전시간을 단축시켜서 고장빈도를 감소시키는 효과가 있다. 그리고 3D도면 작성 프로그램 및 강제배수 방법을 개발하여 봉산폐액을 회수한 결과 해당 작업이 계획예방정비 기간의 주공정일 경우 배수시간 단축을 통해 약 7억 원 이상의 경제적 이득을 얻을 수 있는 것으로 평가되었다. 이외에도 이온교환설비의 방사성물질 제거효율을 증가시키기 위해 무세제 세탁방식 도입, 기름성분의 유입 방지 조치 등을 적극적으로 추진해야 할 것으로 분석되었다.

결론적으로 방사성폐액 처리방법 개선에 따라 액체배출 총방사능 및 고체방사성폐기물 발생량은 점진적으로 감소하는 추세이며 본 연구를 통해 효과가 입증된 개선방안은 국내의 타 원전에 선별적으로 확대 적용할 수 있다.

한편 발전소 비정상 상황 발생 시 발생하는 복수탈염설비 재생폐액에 대한 적절한 처리 방법이 강구되고 있지 않은 것은 빠른 시일 내에 해결해야 할 과제였으며 해외에서 적용하고 있는 최신 설비를 국내에 도입하기 전에 충분한 사전 학습이 선행되어야 할 것으로 판단되었다. 또한 신규 설비의 도입 및 운영방법 개선에 따른 효과를 정확하게 분석하여 피드백하기 위해서는 신규 설비의 도입과 성능시험 및 운영과정에서 생성되는 각종 자료들을 체계적으로 관리해야 하며 일정한 주기로 정밀 성능시험을 수행할 필요성이 있다.

참고문헌

- [1] 국내원전 액체방사성폐기물계통 설계경험 (2003.11, 이병식/김길정)
- [2] 한국표준원전(1000MWe) 설계개선사업 종합보고서 (1999.1, KOPEC)
- [3] 방사성폐액 전처리 최적화를 통한 액체방사성폐기물 처리시스템 성능개선 연구 (2006.11, 한국수력원자력)
- [4] SIES 성능개선을 위한 전처리 방안 연구 (2005, 김상수/이상진/심정보외 4인)
- [5] 울진5,6호기 액체방사성폐기물 처리설비 원심분리기 성능 고찰 (2005, 강현대/황수동/이화석)
- [6] 이온교환법과 증발법을 이용한 放射性廢液 처리성능 比較/研究 (2003.2, 조선대학교)
- [7] 영광5,6호기 액체방사성폐기물계통 현안사항 종합검토보고서 (2004.10, 영광원자력)
- [8] 액체폐기물처리계통 방출관리기준 및 처리방안 (2002.5, 영광원자력)
- [9] 고리1,2호기 원자로보충수탱크 용존산소(DO)제거설비 설치 검토 (1999.7, 고리원자력)
- [10] 신고리1,2호기 최종안전성분석보고서 11.2 액체방사성폐기물관리계통
- [11] 영광5,6호기 최종안전성분석보고서 11.2 액체방사성폐기물관리계통
- [12] 먹는 물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙[개정 2009.9.4 환경부령 제347호]
- [13] 원자력발전소 방사선관리 연보(2009, 한국수력원자력)
- [14] ANSI/ANS-55.6-1993 Liquid Radioactive Waste Processing System for Light Water Reactor Plants
- [15] IAEA-TECDOC-1336 Combined methods for liquid radioactive waste treatment
- [16] EPRI TR-101160 Low-Level Radioactive Waste Processing at Nuclear Power Plants: Volumes 1-3
- [17] Conceptual Design of Pre-treatment Process for SIES using Membrane Process (2003.11, 이상진/양호연/신상운)
- [18] The Comparison on Treatment Method of Liquid Radioactive Waste in Yonggwang #3&4 and #5&6 (2004.8, 염유선/김승평/이승진)
- [19] Membrane-based Oxygen Removal System for Water Treatment of Power Plants (2000.01, 한국전력공사)
- [20] A Study on Waste water Treatment Reuse of the tire Factory for Application of R/O(Reverse Osmosis) Membrane Process (2005.8, 전남대학교)

감사의 글

과연 잘 해낼 수 있을까 하는 걱정을 안고 입학했는데 어느 새 논문심사를 받으면서 졸업을 앞두고 있다. 한번 실패 후에 다시 시도한 터라 정신적인 압박감이 매우 컸는데 그때마다 포기하지 않고 학업을 지속할 수 있도록 지도해 주신 송종순 교수님께 진심으로 감사드린다. 특히 랩세미나는 대학원을 다니면서 가질 수 있었던 색다른 경험이었으며 오래 동안 기억에 남을 것이다.

또한 면접시험 때부터 관심을 가져 주시고 만날 때마다 격려해 주신 나만균 교수님, 김진원 교수님께도 깊은 감사를 드리며 논문에 관해 훌륭한 조언을 해 주신 정운관 교수님, 김승평 교수님, 이경진 교수님께도 감사를 드린다.

직장을 다니면서 학교에 다녀야 했기에 여러 가지 어려움이 있었으나, 강재열 본부장님, 김대겸 소장님, 진형호 실장님, 양연석 실장님께서 많은 배려를 해 주셔서 무사히 학업을 마칠 수 있었던 점, 진심으로 감사드린다.

학교에 다니느라고 고등학생인 아들 뒷바라지에 전혀 도움을 주지 못한 나에게 싫은 소리 한번 안하고 힘들 때마다 오히려 용기를 낼 수 있도록 힘을 실어 준 아내에게 평생 갚지 못할 빚을 지고 말았다. 아내에게 고맙다는 말을 전한다. 또한 논문 편집과 관련해 여러 가지 도움을 준 정은 이와 정민 이에게도 고마움을 전한다.

2010년 12월

박복열

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학	학 번	20097285	과 정	석사
성 명	한글 : 박 복 열 한문 : 朴 福 烈 영문 : PARK BOK-YEOL				
주 소	경기도 구리시 인창동 665번지 삼보아파트 304동 1603호				
연락처	e-mail : parkby@khnp.co.kr				
논문제목	이온교환법을 적용한 원전의 방사성폐액 처리방법 개선방안 연구				
	A Study on the Improvement of Liquid Radioactive Waste Treatment System at Nuclear Power Plant By Applying Ion Exchange Method				

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(○) 반대()

2011년 2월

저작자 : 박 복 열 (인)

조선대학교 총장 귀하