



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](#)

2015년 8월
석사학위논문

한빛원전 폐수지 제염공정 개발연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

성 기 흥

한빛원전 폐수지 제염공정 개발연구

Research and Development for Decontamination System of
Spent Resin in Hanbit Nuclear Power Plant

2015년 8월25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

성 기 흥

한빛원전 폐수지 제염공정 개발연구

지도교수 : 정 운 관 교수님

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

성 기 흥

성기홍의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

2015년 5 월

조선대학교 대학원

목 차

	page
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 목적	1
제 2 절 연구 필요성	2
1. 기술적 측면	2
2. 산업·경제적 측면	2
제 3 절 국내·외 연구개발 동향	3
1. 오염 폐수지의 처리·처분 기술현황	3
2. 현 기술의 취약성 및 향후 전망	3
3. 기술수준 향상 기여도	4
제 2 장 이온교환수지의 특성 및 발생현황	5
제 1 절 이온교환수지 구조 및 특성	5
1. 이온교환수지 구조 및 종류	5
2. 이온교환수지의 물리적 성질	7
3. 이온교환수지의 화학적 성질	9
제 2 절 이온교환수지의 개요 및 발생현황	12
1. 증기발생기 취출수 정화용 이온교환수지 개요	12
2. 한빛 제1발전소 취출수 정화용 혼상수지 개요	14
3. 2차계통 순환수 중의 주요 방사성핵종 및 이온결합특성	15
4. SG 취출수 정화용 수지 사용 및 발생현황	16
5. 국내원전 방사성폐수지 보관현황	17
6. 한빛 제1발전소 SG 취출수계통(BM) 폐수지 보관현황	17
7. 국내원전 방사성폐수지 자체처분 현황	18
8. 문제점	19

제 3 절	혼상수지의 이온결합분리 및 방사 화학적 규명	21
1.	폐수지내 방사성핵종 이온결합 형태 규명	21
2.	폐수지내 방사성핵종 분리·제거 메커니즘	22
3.	폐수지내 유·무기형 방사성탄소(C-14) 분리·제거 메커니즘	22
제 3 장	폐수지 핵종별 비방사능 조사	24
제 1 절	고형폐기물 자체처분 인·허가 사항 조사	24
제 2 절	한빛 제1발전소 발생 폐수지 γ 핵종 평가	27
제 3 절	한빛 제1발전소 발생 폐수지 ^{14}C , ^3H 농도 분석	28
1.	폐수지 중 ^{14}C 및 ^3H 분석기술 확립	28
2.	폐활성탄시료를 이용한 ^{14}C , ^3H 분석기술 교차평가	29
3.	폐수지 중 ^{14}C , ^3H 농도 분석 결과	30
4.	폐수지 중 유·무기형 ^{14}C 농도 분석	31
제 4 절	한빛 제1발전소 발생 폐수지 중 ^{60}Co 농도 분석	32
제 5 절	추가 폐수지시료 오염특성평가	32
1.	폐수지시료의 적합성 평가	33
2.	폐수지시료 혼합비율 평가	34
3.	추가 폐수지시료 중 ^{14}C 농도분석 및 오염특성평가	35
4.	폐수지시료 중 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도분석 및 오염특성평가	37
제 4 장	폐수지 제염공정 개발	41
제 1 절	화학약품을 이용한 방사선 핵종 분리 실험	41
1.	화학약품을 이용한 ^{14}C 추출·분리 메커니즘	41
2.	실험장치 및 실험결과	42
제 2 절	초음파와 미세버블 실험장치 제작 및 제염실험	48
1.	초음파 실험장치 제작 및 제염실험	48
2.	마이크로버블 실험장치 제작 및 제염실험	51
3.	초음파 및 마이크로버블 제염실험	53
4.	초음파를 이용한 폐수지 제염 성능평가	55
5.	초음파를 이용한 추가 폐수지시료 제염실험	56

제 3 절	제염폐액 정화용 실험장치 구성 및 정화실험	58
1.	황산처리 및 초음파/마이크로버블처리 폐액 분석	58
2.	고분자응집제를 이용한 폐액처리 실험	58
3.	여과기술을 이용한 오염폐액의 정화 실험	61
제 4 절	초임계 이용 방사능 추출실험 및 추출제 선정	62
제 5 절	초임계로 제작 및 분리·추출 실험	63
1.	초임계이산화탄소를 이용한 방사성핵종 추출·분리 메커니즘	63
2.	초임계이산화탄소 추출·분리장치 제작	63
3.	방사성폐수지로부터 ^{60}Co 추출·분리효율 평가 실험	64
제 6 절	2차폐기물(이물질) 처리실험	65
1.	탈착 이물질 성분분석	65
2.	탈착 이물질의 산성용액처리	66
제 7 절	훈상폐수지 분리실험	67
1.	훈상폐수지 분리 기초실험	67
제 8 절	폐수지 제염공정 및 시스템개요	69
1.	폐수지 제염공정 수립	69
2.	폐수지 제염시스템 구성	71
제 5 장	결론	72
참고문헌	73

표 목 차

표 1. 원자력 이온교환수지의 물리화학적 특성	13
표 2. 혼상수지(Purolite NRW 36)의 물리화학적 특성	14
표 3. SG 발생 폐수지 중 방사성핵종 및 이온결합특성	15
표 4. 국내원전 사용 SG 취출수 정화용 수지 현황(2007년 기준)	16
표 5. 국내원전보관 폐수지 현황(2010.12.31)	17
표 6. 한빛 제1발전소 보관 폐수지 현황(2013.3.31)	17
표 7. 국내원전 방사성폐수지 자체처분 현황(2002~2011)	18
표 8. 원전본부별 폐수지 저장현황	20
표 9. 한빛 제1발전소 SG 취출수계통 폐수지 방사성핵종 및 농도 (단위 Bq/g)	27
표 10. 폐활성탄시료 중의 ^{14}C , ^3H 교차분석 결과	29
표 11. 폐수지의 이물질 분리전·후 ^{14}C , ^3H 분석결과	30
표 12. 원자로 형에 따른 ^{14}C 의 화학적 형태와 존재비율	31
표 13. 한빛 제1발전소 발생 폐수지 중 유·무기형 ^{14}C 농도	31
표 14. 폐수지와 이물질 분리전·후 ^{60}Co 농도 분석결과	32
표 15. 추가 폐수지시료의 혼합비율 및 감마핵종농도 (현장분석)	33
표 16. 폐수지시료 혼합비율	34
표 17. 추가 폐수지시료 중 ^{14}C 농도 분석결과	35
표 18. 폐수지시료의 유·무기형 ^{14}C 농도 분석결과	35
표 19. 폐수지시료의 ^{14}C 농도 분석결과	36
표 20. 폐수지시료 중 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도 분석결과	38
표 21. 폐수지시료의 ^{60}Co 농도 분석결과	40
표 22. 폐수지시료의 ^{137}Cs 농도 분석결과	40
표 23. 화학약품 종류별 제염실험결과	44
표 24. 황산수용액 농도에 따른 방사성핵종 분리실험결과	45
표 25. 황산처리 폐수지 및 이물질 중 유·무기형 ^{14}C 농도 분석결과	45
표 26. 반응온도별 방사성핵종 분리실험	46

표 27. 반응시간별 방사성핵종 분리실험	47
표 28. 초음파를 이용한 폐수지 제염실험결과	50
표 29. 미세버블을 이용한 폐수지 제염실험결과	53
표 30. 이물질 분리 및 양·음이온수지 분리 전·후 방사능 농도	54
표 31. 폐수지와 이물질 분리전·후 방사성핵종 분석결과	55
표 32. 초음파를 이용한 추가 폐수지시료의 제염실험 결과	56
표 33 황산처리 폐액 및 초음파/마이크로버블처리 폐액 분석결과	58
표 34 응집제 투입량에 따른 폐액 중 ^{60}Co 제거실험 결과	59
표 35. 용액의 pH에 따른 폐액 중 ^{60}Co 제거 실험결과	59
표 36. 저 농도 폐액 응집효율 향상실험 결과	60
표 37. 응집제 사용에 따른 COD 영향평가 실험결과	60
표 38. 초음파공정 폐수 중의 금속이온농도	61
표 39. 초임계를 이용한 폐수지 중 ^{60}Co 추출·분리결과	64
표 40. 폐수지부터 분리한 이물질 분석결과	65
표 41. 혼상폐수지의 양·음이온수지 분리결과	68

그림 목 차

그림 1. 이온교환수지 구조 (X=관능기)	5
그림 2. 증기발생기 취출수 계통 개략도	12
그림 3. 이온성 방사성핵종 분리 메커니즘	21
그림 4. 이온성 방사성핵종 결합 메커니즘	22
그림 5. 강산성 양이온교환수지 형태 및 구조	23
그림 6. 폐수지 전처리 및 분석 장치	28
그림 7. 자석분리 폐수지와 이물질	30
그림 8. 감마핵종분석기	32
그림 9. 추가 폐수지시료	33
그림 10. 양·음이온수지 분리 후 비율평가	34
그림 11. 폐수지와 이물질 분리 전·후 시료상태	39
그림 12. 화학약품을 이용한 폐수지 제염장치	42
그림 13. 화학약품을 이용한 제염 전·후 폐수지 현상	43
그림 14. 초음파세척의 원리도	48
그림 15. 초음파를 이용한 폐수지 제염실험장치	49
그림 16. 일반기포와 마이크로버블의 소멸과정	52
그림 17. 마이크로버블을 이용한 폐수지 제염실험장치	52
그림 18. 초음파처리 후 폐수지, 이물질 및 막대자석	56
그림 19. 초음파처리 전·후 폐수지와 이물질의 전자현미경($\times 75$) 관찰모습	57
그림 20. 초임계이산화탄소 하에서 Co 추출효율	62
그림 21. 초임계이산화탄소를 이용한 방사성핵종 추출 메커니즘	63
그림 22. 초임계이산화탄소 추출실험장치	64
그림 23. 이물질 산성용액처리 후 여과모습($5\mu\text{m}$)	66
그림 24. 염화나트륨 포화수용액을 이용한 혼상수지 분리실험	67
그림 25. 양·음이온 교환수지 분리	68
그림 26. 저 방사성 BM 폐수지 제염공정 단계	69
그림 27. 저 방사성 BM 폐수지 제염공정기술	70
그림 28. 저방사성 BM 폐수지 제염시스템 구성도	72

ABSTRACT

Research and Development for Decontamination System of Spent Resin in Hanbit Nuclear Power Plant

Seong, Gi Hong

Adviser : Prof. Jeong, Un Gwan, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

When reactor coolant leaks occur due to cracks of a steam generator's tube, radioactive materials contained in the primary cooling water in nuclear power plant are forced out toward the secondary systems. At this time the secondary water purification resin in the ion exchange resin tower of the steam generator blowdown system is contaminated by the radioactivity of the leaked radioactive materials, so we pack this in special containers and store temporarily because we could not dispose it by ourselves. If steam generator tube leakage occurs, it produces contaminated spent resins annually about 5,000 ~ 7,000 liters. This may increase the amount of nuclear waste productions, a disposal working cost and a unit price of generating electricity in the plant. For this reasons, it is required to develop a decontamination process technique for reducing the radioactive level of these resins enough to handle by the self-disposal method.

In this research, First, Investigated the structure and properties of the ion exchange resin used in a steam generator blowdown system. Second, Checked for a occurrence status of contaminated spent resin and a disposal technology. Third, identified the chemical characteristics of the waste radionuclides of the spent resin, and examined ionic bonding and separation mechanism of radioactive nuclear species and a spent resin. Finally, we carried out the decontamination experiment using chemicals, ultrasound, microbubbles, supercritical carbon dioxide to process these spent resin.

In the case of the spent resin decontamination method using chemicals, the higher the concentration of the drug decontamination efficiency was higher. In the ultrasound method, foreign matter of the spent resin was removed and was found that the level of radioactivity is below of the MDA. In the microbubbles method, we found that the concentration of the radioactivity decreased after the experiment, so it can be used to the decontamination process of the spent resin. In supercritical carbon dioxide method, we found that it also had a high decontamination efficiency.

According to the results of these experiments, almost all decontamination method had a high efficiency, but considering the amounts of the secondary waste productions and work environment of the nuclear power plant, we judged the ultrasound and supercritical carbon dioxide method are suitable for application to the plant and we established the plant applicable decontamination process system on the basis of these two methods.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 목적

증기발생기 취출수(Blow Down)계통의 탈염 탭은 증기발생기 세관누설 시 방사성물질 제거하여 2차계통의 오염 확산을 방지하기 위한 수질정화 탭으로 연평균 약 10,000 ℓ 정도의 폐수지가 발생되고 있다. 원자력발전소의 가동 연수 경과에 따라 SG 세관의 미세결함 발생으로 교체된 폐수지에서 소량의 방사성 핵종이 검출되어 이들 폐기물의 처리·처분 방향이 결정되지 않은 상태에서 발전소 내에 장기 보관 중 임.

증기발생기 취출수 탈염 탭으로 부터 발생한 폐수지의 핵종분석결과, 일부 수지에서는 저 방사성 농도의 Co-60 핵종이 검출되었고 분석 값은 $5.7 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/g}$ 로 규제기관의 자체처분 규제 및 절차서 기준 값인 $2.7 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/g}$ 을 약간 초과하고 있는 것으로 확인되어 이들 폐수지의 자체처분 유도를 위해 수지 재생법을 이용한 자체 제염시험을 수행해 본 결과, 수지에 흡착된 미량의 방사능 물질의 방사능을 분리·제거가 가능함을 확인한 바 있음.

구체적이고 실효성 높은 미량의 방사성 핵종의 분리·추출, 수지의 방사선(능) 평가, 2차 폐기물의 안전한 처리를 통해 자체처분 기술을 확립하고, 이러한 사전 응용연구 결과를 토대로 전 발전소에 쌓여 있는 폐수지의 자체처분을 유도하기 위해 자동화 기능을 지닌 폐수지 제염시스템을 구축함으로써 전사적으로 추진 중인 감용화 정책에 탄력적으로 대응하고자 하며, 전 원전의 공통 현안사항을 해결함으로써 방사성폐기물의 제염 및 감용에 따른 소내 저장 공간의 이용률 제고와 장기보관에 따른 부담감 해소 및 방사성폐기물 처분비용을 절감하는데 기여하고자 함.

제 2 절 연구 필요성

1. 기술적 측면

- 방사성 폐이온교환수지는 저준위 방사성 물질로서 집중관리가 요구되는 폐기물 임.
- 폐수지는 분해처리가 가능한 고분자물질이나 취급 및 감용화 처리가 어려우며 미량의 방사능 물질을 함유 시 자체처분을 위한 핵종 추출이 용이하지 않음.
- 방사성핵종 분리·추출로 자체처분 제한 값 기준 이하를 만족하는 제염시스템 필요. 폐수지에 방사능 오염이 많이 되어 있을 경우, 제염처리 과정에서 발생하는 휘발성 방사성 물질의 포집 및 방사성 기체의 환경방출을 최소화할 수 있는 기체 폐기물 처리기술이 고려되어야 함.
폐수지의 제염 처리 공정 시 중 발생하는 2차 폐기물의 발생량을 최소화할 수 있는 기술이 요구됨.

2. 산업·경제적 측면

- 방사성 수지의 효율적 관리를 통한 발전소 내 저장공간 활용 극대화.
- 경제적 감용 처리에 의한 방사성폐기물 중간저장 및 처분비용 절감 유도.
- 2015년까지 한수원(주)의 감용화 정책에 탄력적으로 대응.
- 자체처분 시 주민수용이 용이한 방사성폐기물 처리를 위한 전문기술 확보 필요.

제 3 절 국내·외 연구개발 동향

1. 오염 폐수지의 처리·처분 기술현황

분 류	개 발 기 술	
저 장	방사능 감쇄(Decay)처분을 위한 영구저장	
	최종처리 또는 처분 전 발전소 내에 임시저장	
분리, 추출	PIL0 제염공정, ¹⁴ C Stripping, 산세척, 열 탈착, Foam화, Mechanochemistry, 고압분사, 초임계 CO ₂ - 추출	
분 해	열분해/소각	소각대체
	열분해/소각, 다성분 입자연소 열화학 처리, 고온압축 유리화, 플라즈마	산소화, 습식산화 수증기 개질, 전기화학적 산화 용융염 산화, 촉매추출
안정화	시멘트고화(적용중단, 원전)	
	아스팔트 고화(적용중단, KAERI)	
	고분자 매질로 고화	
	고건전성용기 내 탈수 후 처분	

2. 현 기술의 취약성 및 향후 전망

가. 현 기술의 취약성

- 폐수지 내 함유 방사성핵종 분리·추출 기술이 실증되어 있지 않음.
- 극 저준위 방사능농도(자체처분 기준 이상)를 제염할 수 있는 기술 미확보.
- 2차폐기물의 완벽한 처리기술 미흡.

나. 향후전망

- 국내 원전에서 발생하는 중·저준위 방사성폐수지의 제염에 활용.
- 중·저준위 오염 폐수지의 제염 및 자체처분 승인취득.

3. 기술수준 향상 기여도

가. 기술낙차 해소 기여도

- 방사성물질의 분리·추출이 어려운 고분자 중합체로부터 처분대상 핵종만을 선택적으로 분리·추출하여 제거하는 제염기술 확보.
- 제염 전·후 폐수지의 방사능 Inventory 평가기준 확립.
- 폐수지의 자체처분을 위한 규제기관의 인·허가 승인.

나. 전력사업에의 공헌도

- 전사적 방사성폐기물 감용화 정책 및 발전운영경비 절감에 기여.
- 발전소 내 공간이용률 제고와 장기보관에 따른 부담감 해소 및 처분비용 절감.

제 2 장 이온교환수지의 특성 및 발생현황

제 1절. 이온교환수지 구조 및 특성

1. 이온교환수지 구조 및 종류

이온교환(ion exchange)은 어느 물질을 염류의 수용액과 접촉시켜 두었을 때, 그 물질 속의 이온은 용액 속으로 나오고 용액 속의 이온이 그 물질 속으로 들어가는 현상을 의미한다. 즉, 용액 중의 다양한 이온들과 불용성 수지(이온교환 수지) 사이에서 같은 하전(positive or negative)을 가진 이온들의 가역적 교환인 것이다. 이온교환수지는 다양한 무기 및 유기물질을 사용할 수 있으나, 현재 사용되고 있는 이온교환수지는 대부분 합성수지이며 고분자 매트릭스로 스티렌(Styrene)에 디비닐벤젠(Divinylbenzene, DVB)을 가교제로 사용하여 그림 1.에 나타낸 것과 같이 3차원의 망상구조를 가진 수지를 가장 널리 사용하고 있다. 이는 화학적으로 안정하다는 장점을 갖고 있지만, 150℃ 이상에서는 사용할 수 없다는 단점도 지니고 있다.

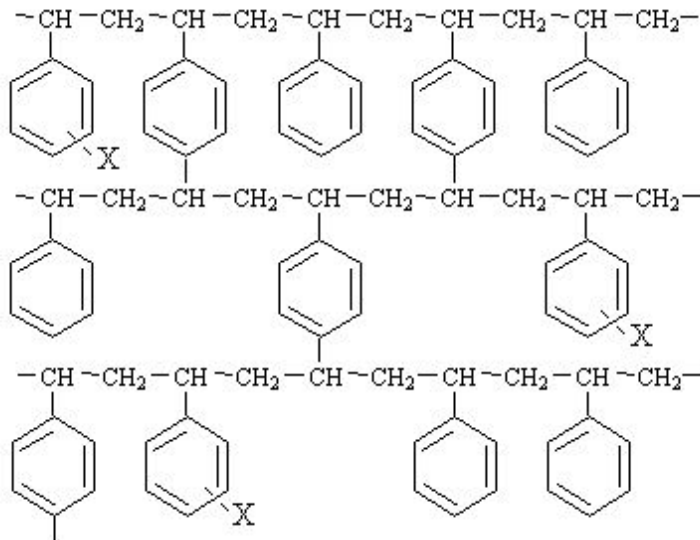
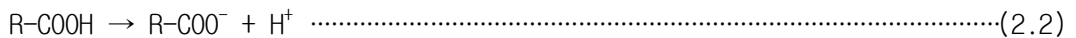
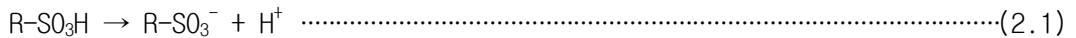


그림 1. 이온교환수지 구조 (X=관능기)

이온교환수지의 관능기에 따라 양이온교환수지(cation ion exchanger)와 음이온교환수지(anion ion exchanger)로 분류된다.

(1) 양이온교환수지

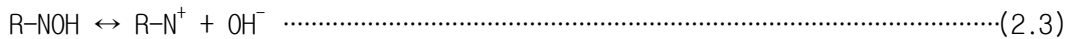
망상구조의 기초 고분자 모체에 교환기로서 술폰산기(-SO₃H)와 카르복실기(-COOH) 등을 결합시킨 것을 양이온교환수지라고 하며 Ca²⁺, Na⁺, H⁺ 등과 같은 양이온을 교환한다. 이온교환수지의 기초 고분자 모체부분을 R로 표시하면 양이온교환수지는 R-SO₃H, 또는 R-COOH로 표시할 수 있으며, 수중에서는 다음과 같이 전리한다.



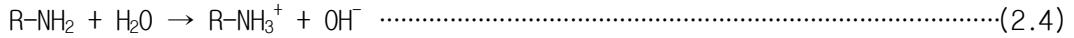
R-SO₃H 형 수지는 전리하기 쉽고 염산, 황산 등의 무기산에 상당하는 강산성이므로 강산성 양이온교환수지라고 한다. 이에 반하여 R-COOH 형의 수지는 유기산과 같이 전리하기 어렵고 약산의 성질이 있으므로 약산성 양이온교환수지라고 한다. 강산성 양이온교환수지는 강산성이므로 알칼리 쪽에서는 물론 산성용액 중에서도 전리하여 이온 교환할 수 있는데 반하여, 약산성 양이온교환수지는 산성에서는 전리하지 않으므로 이온교환성은 중성에서부터 알칼리성 용액 중에만 한정되어 있다.

(2) 음이온교환수지

음이온을 교환하는 이온교환수지로 3차원으로 축중합한 고분자 모체에 교환기로서 4급 암모늄 또는 1~3급 아민(-NH₂ 1급 아민, -NHR 2급 아민, -NR₂ 3급 아민)을 결합시킨 것을 음이온교환수지라고 하며, HCO₃⁻, SO₄²⁻, OH⁻, Cl⁻ 등과 같은 음이온을 교환한다. 이 중 4급 암모늄을 교환기로 하는 수지는 염기도가 강하여 강염기성 음이온교환수지라고 하며, 이런 수지를 R-NOH로 표시하며 수중에서는 다음과 같이 전리한다.



4급 암모늄기는 염기도가 높아서 거의 전 pH 범위 (0~14)용액 중에서 전리하며 이온을 교환한다. 1~3급 아민을 교환기로 하는 음이온교환수지는 염기도가 약하여 약염기성 음이온교환수지라고 한다. R-NH₂ 형의 수지는 다음과 같이 전리한다. 그러나 알칼리성에서는 미해리 상태, 즉 전리하지 않으므로 이온교환성은 없다.



2. 이온교환수지의 물리적 성질

(1) 다공성

음이온교환수지의 기초 고분자 모체를 여러 가지 제조방법으로 합성할 수 있기 때문에 다양한 다공성을 가진 고분자 모체를 얻을 수 있다. 기초 고분자 모체가 가진 다공성은 이온교환수지의 이온교환 반응속도, 이온교환 평형, 물리적 강도 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 다공성은 공중합체 중에 함유한 가교제 양에 의존하고 가교제 양이 증가하면 고분자 망상은 작아지고 이온교환수지의 내부구조는 조밀하게 되어 이온교환속도는 작아지며 큰 이온은 이온교환수지의 내부로 들어가지 못하는 경향이 있다. 반면 가교제가 적으면 다공성은 크게 되고 큰 이온도 교환 가능하게 되지만 함유율이 높아지고 이온교환수지의 물리적 강도도 약하게 된다.

(2) 물리적 강도

물리적 강도란 이온교환수지 자체의 기계적 강도를 말하며, 이는 교환용량과 더불어 이온교환수지의 중요한 성질 중의 하나이다. 물리적 안정성(물리적 강도)이란 주로 이온교환수지의 팽윤 수축이나 기계적 충격에 의한 입자의 파괴에 대한 안정성을 말하는 것이다. 이온교환수지를 칼럼 처리할 때 흐르는 처리수 내에서 이온교환수지의 붕괴로 보다 작은 수지가 형성되어 유속의 저하가 일어난다. 역으로 수지가 물리적 파괴를 하지 않는다면 입자 크기는 사실상 일정하고 따라서 유속은 일정하게

유지된다. 이온교환수지의 물리적 강도 측정 방법으로는 micro cycle법, 건·습식법, 불밀시험, 압착시험 및 피스톤 펌프시험 등이 있지만 가장 일반적으로 피스톤 펌프시험으로 측정한다. 피스톤 펌프시험은 피스톤 펌프로 일정한 압력 하에서 흡착 및 재생을 반복하여 수지 안정성을 측정한다. 안정성의 척도는 반복처리 전·후의 수지 시료를 현미경으로 관찰하여 완전한 bead의 수 변화로 표시한다. 시험 후 완전한 bead의 수가 많으면 수지는 보다 안정하다. 시료의 물리적 강도가 상당히 큰 경우는 이 시험에 있어서도 분화하여 유량저하를 가져오지 않고 구형을 조차도 작아지지 않는다.

(3) 입도

일반적으로 입경이 작으면 반응속도는 크게 되지만 사용할 때 탑의 압력손실이 크고, 반면에 입경이 클수록 압력 손실이 작아지고 흐르는 액체속도는 상승시킬 수 있지만 반응속도는 낮아진다.

(4) 함수율

이온교환수지는 그 자체에 보유한 함수량에 따라 교환용량이 좌우된다. 즉 함수량에 의해 이온교환수지 내의 망상이 확대되기 때문에 이온교환수지의 함수율이 높게 되면 보다 큰 이온이 교환반응을 용이하게 할 뿐만 아니라 이온교환수지상 내부로의 이온 확산속도에도 영향을 미치게 된다. 함수율은 가교도의 감소와 이온교환기의 수가 증가함에 따라서 커지게 된다.

(5) 열적 성질

술폰산기를 교환기로 한 강산성 양이온교환수지는 수용액 또는 비수용액 중 100~200℃의 고온에서 산 촉매로 이용하는 것이 이미 알려져 있지만, 일반적으로 현재 범용 강산성 양이온교환수지의 사용 상한 온도는 겔형이 120℃, MR형이 150℃이다. 반면에 대부분의 음이온교환수지는 50~60℃에서 사용하는 것으로 알려져 있다. 또 스티렌-디비닐벤젠(Styrene-DVB) 공중합체를 이온교환수지 모체로 한 것도 200℃이상의 고온에 사용되면 일부 고분자 자체가 연화해서 분해가 일어나는 것으로

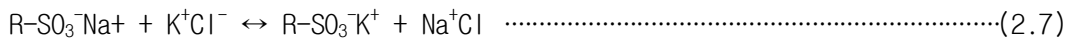
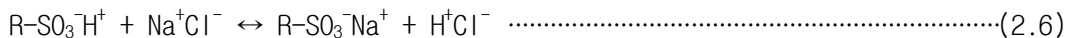
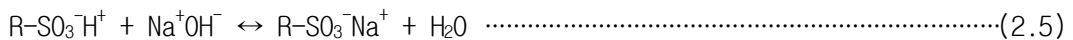
알려져 있다. 또한 강산성 양이온교환수지에 있어서 술폰산기를 가진 벤젠에 할로겐, 니트로기, 에스테르기, 카르복실산기와 같은 전자흡인기를 도입하면 열안정성은 증가하지만 메틸기, 메톡시기와 같은 전자공여기를 도입하면 열안정성은 저하된다.

3. 이온교환수지의 화학적 성질

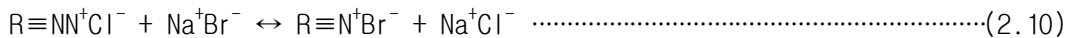
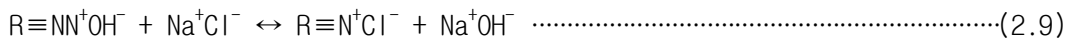
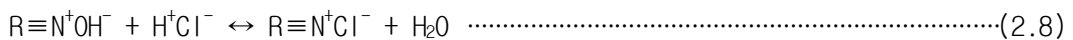
(1) 이온교환작용

양이온교환수지는 이온교환수지 자체가 갖고 있는 양이온보다도 친화성이 있는 유·무기 양이온이 접근하면 보다 친화성이 있는 것과 결합하고 초기에 결합하고 있는 양이온을 떼어 내어 교환 작용이 일어난다. 또한, 음이온교환수지도 보유하고 있는 음이온보다도 친화성이 있는 다른 유·무기 음이온이 접근하면 용이하게 교환한다.

★ 강산성 양이온교환수지의 교환반응



★ 약염기성 음이온교환수지의 교환반응



(2) 친화성 및 선택성

이온교환수지는 교환기와 교환이온으로 되어 있다. 교환기와 교환이온의 상호작용력은 정전기적 인력에 의해서 조절되기 때문에 교환기가 같아도 이온의 종류에 따라 그 정전기적 인력이 다르다. 이온의 흡착은 교환 반응에 관여하는 2개의 이온의 이온반경과 전하에 의존한다. 이온이 묽은 수용액에서 같은 전하를 갖는 이온이라도 이온반경이 작을수록, 이온의 수화에너지가 작을수록 잘 교환 흡착된다. 묽은 수용액에서 교환 범위는 교환이온의 원자가 증가와 함께 더욱 증가한다.

★ 원자가에 의한 이온교환능 : $\text{Na}^+ < \text{Ca}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Th}^{4+}$

또, 전하가 같은 저 농도 수용액에서의 교환 순위는 교환이온의 원자번호가 증가함에 따라 더욱 더 증가한다.

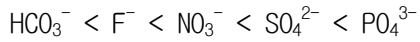
★ 원자번호에 의한 이온교환능 : $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+$
 $\text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Sr}^{2+} < \text{Ba}^{2+}$

한편, 고농도 이온, 비수용액계(nonaqueous media), 고온에서의 교환 순위는 위에 기술한 것처럼 저 농도 수용액 계에서 보여주는 것과 같이 일반적인 순서를 나타내지만 어떤 경우에는 순서가 바뀌는 경우도 있다. 그러나 다른 원자의 이온교환 순위는 원자번호가 증가하여도 거의 같다. 이와 같이 이온교환반응은 계의 여건에 따라서 영향을 받는다. 소량의 가교제로 만들어진 이온교환수지는 교환 흡착성이 극히 크지만 가교제가 다량 사용된 것은 교환 흡착성은 극히 작다. 큰 이온은 교환수지의 망상조직 내로 들어가지 못할 것이고 이것은 일종의 분자체(molecular sieve)의 작용을 의미하는 것이다.

이상을 종합하면 양이온교환수지의 양이온에 대한 선택성의 순서는 $\text{Ba}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ti}^+ > \text{Ag}^+ > \text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ 이다. H^+ 의 선택성은 강산성수지에서는 Na^+ 와 Li^+ 의 중간에 위치한다.

$\text{Li}^+ < \text{H}^+ < \text{Na}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Co}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$

음이온교환수지의 선택성은 양이온에 대한 선택성의 순서는 Citrate > SO₄²⁻ > Oxalate > I⁻ > NO₃⁻ > CrO₄²⁻ > Br⁻ > SCN⁻ > Cl⁻ > Formate > Acetate > F⁻ 이다. OH⁻는 강염기수지에서는 Acetate와 F⁻의 중간에 있고, 약염기수지에서는 수지에 따라서 차이가 있지만 훨씬 왼쪽에 위치한다.



(3) 이온교환과정

이온교환수지의 이온교환속도는 일반적으로 상당히 빠르다. 이온이 교환위치에 접근하여 교환되는 속도보다도 용액 중의 이온이 이온교환체로의 확산속도에 따라서 결정된다고 생각하고 있다.

- ★ 교환체 표면으로의 이온의 확산단계.
- ★ 이온교환수지 내로 이온의 확산단계.
- ★ 교환체 내의 움직일 수 있는 이온과의 교환단계.
- ★ 교환체 밖으로 교환한 이온의 확산단계.

이 교환과정은 교환한 이온의 용액의 농도, 교환속도, 입자의 직경, 이온교환수지 입자의 가교도, 계의 온도, 이온교환수지의 수화도(팽윤) 등의 요소에 의존한다.

제 2절. 이온교환수지의 개요 및 발생현황

1. 증기발생기 취출수 정화용 이온교환수지 개요

증기발생기 취출계통(Blowdown)은 정상 운전 중 증기발생기 2차측 급수의 화학성분을 조절, 취출수가 복수기로 가기 전에 취출수가 갖고 있는 열을 회수 및 증기발생기 튜브 지지판 위에 쌓인 찌꺼기들을 제거한다. 그림 2.에 나타낸 바와 같이 취출계통은 연속 취출수 탱크, 고유량 취출수 트레인, 열교환기 및 탈염기로 구성되어 있다.

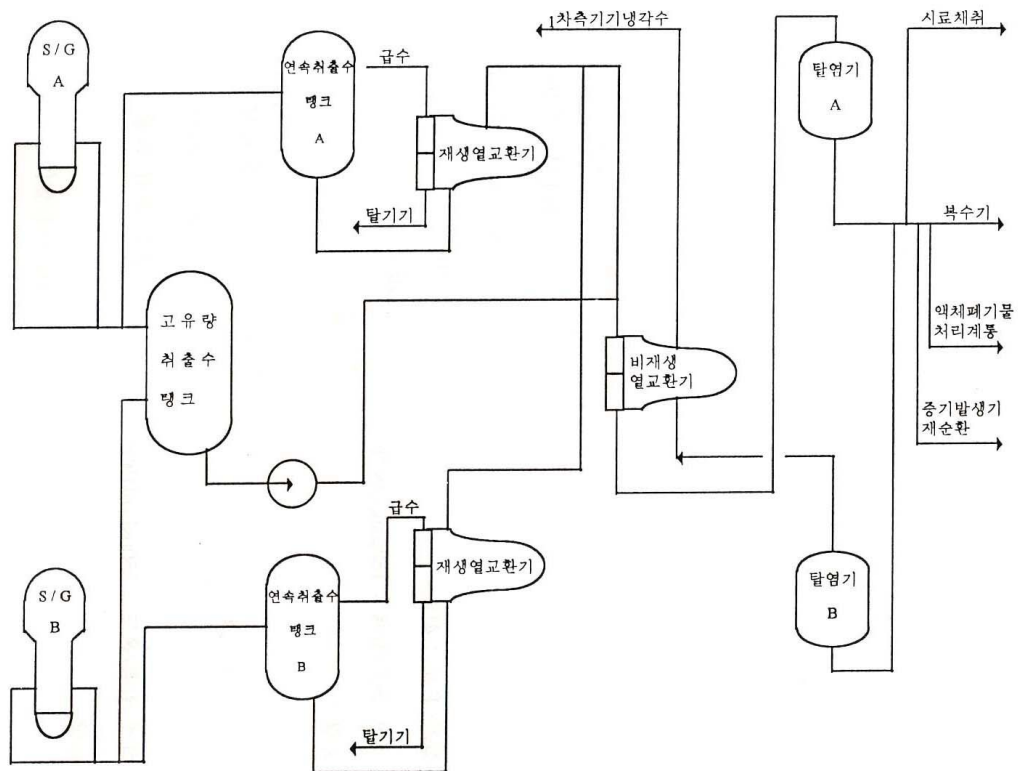


그림 2. 증기발생기 취출수 계통 개략도

증기발생기 취출계통 탈염기에는 증기발생기 세관누설 시 방사성물질을 제거하여 2차계통의 오염 확산을 방지하기 위한 수질정화를 목적으로 원자력급 양이온, 음이온 및 혼상이온교환수지를 사용하고 있으며, 사용되는 수지의 물리화학적 특성을 표 1에 정리하였다.

표 1. 원자력급 이온교환수지의 물리화학적 특성

구 분	양이온교환수지	음이온교환수지	혼상이온교환수지
품 명	DOWEX HGR NG (H)	DOWEX SBR LC NG (OH)	GRAVEX GR 3-16 N
모 체	Polystyrene-DVB		
형 태	Gel		
관능기	$-SO_3^-$	$-(CH_3)_3N^+$	Cation : $-SO_3^-$ Anion : $-(CH_3)_3N^+$
이온형	H^+	OH^-	Cation : H^+ Anion : OH^-
이온교환능력(eq/L)	2.0	1.2	Cation : 2.4 Anion : 1.2
함수율(%)	46 - 52	60	Cation : 36 - 42 Anion : 53 - 59
입도범위(mm)	0.4 - 1.2		
진비중	1.22	1.08	-
최대사용온도(°C)	130	60	-
사용pH범위	0 - 14		

2. 한빛 제1발전소 취출수 정화용 혼상수지 개요

한빛 제1발전소에서 SG 취출수 정화용으로 사용하는 혼상수지(Purolite NRW 36)의 물리화학적 특성을 표 2.에 정리하였다.

표 2. 혼상수지(Purolite NRW 36)의 물리화학적 특성

구 분	물리화학적 특성	
	양이온교환수지	음이온교환수지
품 명	Purolite NRW 36	
모 체	Polystyrene-divinylbenzene	
형 태	Gel	
혼합비율(%)	40	60
관능기	$-SO_3^-$	$-(CH_3)_3N^+$
이온형 / 함량 (%)	H^+ / 99.9	OH^- / 95
기타 이온 (%)	-	CO_3^{2-} (5), Cl^- (0.1), SO_4^{2-} (0.3)
이온교환능력(eq/L)	2.0	1.4
함수율(%)	44 - 48	43 - 48
평균크기(mm)	0.65 - 0.90	
진비중	1.29	1.09
최대사용온도(°C)	60	
사용pH범위	0 - 14	

3. 2차계통 순환수 중의 주요 방사성핵종 및 이온결합특성

원전 2차계통 순환수에는 에탄올아민(ETA, Ethanolamine), 암모니아, 하이드라진(Hydrazine)과 나트륨(Na^+), 황산(SO_4^{2-}), 염소(Cl^-) 등의 이온이 ppb ~ ppm 농도로 존재하며, 그 외에 ^{137}Cs , ^{60}Co 과 같이 핵분열 및 부식에 의해 생성된 방사능물질이 이온 또는 무기염 형태로 존재하고 있으며, 또한 질소나 산소의 방사화로 생성된 유·무기형 및 이온형 ^{14}C 이 용해되어 있다. SG 취출수 정화과정에서 발생한 폐수 지로부터 검출된 방사성핵종의 생성원, 방출방사선, 반감기 및 이온형태를 표 3.에 정리하였다.

표 3. SG 발생 폐수지 중 방사성핵종 및 이온결합 특성

핵종	생성반응	방사선	반감기	이온형태	결합수지
Cr-51	$^{51}\text{Cr} \rightarrow \text{EC} \rightarrow ^{51}\text{V}$	γ	27.7 일	Cr^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{6+}	양이온
Co-58	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ $^{58}\text{Co} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{58}\text{Fe}$	β , γ	71.3 일	Co^{2+} , Co^{3+}	
Co-60	$^{59}\text{Co}(n, \beta)^{60}\text{Co}$	β , γ	5.27 년		
Mn-54	$^{54}\text{Mn} \rightarrow \text{EC} \rightarrow ^{54}\text{Cr}$	γ	313 일	Mn^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{4+} , Mn^{7+}	
Nb-95	$^{95}\text{Nb} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{95}\text{Mo}$	β , γ	35 일	Nb^{3+} , Nb^{5+}	
Sb-125	$^{125}\text{Sb} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{125}\text{Te}$	β , γ	2.76 년	Sb^{3+} , Sb^{5+}	
Xe-131m	$^{131}\text{I} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{131m}\text{Xe}$	γ	11.9 일	비활성 기체	
Cs-134	$^{135}\text{Cs}(n, \beta)^{134}\text{Cs}$	β , γ	2.06 년	Cs^+	
Cs-137	$^{137}\text{Cs} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{137}\text{Ba}$	β , γ	30 년		
H-3	$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ $^3\text{H} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^3\text{He}$	β	12.3 년	OH^-	음이온
C-14	$^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ $^{14}\text{C} \rightarrow \beta^- \rightarrow ^{14}\text{N}$	β	5,730 년	HCO_3^- , CO_3^{2-}	

4. SG 취출수 정화용 수지 사용 및 발생현황

국내 원전에서 사용하는 SG 취출수 정화용 이온교환수지의 형태, 제조사와 모델 및 사용량과 발생량(2007년 기준)을 표 4.에 나타내었다.

표 4. 국내원전 사용 SG 취출수 정화용 수지 현황(2007년 기준)

발전소		형태	제 조 사	모 델 명	사 용 량 (L)	교 체 량 (L)	교체주기 (년)	발 생 량 (L/호가년)
고리	1발	혼상	Gravex	GR-3-16N	9,400	9,400	1.0	9,400
	2발	양	Purolite	NRW-36 H	5,000	2,500	1.5	1,667
		음		NRW-36 OH	5,000			
한울	1발	양	Gravex	GR-2-16N	3,000	7,500	1.5	5,000
		혼상		GR-3-16N	3,000			
	2발	양	Purolite	NRW-100	4,600	3,450	1.0	3,450
		음		NRW-600	2,300			
	3발	양	Dowex	HGR NG	4,520	3,400	0.7	5,075
		음		SBR LC NG	2,260			
한빛	1발	양	Purolite	NRW-36 H	5,000	5,000	1.5	3,333
		음		NRW-36 OH	5,000			
	2발	양	Purolite	NRW-100	6,600	8,800	1.5	5,867
		음	Amberlite	IRN-78	2,200			
	3발	양	Dowex	HGR NG	4,520	3,400	0.7	5,075
		음		SBR LC NG	2,260			
연간 발생량 (L)								35,458

5. 국내원전 방사성폐수지 보관현황

국내원전에서 보관중인 폐수지의 양과 검출핵종을 표 5에 정리하였다.

표 5. 국내원전보관 폐수지 현황(2010.12.31)

구 분		보관량 (드럼)	검 출 핵 종
한울	1발	151	Cs-134, 137, Co-58,60, Mn-54
	2발	122	Cs-134, 137, Co-58,60, Mn-54, Nb-95, Sb-125, Xe-131m
	3발	130	-
한빛	1발	1,013	Co-58, Co-60
	2발	200	핵종검출
	3발	-	-
고리	1발	96	미분석
	2발	485	미분석
계		2,197	

6. 한빛 제1발전소 SG 취출수계통(BM) 폐수지 보관현황

한빛 제1발전소에서 보관중인 폐수지의 양과 보관 상태를 표 6.에 정리하였다.

표 6. 한빛 제1발전소 보관 폐수지 현황(2013.3.31 현재)

보관 장소	보관량(ℓ)(드럼)	보관상태
RWB 118' 복도	약 50,000(250)	마대보관
RWB 100' H/M Shop	5,000(25)	건조용기 보관
RWB 118 '임시저장구역	6,800(34)	드럼포장 보관
자체처분 폐기물 보관창고	23,000(115)	드럼보관
제1저장고	117,800(589)	생성 시 선량기준 0.0005 mSv/이하
계	202,600 ℓ (1,013드럼)	

7. 국내원전 방사성폐수지 자체처분 현황

일부 원전에서 발생한 폐수지량과 자체처분량 등을 표 7에 정리하였으며, 자체처분 후 보유하고 있는 폐수지량은 239,166 L(1,195 드럼)로 확인되었다.

표 7. 국내원전 방사성폐수지 자체처분 현황(2002~2011)

발전소	연평균 발생량 (L)	총 누적 발생량 (L)	검출핵종 및 농도 (Bq/g)	자체처분량 (L)	검출핵종 및 농도 (Bq/g)
고리1발 ^{주1)}	6,000	30,580	H-3 (9.10E+2) C-14 (1.2E+0)	7,051	-
고리2발	10,000 ~13,000	현보유량 102,200	H-3 (불검출) C-14 (불검출) Co-60 (2.61E-3) Cs-137 (1.03E-3)	28,700	H-3 (3.13E-1) C-14 (5.8E-2) Co-60 (1.87E-3) Cs-137 (1.49E-3)
한울2발 (3호기)	3,400	64,600	핵종 미검출	57,800	핵종 미검출
한울2발 (4호기) ^{주2)}	3,400	64,600	Co-58 (2.21E-3) Co-60 (6.14E-2) Mn-54 (1.00E-2)	없음	없음
한울3발	8,160	60,200	MDA 미만	31,499	MDA 미만
한빛2발 ^{주3)}	8,423	146,924	처분 제한치 미만	121,688	처분 제한치 미만
한빛3발 ^{주4,5)}	4,173	41,019	Mn-54 (1.93E-1) Cr-51 (1.58E-1) Co-58 (1.81E-2) Co-60 (2.01E-2) Nb-95 (1.21E-2) Cs-134 (2.76E-2) Cs-137 (4.04E-2)	24,219	H-3 (1.97E+0) C-14 (1.73E-1) Co-60 (1.04E-2) Cs-137 (1.15E-2)
발생량(L)	510,123	처분량(L)	270,957	보유량(L)	239,166

※ 폐수지 비중 : 0.86

주1) 2006년도에 처분하고 이후 삼중수소가 높아 처분하지 않고 보관 중

주2) 4호기는 54,200 L(46,612 Kg)의 폐수지 보관

주3) 보관중 25,250 L(21,715 Kg)

주4) 검출된 핵종 중에서 최대 농도 값을 기록함

주5) 자체처분 완료된 폐수지의 핵종별 최대 농도값 또는 최대 MDA 값을 기록함

8. 문제점

□ 지난 2007년부터 현재 년까지 한빛 제1발전소 증기발생기 취출수 계통의 탈염탑에서 교체된 폐수지는 방사능 준위가 매우 낮아 향후 자체처분을 위해 별도구역을 정하여 40kg용 마대에 포장된 상태로 적재하여 발전소 내에 보관해오고 있으며, 현재 보관량은 대략 200,000 l 임.

□ 증기발생기 취출수 계통(Blow Down)은 증기발생기 세관누설 시 2차 계통수 내 방사성물질 제거하여 2차 계통의 오염 확산을 방지하기 위한 수질정화 계통으로서 연평균 약 10,000 l (5,000 l × 2호기)정도의 폐수지가 발생되어 표 8.에 정리한 바와 같이 저장해 오고 있다. 저장, 관리중인 일부 폐수지에서는 SG 세관의 미세결함 발생으로 인해 소량의 방사성 핵종이 함유되어 있음.

□ 이러한 보관은 발전소 형상관리 차원에서도 저해요인이 될 뿐 아니라 폐기물 건물 내 여유 공간의 부족 및 악취발생과 화재위험이 상존하고 있으며 방사성폐기물건물동(RWB)의 운전(LRS, BRS 등) 및 정비수행에도 지장을 초래하고 있음.

표 8. 원전본부별 폐수지 저장현황

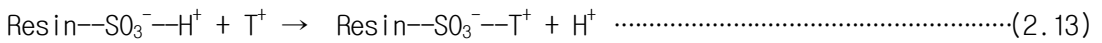
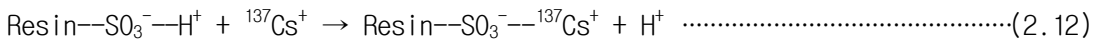
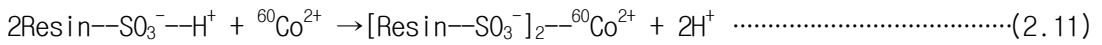
구 분 (발전소)		고방사능 (200 l / 드럼)	저방사능 (SG 취출수계통)	검출핵종
울진	1발	-	151드럼	Cs-134, 137 Co-58, 60, Mn-54
	2발	40드럼	122드럼	Cs-134, 137, Co-58, 60, Mn-54, Nb-95, Sb-125, Xe-131m
	3발	90드럼	130드럼	-
영광	1발	-	200,600리터	Co-58, Co-60
	2발	-	200드럼	핵종검출
	3발	-	-	-
고리	1발	-	19,000리터	-
	2발	-	96,000리터	-

제 3절. 혼상수지의 이온결합 분리 및 방사화학적 규명

1. 폐수지내 방사성핵종 이온결합 형태 규명

양·음이온형태로 존재하는 주요 방사성핵종과 이온교환수지 관능기와의 이온결합 메커니즘을 식 2.11~2.16과 그림 3.에 나타내었다.

★ 양이온교환수지의 이온결합 메커니즘



★ 음이온교환수지의 이온결합 메커니즘

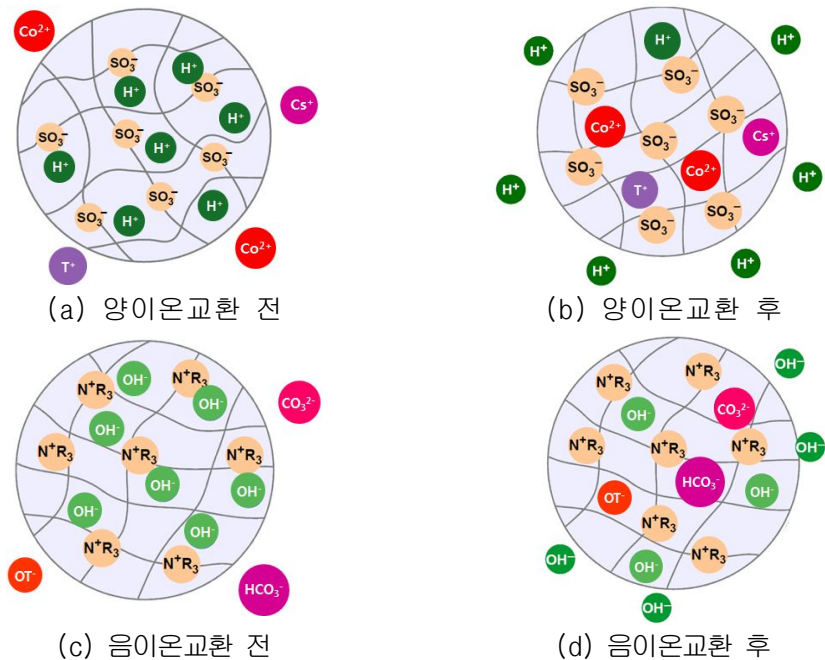
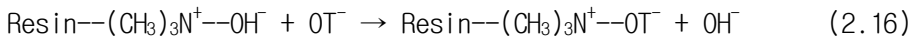
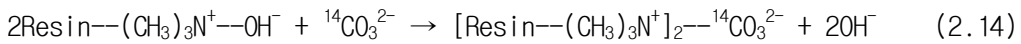


그림 3. 이온성 방사성핵종 결합 메커니즘

2. 폐수지내 방사성핵종 분리제거 메커니즘

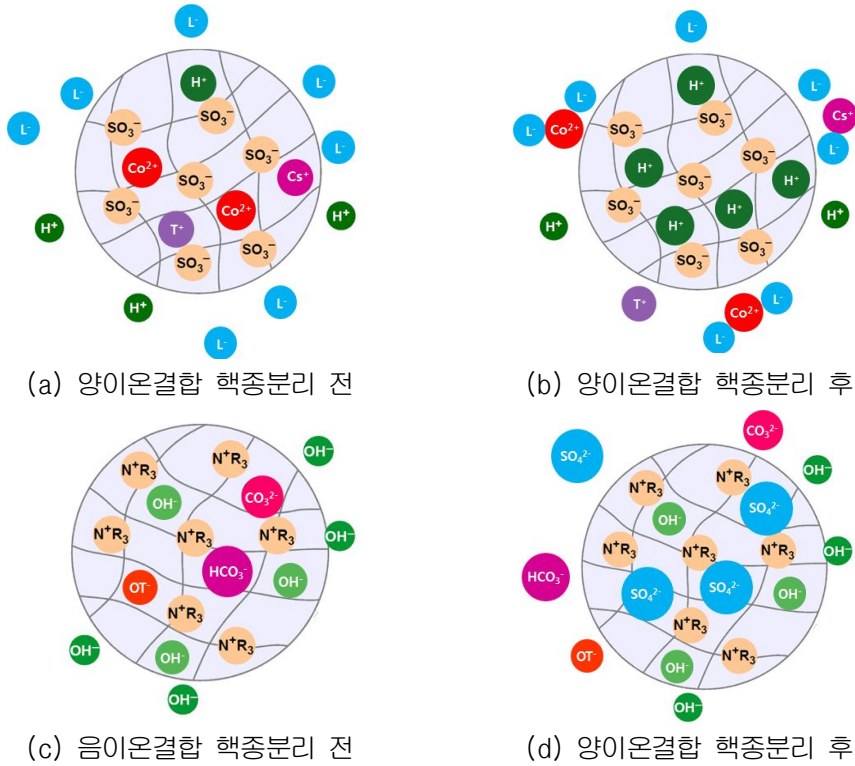


그림 4. 이온성 방사성핵종 분리 메커니즘

3. 폐수지내 유·무기형 방사성탄소(C-14) 분리제거 메커니즘

이온교환수지는 그림 5.과 같이 매크로포러스(Macroporous)형과 겔(Gel)형으로 분류된다. 매크로포러스형은 미세기공(0.5~20 nm)과 대기공(20~100,000 nm)의 구조를 가지고 있어 수지표면과 대기공에 존재하는 관능기와 이온교환결합이 형성되지만, 겔형은 단지 미세기공(0.5~20 nm)으로만 구성되어 있어 수지표면에 존재하는 관능기에만 이온교환결합이 이루어진다. 원자력급 이온교환수지는 모두 겔형이기 때문에 이온성 방사성핵종들은 주로 수지표면에 있는 관능기하고만 이온교환결합을 생성한다. 분자상태로 존재하는 유기형 방사성탄소화합물($^{14}\text{C}_m\text{H}_n$)과 무기형

방사성이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$)는 이온결합을 하지 못하고 수지표면이나 미세기공에 직접 흡착하는 것으로 여겨진다. 따라서 식 2.5에 나타낸 메커니즘과 같이 수지표면이나 미세기공에 직접 흡착한 유기형 방사성탄소화합물은 산화시켜 무기형 방사성이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$)로 전환·분리하여야 하며, 무기형 방사성이산화탄소는 산성수용액($\text{pH} < 3$)에 용해시킨 후 기체상태의 방사성이산화탄소로 분리·포집하여야 한다.

★ 유·무기형 방사성탄소의 분리제거 메커니즘

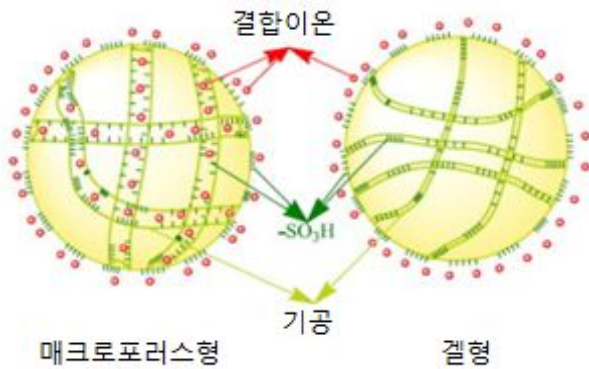
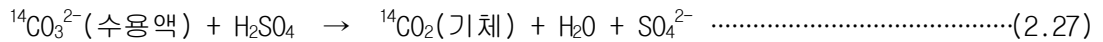
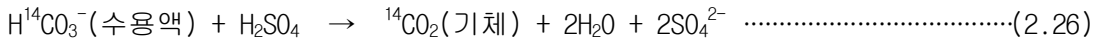
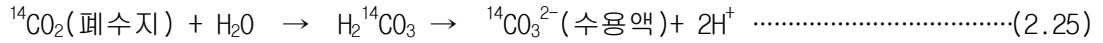
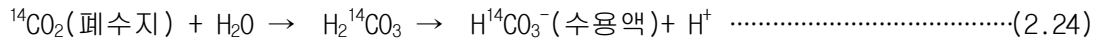
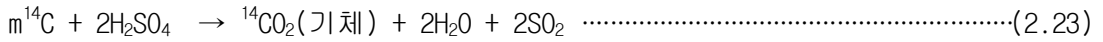
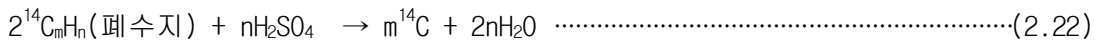


그림 5. 강산성 양이온교환수지 형태 및 구조

제 3장 폐수지 핵종별 비방사능 조사

제 1 절 고품폐기물 자체처분 인·허가 사항 조사

1. 한국원자력안전위원회 고시

자체처분과 관련된 국내 법적근거는 원자력안전법 시행규칙 제99조 및 제100조 제3항의 규정에 따른 한국원자력안전위원회 고시 제2014-3호(방사성폐기물의 자체 처분에 관한 규정, 시행 2014.09.16)에 방사성폐기물의 처분제한치와 처분제한치 미만 방사성폐기물의 자체처분절차·방법·기타 필요한 사항에 관하여 규정하고 있으며, 제3조 별표 1의 허용기준과 핵종별 농도는 표 2.1과 같다.

2. 국제원자력기구(IAEA) 규제 해제기준

국제적으로는 IAEA에서 방사성폐기물의 규제해제에 해당하는 농도를 IAEA Safety Standard Series No. RS-G-1.7(Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance) 보고서의 Table 2에 제시하였으며, 주요 핵종 기준농도를 표 2.2에 정리하였다.

표 2.2. 방사성폐기물 규제해제 기준농도 (단위: Bq/g)

핵종	^{14}C	^3H	^{60}Co	^{137}Cs	^{54}Mn
기준농도	1	100	0.1	0.1	0.1

표 2.1. 방사성폐기물 자체처분 허용기준 및 핵종별 농도

방사성핵종	허용농도 (Bq/g)
I-129	0.01
Na-22, Sc-46, Mn-54, Co-56, Co-60, Zn-65, Nb-94, Ru-106, Ag-110m, Sb-125, Cs-134, Cs-137, Eu-152, Eu-154, Ta-182, Bi-207, Th-229, U-232, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Pu-244, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-245, Cm-246, Cm-247, Cm-248, Cf-249, Cf-251, Es-254	0.1
C-14, Na-24, Cl-36, Sc-48, V-48, Mn-52, Fe-59, Co-57, Co-58, Se-75, Br-82, Sr-85, Sr-90, Zr-95, Nb-95, Tc-96, Tc-99, Ru-103, Ag-105, Cd-109, Sn-113, Sb-124, Te-123m, Te-132, Cs-136, Ba-140, La-140, Ce-139, Eu-155, Tb-160, Hf-181, Os-185, Ir-190, Ir-192, Tl-204, Bi-206, U-233, Np-237, Pu-236, Cm-243, Cm-244, Cf-248, Cf-250, Cf-252, Cf-254	1
Be-7, F-18, Cl-38, K-43, Ca-47, Mn-51, Mn-52m, Mn-56, Fe-52, Co-55, Co-62m, Ni-65, Zn-69m, Ga-72, As-74, As-76, Sr-91, Sr-92, Zr-93, Zr-97, Nb-93m, Nb-97, Nb-98, Mo-90, Mo-93, Mo-99, Mo-101, Tc-97, Ru-97, Ru-105, Cd-115, In-111, In-114m, Sn-125, Sb-122, Te-127m, Te-129m, Te-131m, Te-133, Te-133m, Te-134, I-126, I-130, I-131, I-132, I-133, I-134, I-135, Cs-129, Cs-132, Cs-138, Ba-131, Ce-143, Ce-144, Gd-153, W-181, W-187, Pt-191, Au-198, Hg-203, Tl-200, Tl-202, Pb-203, Po-203, Po-205, Po-207, Ra-225, Pa-230, Pa-233, U-230b, U-236, Np-240, u-241, Cm-242, Es-254m	10
H-3, S-35, K-42, Ca-45, Sc-47, Cr-51, Mn-53, Co-61, Ni-59, Ni-63, Cu-64, Rb-86, Sr-85m, Sr-87m, Y-91, Y-91m, Y-92, Y-93, Tc-97m, Tc-99m, Rh-105, Pd-109, Ag-111, Cd-115m, In-113m, In-115m, Te-129, Te-131, I-123, I-125, Cs-135, Ce-141, Pr-142, Nd-147, Nd-149, Sm-153, Eu-152m, Gd-159, Dy-166, Ho-166, Er-171, Tm-170, Yb-175, Lu-177, Re-188, Os-191, Os-193, Ir-194, Pt-197m, Au-199, Hg-197, Hg-197m, Tl-201, Ra-227, U-231, U-237, U-239, U-240, Np-239, Pu-234, Pu-235, Pu-237, Bk-249, Cf-253, Es-253, Fm-255	100
Si-31, P-32, P-33, Fe-55, Co-60m, Zn-69, As-73, As-77, Sr-89, Y-90, Tc-96m, Pd-103, Te-125m, Te-127, Cs-131, Cs-134m, Pr-143, Pm-147, Pm-149, Sm-151, Dy-165, Er-169, Tm-171, W-185, Re-186, Os-191m, Pt-193m, Pt-197, At-211, Th-226, Pu-243, Am-242, Cf-246	1,000
Co-58m, Ge-71, Rh-103m, Fm-254	10,000

주 1) 다수의 방사성핵종이 혼합되어 있는 경우에는 다음과 같이 한다.

$$\sum_i \frac{C_i}{C_{L,i}} < 1$$

C_i : i의 방사능농도(Bq/g) / C_{L,i} : i의 자체처분 허용농도(Bq/g)

주 2) 별표1에 수록되지 않은 알파선을 방출하지 아니하는 방사성핵종의 경우 자체 처분 허용농도로서 0.1 Bq/g을 적용할 수 있다.

주 3) 다음 목록에 제시된 모핵종과 그 모핵종의 붕괴로 생성되는 자핵종이 함께 존재하는 경우, 모핵종에 대해서만 허용농도를 적용한다.

모 핵종	자핵종
Fe-52	Mn-52m
Zn-69m	Zn-69
Sr-90	Y-90
Sr-91	Y-91m
Zr-95	Nb-95
Zr-97	Nb-97m, Nb-97
Nb-97	Nb-97m
Mo-99	Tc-99m
Mo-101	Tc-101
Ru-103	Rh-103m
Ru-105	Rh-105m
Ru-106	Rh-106
Pd-103	Rh-103m
Pd-109	Ag-109m
Ag-110m	Ag-110
Cd-109	Ag-109m
Cd-115	In-115m
Cd-115m	In-115m
In-114m	In-114
Sn-113	In-113m
Sb-125	Te-125m
Te-127m	Te-127
Te-129m	Te-129
Te-131m	Te-131
Te-132	I-132
Cs-137	Ba-137m
Ce-144	Pr-144, Pr-144m
U-232	Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208
U-240	Np-240m, Np-240
Np-237	Pa-233
Pu-244	U-240, Np-240m, Np-240
Am-242m	Np-238
Am-243	Np-239
Cm-247	Pu-243
Es-254	Bk-250
Es-254m	Fm-254

제 2절. 한빛 제1발전소 발생 폐수지 γ 핵종 평가

한빛 제1발전소에서 발생한 SG 취출수 정화용 폐수지 중 γ 핵종 분석자료를 바탕으로 오염핵종의 종류와 농도를 표 9.에 정리하였다. 폐수지에는 주로 ^{60}Co 이 규제 해제 기준농도를 초과하는 것으로 검출되었으며, 일부 폐수지에서는 ^{137}Cs 과 ^{54}Mn 도 규제해제 기준농도를 약간 초과하여 검출되었다. 따라서 폐수지의 자체처분을 위해서는 주로 ^{60}Co 을 분리·제거하여야 하며, ^{137}Cs 의 분리·제거도 고려되어야 할 것으로 확인되었다.

표 9. 한빛 제1발전소 SG 취출수계통 폐수지 방사성핵종 및 농도 (단위 Bq/g)

번호	시료명	^{60}Co	^{137}Cs	^{54}Mn
1	RW BM 폐수지 06-1-2		1.03E-01	
2	RW BM 폐수지 06-3-4		7.70E-02	
3	RW BM 폐수지 06-5-6		6.66E-02	
4	RW BM 폐수지 07-1-2	1.80E-01		
5	RW BM 폐수지 07-3-4	3.06E-01		
6	RW BM 폐수지 07-5-6	3.93E+00		2.18E-01
7	RW BM 폐수지 08-1-2	1.80E+00	5.75E-02	1.01E-01
8	RW BM 폐수지 08-3-4	3.46E-01		
9	RW BM 폐수지 08-5-6	4.91E-02	7.72E-02	
10	RW BM 폐수지 09-1-2		9.09E-02	
11	RW BM 폐수지 09-3-4		8.91E-02	
12	RW BM 폐수지 09-5-6		7.05E-02	
13	Y10-2010-BM-001		3.56E-02	
14	Y10-2010-BM-002		3.63E-02	
15	RW BM WASTE RESIN-1	4.92E-02		
16	RW BM WASTE RESIN-2	1.92E-01		
17	RW BM WASTE RESIN-3	5.82E-02		

※ BM : 한빛1,2호기(PWR) The index of Steam Generator Blow-Down system

제 3 절. 한빛 제1발전소 발생 폐수지 ^{14}C , ^3H 농도 분석

1. 폐수지 중 ^{14}C 및 ^3H 분석기술 확립

원전발생 방사성폐수지에는 ^{14}C 와 ^3H 의 β 핵종이 오염되어 있으며, 이들 핵종의 농도는 액체섬광계수기(Liquid Scintillation Counter, 그림 2.3(b))로 분석할 수 있다. 액체섬광계수기로 ^{14}C 와 ^3H 핵종을 분석하기 위해서는 방사성폐수지로부터 이들 핵종을 분리·포집한 후 유기형광액과 혼합하여 계측한다. 폐수지 중 ^3H 는 물과 같은 $\text{HTO}(\text{H}^3\text{HO})$ 의 화학적 형태로 주로 존재하므로 폐수지를 가열하여 기화된 HTO 를 응축·포집하여 분석한다. 폐수지 중 ^{14}C 은 메탄($^{14}\text{CH}_4$), 에탄($^{14}\text{C}_2\text{H}_6$) 및 유도체와 같은 유기형과 이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$), 중탄산이온($\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$) 및 탄산이온($^{14}\text{CO}_3^{2-}$)과 같은 무기형의 화학적 형태를 이루고 있다. 따라서 ^{14}C 를 분석하기 위해서는 유기형의 방사성탄소 화합물을 방사성 이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$)로 전환시켜, 가열에 의해 탈기된 무기형 방사성 이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$)와 함께 수산화나트륨(NaOH) 용액에 포집한 후 계측하여야 한다. 폐수지 중의 방사성유기탄소($^{14}\text{CH}_4$, $^{14}\text{C}_2\text{H}_6$)를 방사성무기탄소($^{14}\text{CO}_2$)로 전환하는 연소산화장치를 그림 2.3(a)와 같이 제작하여 ^{14}C 분석을 위한 전처리장치로 활용하였다.



(a) 폐수지 연소산화장치



(b) 액체섬광계수기

그림 6. 폐수지 전처리 및 분석장치

2. 폐활성탄시료를 이용한 ^{14}C , ^3H 분석기술 교차평가

^{14}C , ^3H 분석을 위한 전처리장치 성능평가와 분석결과에 대한 신뢰도 확보를 위해 원전발생 폐활성탄을 대상으로 한국원자력연구원(KAERI)과 교차분석을 실시하여 표 10에 정리하였다. 폐활성탄을 교차분석 시료로 선택한 이유는 폐수지보다 ^{14}C 의 오염농도가 높으며, 수지보다는 내부 비표면적이 넓은 다공성 물질로서 신뢰도 평가가 용이하기 때문이다. 평가결과, ^{14}C 의 경우는 원자력연구원에서 분석했던 결과 값과 유사한 분석 값을 얻어 분석신뢰도는 매우 높은 것으로 평가되었다.

표 10. 폐활성탄시료 중의 ^{14}C , ^3H 교차분석 결과

	분석기관	C-14 (Bq/g)	H-3 (Bq/g)
한빛원전	한국정수공업(주)	24.7	4.3
	한국원자력연구원	25.5	5.3
한울원전	한국정수공업(주)	498.5	13.7
	한국원자력연구원	490.0	1.5

3. 폐수지 중 ^{14}C , ^3H 농도 분석결과

한빛 제1발전소에서 발생한 폐수지에는 상당량의 이물질이 함유되어 있어 채와 자석을 이용하여 이물질을 분리(그림 2.4)한 후, 분리 전·후 폐수지와 이물질 중의 ^{14}C , ^3H 농도를 액체성광계수기(PerkinElmer Quantulus 1220, 그림 2.3(b))로 분석하여 표 11.에 정리하였다. 폐수지에는 이물질이 5~9 wt% (3~5 vol%) 포함되어 있으며, 폐수지 자체보다는 이물질에 ^{14}C 방사능이 더 많이 오염되어 있는 것으로 확인되었다.

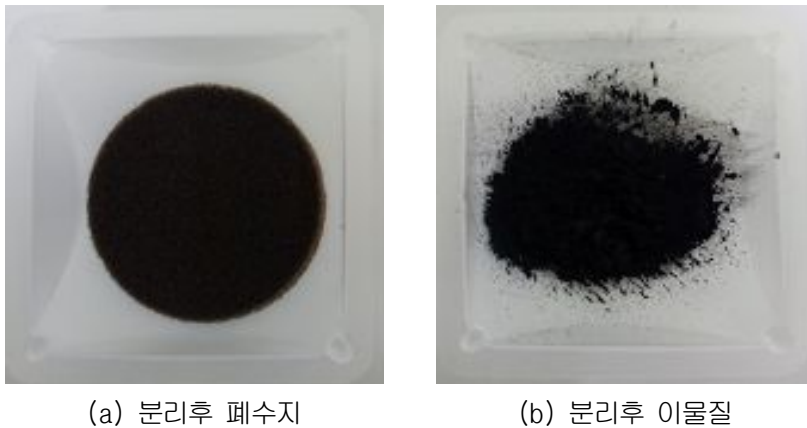


그림 7. 자석분리 폐수지와 이물질

표 11. 폐수지의 이물질 분리전·후 ^{14}C , ^3H 분석결과

분리방법	항목	분리전	분리후	
		폐수지	폐수지	이물질
채분리	무게 (g)	1,000	950	50
	C-14 (Bq/g)	4.28	0.96	3.91
	H-3 (Bq/g)	8.90	-	-
자석분리	무게 (g)	72.4	65.6	6.2
	C-14 (Bq/g)	4.28	1.81	3.77
	H-3 (Bq/g)	8.90	-	-

4. 폐수지 중 유·무기형 ^{14}C 농도 분석

원자력발전소의 냉각재와 냉각재 정화시 사용했던 폐수지에 함유한 ^{14}C 은 표 12.에 나타난 바와 같이 원자로 형에 따라 다양한 유·무기의 화학적 형태를 이루고 있었으며, 경수로에서 발생하는 폐수지에는 유기형이 72~92%로 존재하며 중수로에서 발생하는 폐수지에는 무기형이 93% 이상으로 존재하는 것으로 보고되고 있다.

표 12. 원자로 형에 따른 ^{14}C 의 화학적 형태와 존재비율

	경수로(PWR)	중수로(PHWR)
냉각재	유기형, 58-95 %	무기형, 94.8 %
폐수지	유기형, 72-92 %	무기형, >93 %

한빛 제1발전소 증기발생기 취출수 계통에서 발생한 폐수지에서 이물질을 분리한 후 분석한 ^{14}C 의 화학적 형태별 농도와 비율을 표 13.에 정리하였다. 문헌에 보고되는 것과는 달리, 한빛 제1발전소에서 발생한 폐수지에는 무기형 ^{14}C (56.8~70.6%)이 유기형 ^{14}C (29.4~43.2%)보다 많이 존재하는 것으로 확인되었다. 이는 장기보관으로 인하여 폐수지 표면에 흡착되었던 분자형태의 유·무기형 ^{14}C (C_mH_n , CO_2)은 기화되어 탈착된 반면, 음이온수지에 결합된 이온형태의 무기형 ^{14}C (HCO_3^- , CO_3^{2-})은 탈착되지 않고 그대로 남아있기 때문인 것으로 여겨진다.

표 13. 한빛 제1발전소 발생 폐수지 중 유·무기형 ^{14}C 농도

폐수지		유기 C-14		무기 C-14		전체 C-14	
		농도 (Bq/g)	구성비 (%)	농도 (Bq/g)	구성비 (%)	농도 (Bq/g)	구성비 (%)
분리전	폐수지	1.46	34.0	2.82	66.0	4.28	100
채분리후	폐수지	1.69	42.3	2.30	57.7	3.99	
	이물질	6.31	43.2	8.31	56.8	14.62	
자석분리후	폐수지	1.49	41.2	2.12	58.8	3.61	
	이물질	3.44	29.4	8.29	70.6	11.73	

제 4 절. 한빛 제1발전소 발생 폐수지 중 ^{60}Co 농도 분석

한빛 제1발전소에서 발생한 폐수지를 채와 자석을 이용하여 이물질을 분리한 후, 이물질 분리전·후 폐수지와 이물질 중의 ^{60}Co 농도를 감마핵종분석기(CANBERRA ISOCS, 그림 2.5)로 분석하여 표 14.에 정리하였다. ^{14}C 과 마찬가지로 폐수지 자체 보다는 이물질에 ^{60}Co 이 더 많이 오염되어 있는 것으로 확인되었다.



그림 2.5. 감마핵종분석기

표 14. 폐수지와 이물질 분리전·후 ^{60}Co 농도 분석결과

분리방법	항목	분리전	분리후	
		폐수지	폐수지	이물질
채분리	무게 (g)	1,000	950	50
	Co-60 (Bq/g)	1.55	0.54	12.70
자석분리	무게 (g)	72.4	65.6	6.2
	Co-60 (Bq/g)	1.55	0.29	10.00

제 5 절. 추가 폐수지시료 오염특성평가

실험에 활용한 혼상폐수지 기존시료는 양이온수지 부피비율이 4 %로 신품 혼상수지의 양이온수지 부피비율인 40%의 1/10 수준이어서 대표시료로 활용하기에 부적합하다고 판단되었다. 따라서 이물질 및 양·음이온수지 비율이 적절한 현장시료를 추가로 확보하여 폐수지 중 ^{60}Co , ^{137}Cs 및 ^{14}C 핵종농도와 혼합비율을 재분석하여 폐수지 오염특성을 확인한 후 폐수지 제염기술 개발을 위한 실험에 활용하였다.

1. 폐수지시료의 적합성 평가

폐수지시료의 적합성 평가를 위한 현장시험을 2013. 7. 10~12에 실시하였다. 폐수지 중의 양이온, 음이온 및 이물질의 함유비율을 파악하기 위하여 10 여개 시료를 대상으로 먼저 초음파를 이용하여 이물질을 탈착한 다음, 양이온수지와 음이온수지의 비중차를 이용한 혼상수지 분리실험을 수행하여 4종의 시료(그림 2.9참조)를 선정하였으며, 원전현장에서 선정시료 중의 감마핵종농도를 분석하여 그 결과를 표 15에 정리하였다. 선정된 A 시료는 이물질을 많이 포함하고 있었으며, 시료 #1와 #3은 양이온수지의 부피비율이 높았고, 시료 #2는 음이온수지의 부피비율이 매우 높아 폐수지 제염기술 개발용 시료로 활용하기에 적합한 것으로 평가되었다.



그림 9. 추가 폐수지시료

표 15. 추가 폐수지시료의 혼합비율 및 감마핵종농도 (현장분석)

시료	비율 (vol%) ^{주1)}			방사성핵종 농도 (Bq/g)		
	양	음	이물질	Co-58	Co-60	Cs-137
A	5	95	3	0.05	0.88	N/D
1	80	20	1	N/D	0.13	0.08
2	3	97	-	0.04	N/D	N/D
3	70	30	1	N/D	0.07	N/D

주1) 메스실린더로 혼합비율을 평가하였음.

2. 폐수지시료 혼합비율 평가

방사성폐수지시료 5종(기존 1종, 추가 4종)에 대하여 이물질을 분리한 다음, 그림 2.10과 같이 메스실린더를 이용하여 양이온수지, 음이온수지 및 이물질의 비율을 평가하여 표 16에 정리하였다. 폐수지시료 #0과 A는 이물질과 음이온수지 비율이 높았으며, #1과 #3에는 이물질은 약간 함유되었으나 양이온수지 비율이 높았으며, #2는 이물질은 거의 없고 음이온수지 비율이 높은 것으로 확인되었다.

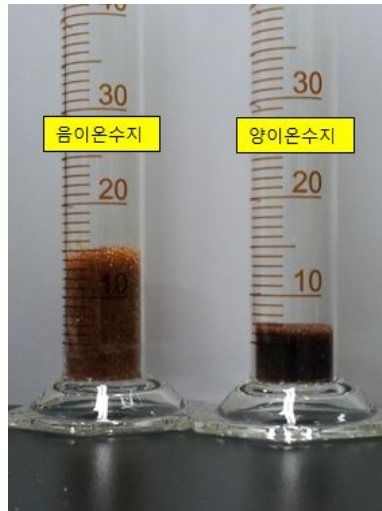


그림 10. 양·음이온수지 분리 후 비율평가

표 16. 폐수지시료 혼합비율

시료	구분	비율 (vol%) ^{주1)}		
		양	음	이물질
0	기존시료	3	92	5
A	추가시료	5	92	3
1		80	19	> 1
2		3	97	-
3		70	29	< 1

주1) 메스실린더로 혼합비율을 평가하였음.

3. 추가 폐수지시료 중 ^{14}C 농도분석 및 오염특성평가

가. 폐수지 중의 이물질 분리 전 ^{14}C 농도분석 및 특성평가

이물질을 포함하고 있는 폐수지시료 A, #1 및 #2에 대한 ^{14}C 농도를 분석하여 그 결과를 표 17.에 정리하였다. 이물질을 포함한 폐수지시료 A에서는 ^{14}C 농도가 IAEA 규제해제 기준농도인 1 Bq/g보다는 높게 검출되었으나, #1에서는 IAEA 규제해제 기준농도보다 낮게 검출되었다. 또한 #2에서는 ^{14}C 농도가 IAEA 규제해제 기준농도와 유사한 값으로 검출되었다.

표 17. 추가 폐수지시료 중 ^{14}C 농도 분석결과

시료	폐수지(이물질 포함) C-14 농도 (Bq/g)					
	1회	2회	3회	4회	5회	평균
A	3.12	1.75	2.89	1.46	1.14	2.07
1	0.37	0.16	0.49	0.28	0.40	0.34
2	0.65	1.01	0.65	0.77	1.00	0.82

나. 추가 폐수지시료 중 유·무기형 ^{14}C 농도분석

이물질을 포함하고 있는 폐수지시료 A, #1과 #2에 오염된 유·무기형 ^{14}C 농도를 분석하여 표 18.에 정리하였다. 폐수지에는 무기형 ^{14}C 이 주로 오염되어 있었으며, 시료 A에는 유기형 ^{14}C 도 함께 오염되어 있는 것으로 평가되었다.

표 18. 폐수지시료의 유·무기형 ^{14}C 농도 분석결과

시료	폐수지(이물질 포함) C-14 농도 (Bq/g)		
	유기형	무기형	합
A	1.23	1.89	3.12
1	MDA	0.49	0.49
2	MDA	1.01	1.01

다. 이물질 분리 전·후 폐수지 중 ^{14}C 농도분석 및 오염특성평가

추가 폐수지시료 A(이물질 및 음이온수지 비율이 높음), #1(양이온수지 비율이 높음) 및 #2(음이온수지 비율이 높음)에 대한 ^{14}C 농도를 분석한 결과를 표 19.에 정리하였다. 이물질을 포함하고 있는 폐수지시료 A와 #1에서는 ^{14}C 농도가 IAEA 규제 해제 기준농도인 1 Bq/g보다는 낮게 검출되었으나, #2에서는 ^{14}C 농도가 IAEA 규제 해제 기준농도보다 높게 검출되었다. 이물질을 많이 포함하고 있는 시료 A를 폐수지와 이물질로 분리한 후 각각에 대한 ^{14}C 농도도 추가로 분석한 결과, 폐수지 자체의 ^{14}C 농도는 이물질을 포함하고 있는 폐수지의 ^{14}C 농도보다는 약간 낮아졌지만 분리된 이물질의 ^{14}C 농도는 오히려 많이 높아지는 것으로 평가되었다. 따라서 이물질을 많이 포함하고 있는 폐수지는 이물질만 분리하여도 ^{14}C 의 농도를 많이 저감시킬 수 있으나 분리된 이물질에 대한 처리방안이 확립되어야 할 것으로 판단된다. 시료 #1, #2에는 이물질이 거의 없어서 분리 후 폐수지와 이물질에 대해서는 분석하지 않았다.

표 19. 폐수지시료의 ^{14}C 농도 분석결과

시료	폐수지(이물질 포함)			폐수지(이물질 분리)			이물질		
	무게 (g)	C-14 (Bq/g)	C-14 (Bq)	무게 (g)	C-14 (Bq/g)	C-14 (Bq)	무게 (g)	C-14 (Bq/g)	C-14 (Bq)
A	20.53	0.54	11.09	18.81	0.45	8.46	1.34	1.85	2.48
1	18.46	0.37	6.83	18.08	N/A	N/A	0.05	N/A	N/A
2	19.97	1.01	20.17	19.97	N/A	N/A	0	N/A	N/A

4. 폐수지시료 중 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도분석 및 오염특성평가

가. 이물질 분리 전의 폐수지 중 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도분석 및 오염특성평가

이물질을 분리하지 않은 폐수지시료 5종(기존 1종, 추가 4종)에 대하여 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도를 분석한 결과를 표 2.23에 정리하였으며, 분석결과로부터 다음과 같은 폐수지의 오염특성을 확인하였다.

(1) 측정시간에 따른 감마핵종 농도는 유사하게 나타났으나, 최소 3,600초 이상으로 분석한 값을 더욱 신뢰할 수 있는 것으로 확인되었다.(현재 모든 실험시료의 감마핵종 농도는 최소 3,600초 이상으로 분석함)

(2) 폐수지시료 #0와 A에서 ^{137}Cs 농도는 MDA 또는 규제해제 기준농도인 0.1 Bq/g # 0와 A 시료에는 이물질들이 많이 혼합(표 2.18 참조)되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 폐수지시료 #1에서 ^{60}Co 농도가 규제해제 기준농도인 0.1 Bq/g과 유사하게 나타났으며, 이는 #1 시료에는 약간의 이물질이 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 ^{137}Cs 농도가 타 시료에 비하여 높게 나타났으며, 이는 #1 시료에는 양이온수지가 많이 혼합(표 20. 참조)되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 폐수지시료 #2에는 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도가 MDA 이하로 나타났으며, 이는 시료 #2에는 음이온수지가 많이 혼합(표 2.18 참조)되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

(5) 폐수지시료 #3은 시료 #1과 유사한 양이온수지와 이물질의 혼합비율(표 20. 참조)을 가지고 있지만, ^{60}Co , ^{137}Cs 농도가 MDA 또는 규제해제 기준농도 이하로 나타났다. 이는 시료 #1보다 이물질이 더욱 적게 혼합되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

표 20. 폐수지시료 중 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도 분석결과

시료	구분	시료무게(g)	분석시간(초)	감마핵종 농도 (Bq/g)			
				Co-60	Cs-137		
0	기존시료	49.33	1,000	0.627	MDA		
			3,600	0.620	MDA		
			10,000	0.629	MDA		
		23.74	1,000	0.746	MDA		
			3,600	0.709	MDA		
			10,000	0.745	MDA		
A	추가시료	65.28	1,000	0.153	MDA		
			3,600	0.140	0.012		
			10,000	0.148	0.012		
		53.33	1,000	0.481	MDA		
			3,600	0.478	MDA		
			10,000	0.473	0.006		
		1	추가시료	21.22	1,000	0.149	MDA
					3,600	0.159	0.054
					10,000	0.156	0.059
61.89	1,000			0.066	0.034		
	3,600			0.069	0.038		
	10,000			분석안함			
2	추가시료	23.88	1,000	MDA	MDA		
			3,600	MDA	MDA		
			10,000	MDA	MDA		
		22.66	1,000	MDA	MDA		
			3,600	MDA	MDA		
			10,000	분석안함			
3	추가시료	18.68	1,000	MDA	MDA		
			3,600	0.062	MDA		
			10,000	0.065	MDA		
		22.66	1,000	MDA	MDA		
			3,600	0.050	MDA		
			10,000	분석안함			

나. 폐수지(이물질 분리) 중 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도분석 및 오염특성평가

폐수지 중 이물질을 많이 포함하고 있는 시료 A의 이물질 분리전·후 상태를 그림 2.11에 나타내었다. 이물질을 분리하기 전 폐수지는 검은 갈색을 나타내고 있었지만 이물질을 분리한 후에는 밝은 갈색으로 변화하였다.

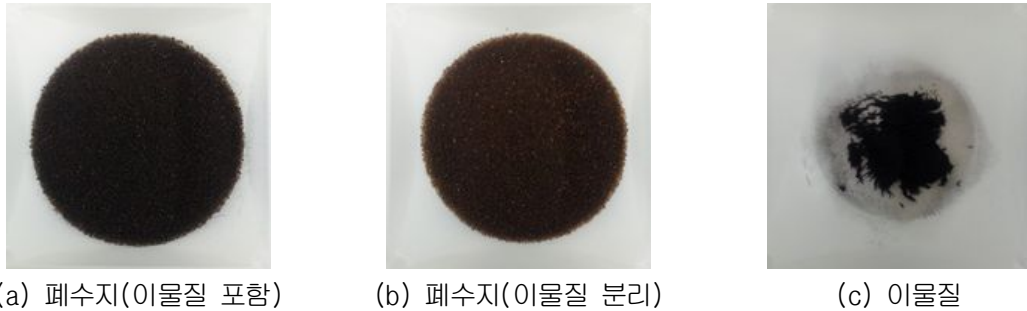


그림 11. 폐수지와 이물질 분리 전·후 시료상태

^{60}Co , ^{137}Cs 이 함께 검출되면서 이물질 혼합비율이 높은 폐수지시료 A를 분리한 후 폐수지와 이물질 중 ^{60}Co , ^{137}Cs 농도를 분석하여 표 21, 22에 각각 정리하였다. ^{60}Co 의 경우에는 이물질을 제거한 폐수지에서의 농도는 감소한 반면, 분리된 이물질에서의 농도는 상당히 많이 증가하였다. 이는 이물질을 구성하는 Fe, Ni, Cr 등의 성분들과 ^{60}Co 이 크러드(CRUD)을 형성하였기 때문인 것으로 판단된다. ^{137}Cs 의 경우에는 이물질을 포함하는 폐수지에서의 농도와 이물질을 분리한 폐수지에서의 농도가 유사한 반면, 분리된 이물질에서는 농도가 MDA 이하로 나타났다. 이는 ^{137}Cs 은 이물질의 구성성분들과 크러드(CRUD)을 형성하지 않고 양이온수지에만 결합되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이물질을 분리한 폐수지 중 ^{60}Co 농도를 보다 안전한 농도(0.01 Bq/g, IAEA 규제해제 기준농도인 0.1 Bq/g의 1/10)까지 낮추기 위해서는 추가적인 제염기술의 적용이 필요한 것으로 확인되었다.

표 21. 폐수지시료의 ^{60}Co 농도 분석결과

시료	폐수지(이물질 포함)			폐수지(이물질 분리)			이물질		
	무게 (g)	Co-60 (Bq/g)	Co-60 (Bq)	무게 (g)	Co-60 (Bq/g)	Co-60 (Bq)	무게 (g)	Co-60 (Bq/g)	Co-60 (Bq)
A	65.28	0.14	9.14	62.13	0.03	1.86	2.59	2.45	6.35

 표 22. 폐수지시료의 ^{137}Cs 농도 분석결과

시료	폐수지(이물질 포함)			폐수지(이물질 분리)			이물질		
	무게 (g)	Cs-137 (Bq/g)	Cs-137 (Bq)	무게 (g)	Cs-137 (Bq/g)	Cs-137 (Bq)	무게 (g)	Cs-137 (Bq/g)	Cs-137 (Bq)
A	65.28	0.01	0.65	62.13	0.01	0.62	2.59	MDA	-

제 4 장 폐수지 제염공정 개발

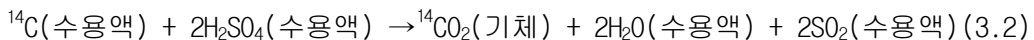
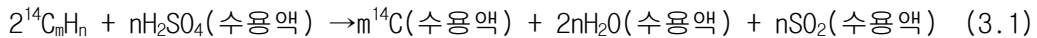
제 1 절 화학약품을 이용한 방사선 핵종 분리 실험

1. 화학약품을 이용한 ^{14}C 추출 · 분리 메커니즘

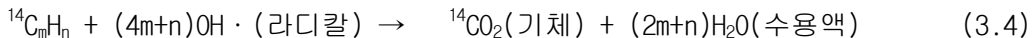
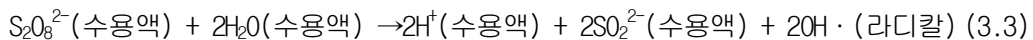
한빛 제1발전소 증기발생기 취출수 계통에서 발생한 폐수지에는 유기형 ^{14}C 과 무기형 ^{14}C 이 함께 존재하는 것으로 확인되었다. 따라서 폐수지 중 ^{14}C 을 제거하기 위해서는 유 · 무기형 ^{14}C 를 동시에 분리하는 기술이 효과적인 것으로 판단된다.

유기형 ^{14}C 은 유기탄화수소($^{14}\text{C}_m\text{H}_n$)로 존재하므로 황산과 같이 산화력을 갖는 무기산과 산화제를 이용하여 방사성 이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$)로 전환시켜 흡착제에 흡착하여 분리할 수 있다(식 3.1~3.4 참조).

★ 황산에 의한 유기탄화수소($^{14}\text{C}_m\text{H}_n$)의 전환 · 분리 메커니즘

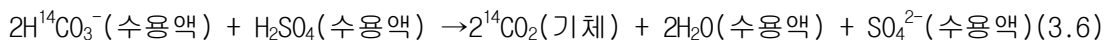


★ 산화제에 의한 유기탄화수소($^{14}\text{C}_m\text{H}_n$)의 전환 · 분리 메커니즘

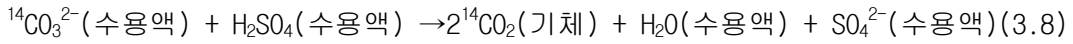
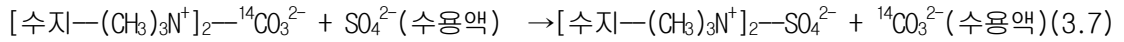


무기형 ^{14}C 은 중탄산이온($\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$)과 탄산이온($^{14}\text{CO}_3^{2-}$)으로 존재하므로, 황산과 같은 무기산을 이용하여 용액의 pH를 3 이하로 유지시켜 방사성 이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$)로 전환시켜 흡착제에 흡착시켜 분리할 수 있다(식 3.5~3.8 참조).

★ 황산에 의한 중탄산이온($\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$)의 전환 · 분리 메커니즘



★ 황산에 의한 탄산이온($^{14}\text{CO}_3^{2-}$)의 전환·분리 메커니즘



2. 실험장치 및 실험결과

가. 실험장치 구성

화학약품을 이용하여 폐수지로부터 ^{60}Co , ^{14}C 등의 방사성핵종을 분리하기 위한 장치를 그림 3.1과 같이 제작하였다.

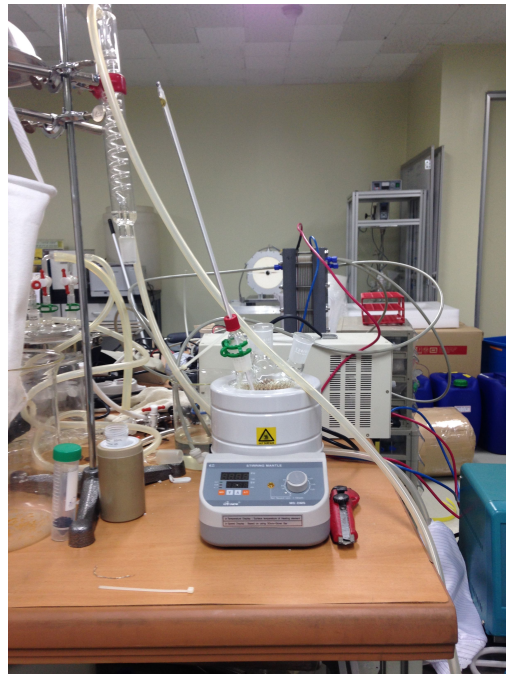


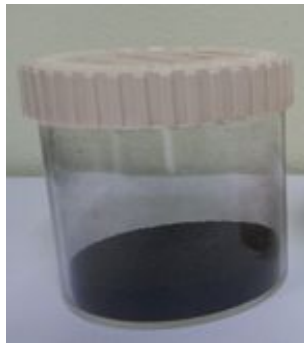
그림 12. 화학약품을 이용한 폐수지 제염장치

나. 실험 방법

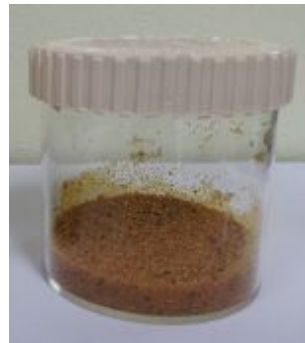
화학약품의 제염 효과를 알아보기 위하여 그림 3.1과 같이 구성된 장치의 둥근 플라스크 속에 폐수지를 넣고 과산화수소와 황산을 실험 조건에 따라 반응 시켰다. 반응이 끝난 뒤 필터를 사용하여 폐수지와 화학약품을 분리 하였고 아래와 같이 결과를 나타내었다.

다. 화학약품 종류별 방사성핵종 분리실험

상온에서 과산화수소(H_2O_2)와 황산(H_2SO_4)을 이용하여 폐수지 중 방사성 핵종을 제거하는 기초실험을 수행하여 그림 3.2와 표 23에 나타내었다. 실험결과, ^{60}Co 과 ^{14}C 의 농도는 낮아졌지만 IAEA 규제해제 기준농도 이상인 것으로 나타났으며 황산이 과산화수소보다 약간 더 효과적인 것으로 확인되었다.



(a) 반응전 폐수지



(b) 반응후 폐수지

그림 13. 화학약품을 이용한 제염전·후 폐수지 현상

표 23. 화학약품 종류별 제염실험결과

폐수지	Co-60	유기 C-14	무기 C-14
	농도 (Bq/g)	농도 (Bq/g)	농도 (Bq/g)
반응전	1.55	1.46	2.82
과수반응(상온)	0.46	0.77	1.89
제염 효율(%)	70.3	47.2	32.9

폐수지	Co-60	유기 C-14	무기 C-14
	농도 (Bq/g)	농도 (Bq/g)	농도 (Bq/g)
반응전	1.55	1.46	2.82
황산반응(상온)	0.42	1.16	0.13
제염 효율(%)	72.9	20.5	95.3

라. 황산수용액 농도별 방사성핵종 분리실험

폐수지 표면과 기공 내에 흡착되어 있는 유기형 방사성탄소화합물($^{14}\text{C}_m\text{H}_n$)를 무기형 방사성이산화탄소($^{14}\text{CO}_2$)로 전환하여 분리하고, 무기형 방사성이산화탄소를 기체상태의 방사성이산화탄소로 전환시킬 뿐만 아니라, 음이온교환수지의 관능기에 결합된 이온형 방사성탄소($\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$, $^{14}\text{CO}_3^{2-}$)를 치환분리하기 위해 황산수용액 농도에 따른 실험을 수행하여 얻어진 결과를 표 24.에 정리하였다. 이물질을 포함하고 있는 방사성폐수지를 2 % 및 10 % 황산수용액으로 처리한 결과, 10 % 황산수용액으로 처리한 폐수지의 제염 효율이 더 높은 것으로 확인되었다.

표 24. 황산수용액 농도에 따른 방사성핵종 분리실험결과

황산농도	핵종	반응 전(Bq/g)	반응 후(Bq/g)	제염효율(%)
2%	Co-60	1.06	0.75	29.2
	C-14	1.42	0.97	31.6
10%	Co-60	1.06	0.53	50
	C-14	1.42	0.21	85.2

황산처리 폐수지(이물질 포함)를 폐수지(이물질 제거)와 이물질로 분리한 후 유·무기형 ^{14}C 농도를 분석하여 표 25.에 정리하였으며, 유기형 ^{14}C 농도가 무기형 ^{14}C 농도보다 낮은 것으로 확인되었다.

 표 25. 황산처리 폐수지 및 이물질 중 유·무기형 ^{14}C 농도 분석결과

황산 농도	분석시료 (황산처리후)	유기 C-14		무기 C-14		전체 C-14	
		농도 (Bq/g)	구성비 (%)	농도 (Bq/g)	구성비 (%)	농도 (Bq/g)	구성비 (%)
2 %	폐수지 + 이물질	0.46	47.5	0.51	52.5	0.97	100
	폐수지	0.21	36.7	0.36	63.3	0.57	
	이물질	1.50	27.7	3.92	72.3	5.42	
10 %	폐수지 + 이물질	0.09	42.9	0.12	5.71	0.21	
	폐수지	MDA	-	MDA	-	MDA	
	이물질	0.65	23.3	2.15	76.7	2.80	

마. 황산수용액 온도별 방사성핵종 분리실험

황산용액을 이용하여 상온과 90℃의 온도에서 폐수지에 오염된 방사성 핵종을 제거하여 표 26.에 나타내었다. 반응온도를 90℃로 하였을 때 ⁶⁰Co은 물론 유·무기형 ¹⁴C가 각각의 자체처분 허용농도값인 0,1 Bq/g과 1 Bq/g 이하를 나타내어 폐수지 제염공정에 적용 가능한 것으로 확인되었다.

표 26. 반응온도별 방사성핵종 분리실험

폐수지	Co-60	유기 C-14	무기 C-14
	농도 (Bq/g)	농도 (Bq/g)	농도 (Bq/g)
반응전	1.55	1.46	2.82
황산반응(상온)	0.42	1.16	0.13
제염효율(%)	72.9	20.5	95.3

폐수지	Co-60	유기 C-14	무기 C-14
	농도 (Bq/g)	농도 (Bq/g)	농도 (Bq/g)
반응전	1.55	1.46	2.82
황산반응(90℃)	MDA	0.06	0.09
제염효율(%)	100	95.8	96.8

바. 반응시간별 방사성핵종 분리실험

황산을 이용하여 90℃의 온도에서 반응시간을 달리하여 폐수지에 오염된 방사성 핵종을 제거한 결과를 표 27.에 나타내었다. 반응시간을 3시간으로 하였을 때 ⁶⁰Co은 물론 ¹⁴C도 각각의 자체처분 허용농도값 이하를 나타내어 폐수지의 제염이 가능한 것으로 확인되었다. 그러나 황산반응 후 폐수지 중의 ⁶⁰Co의 농도를 보다 안전한 농도(0.01 Bq/g, IAEA 규제해제 기준농도인 0.1 Bq/g의 1/10)까지 낮추기 위해서는 추가적인 제염공정의 적용이 필요한 것으로 판단된다.

표 27. 반응시간별 방사성핵종 분리실험

폐수지	반응조건	황산반응 전		황산반응 후		제염 효율(%)	
		Co-60 (Bq/g)	C-14 (Bq/g)	Co-60 (Bq/g)	C-14 (Bq/g)	Co-60	C-14
A	90℃, 3시간	0.478	1.14	0.044	0.12	90.7	89.4
	90℃, 5시간	0.448	1.46	0.047	0.14	89.5	90.4

위 결과들을 종합해 보면 과산화수소보다 황산의 폐수지 제염효율이 더 높은 것으로 보이며 황산을 제염제로 사용하여 농도, 온도를 증가 시킬 경우 제염 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 실제 폐수지 제염장비를 설계할 경우 반응 용기의 재질이나 특성을 고려해 본다면 높은 온도와 농도의 황산의 사용에는 한계가 있을 것으로 보인다.

제 2 절 초음파와 미세버블 실험장치 제작 및 제염실험

1. 초음파 실험장치 제작 및 제염실험

가. 초음파 세척원리

초음파세척이란 20 KHz~수백 MHz의 가청주파수 이상의 음파를 이용한 것으로 에너지가 대단히 크다. 액체에 초음파를 조사하면 미세한 공동(Cavitation)이 초당 25,000~30,000회 정도 발생과 소멸을 반복하게 되는데 초음파세척은 초음파의 음파 이러한 공동효과를 이용한 것이다. 공동현상은 진동에 따라 아주 적은 교반과 기포 파괴로 인한 화학적, 열적 작용을 수반하게 되며 이러한 작용의 복합 반복으로 그림 3.3의 원리와 같이 화학반응의 촉진과 분산작용이 증가하여 피세척물 주위에 부착되어 있는 이물질들을 세척하게 된다.

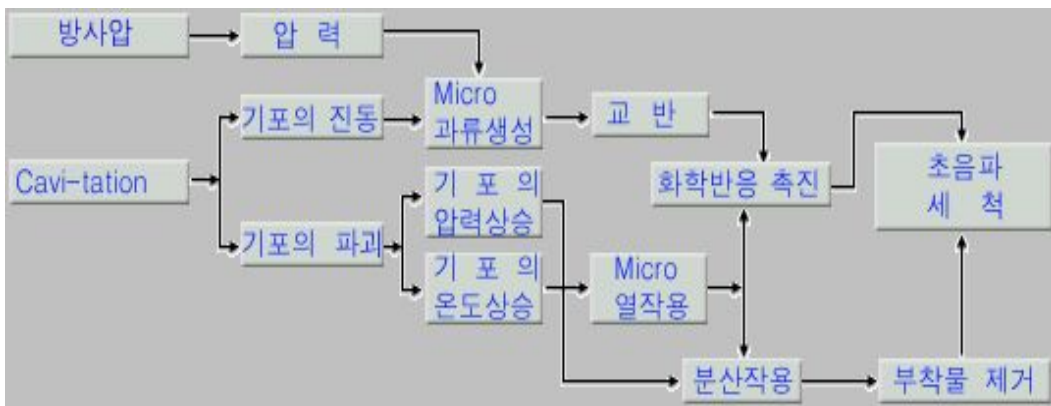


그림 14. 초음파세척의 원리도

나. 초음파를 이용한 폐수지 제염실험 방법 및 결과

한빛 제1발전소에서 발생한 폐수지를 물과 혼합하여 스크린 메시와 종이필터를 이용해 폐수지와 이물질로 1차 여과·분리한 후 방사능 농도를 평가하였으며, 여과

에 의해 1차 분리된 폐수지에 물을 첨가한 후 그림 3.4와 같이 제작한 Horn형 초음파 장치(21kHz, 1.8KW)를 이용하여 1시간동안 초음파를 인가시켜 이물질을 탈착시킨 후 스크린 메시와 종이필터를 이용해 2차 여과·분리하여 분석한 폐수지와 이물질 중의 방사능 농도를 표 28. 에 정리하였다. 1차 여과·분리된 폐수지 중 ^{60}Co 농도는 0.187 Bq/g이며, 이물질 중 ^{60}Co 농도는 6.18 Bq/g으로 ^{60}Co 은 대부분 이물질에 존재함을 알 수 있었다. 2차 초음파처리 된 폐수지 중 ^{60}Co 농도는 MDA 미만으로 초음파처리를 통해 폐수지에 흡착된 이물질이 추가로 탈착되는 것을 확인할 수 있었다.



그림 15. 초음파를 이용한 폐수지 제염실험장치

표 28. 초음파를 이용한 폐수지 제염실험결과

(1) 폐수지 여과분리 후 방사능 농도

방사성폐수지	
중량 (g)	30.15
Co-60 농도 (Bq/g)	0.767
총농도 (Bq)	23.13

여과분리 1차(스크린메쉬, 종이필터 사용)

여과분리 폐수지	
중량 (g)	26.7
Co-60 농도 (Bq/g)	0.187
총농도 (Bq)	4.99
제염 효율(%)	75.6

여과분리 이물질	
중량 (g)	2.6
Co-60 농도 (Bq/g)	6.18
총농도 (Bq)	16.07

(2) 여과분리 폐수지의 초음파처리 후 방사능 농도

여과분리 폐수지	
중량 (g)	26.7
Co-60 농도 (Bq/g)	0.187
총농도 (Bq)	4.99

초음파처리(2차)

초음파처리 폐수지	
중량 (g)	23.6
Co-60 농도 (Bq/g)	MDA 미만
총농도 (Bq)	-
제염 효율(%)	100

초음파처리 이물질	
중량 (g)	1.9
Co-60 농도 (Bq/g)	2.16
총농도 (Bq)	4.10

2. 마이크로버블 실험장치 제작 및 제염실험

가. 마이크로버블 세척원리

마이크로버블이란 통상적으로 직경이 50 μm 이하의 기포를 칭한다. 일반 기포는 수중에서 급속으로 상승하지만 마이크로버블은 부력이 적어 1분에 약 3mm정도 상승하기 때문에 장시간 수중에 체류하면서 축소되어 소멸될 때 자유라디칼이 발생된다. 마이크로버블은 음전하(-)를 띄고 있어 수중에서 양전하(+)를 띤 이물질에 부착하여 그림 3.5와 같이 서서히 상승하여 수면으로 이동시킨다. 또한 마이크로버블을 고밀도로 발생시키면 자기압괴(물의 압력에 의해 소멸하는 현상)되면서 초당 수백회의 충격파가 발생하여 이물질의 제거효율을 증가시킨다.

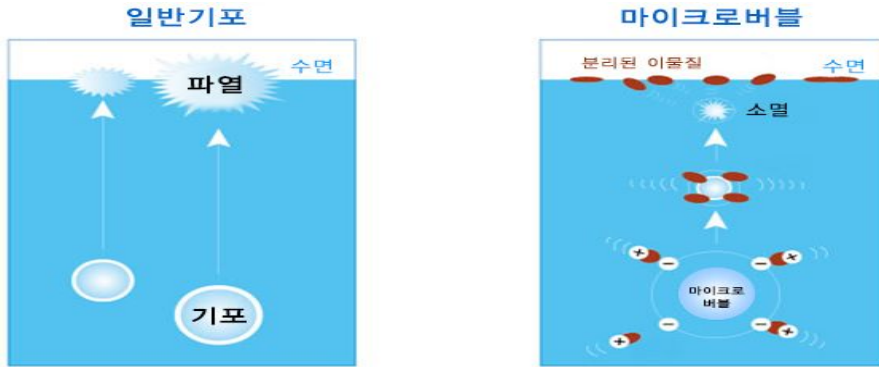


그림 16. 일반기포와 마이크로버블의 소멸과정

나. 마이크로버블을 이용한 폐수지 제염실험 방법 및 결과

마이크로버블을 이용한 폐수지 제염실험장치를 그림 3.6과 제작하였다. 탈착된 이물질은 생성된 버블과 함께 컬럼을 빠져나가 마이크로필터에서 여과되도록 구성하였으며, 필터를 통과한 버블은 물로 전환·회수되어 재사용할 수 있도록 하였다. 30분간 처리한 결과를 표 29.에 정리하였으며, ^{60}Co 농도가 MDA 미만으로 폐수지 제염기술로 활용될 수 있음을 확인하였다.



그림 17. 마이크로버블을 이용한 폐수지 제염실험장치

표 29. 미세버블을 이용한 폐수지 제염실험결과

	실험전	실험후	제염 효율(%)
	Co-60 (Bq/g)	Co-60 (Bq/g)	
실험 1	0.693	MDA	100
실험 2	0.796	MDA	100

3. 초음파 및 마이크로버블 제염실험

가. 초음파 및 마이크로버블 제염 실험 방법

마이크로버블과 초음파 장치를 순차적으로 이용하여 폐수지에 부착된 이물질을 탈리시키고 탈리된 이물질은 생성된 버블과 함께 컬럼을 빠져나가 마이크로필터에서 여과하였다. 필터를 통과한 버블은 파괴되어 물로 전환되고 용수저장조로 회수하였다. 용수저장조로 회수된 물은 다시 마이크로버블장치를 통해 재이용 할 수 있도록 구성하였다.

나. 실험 결과

초음파/마이크로버블을 이용하여 한빛 제1발전소 발생 취출수 정화용 폐수지로부터 이물질을 분리한 폐수지와 이물질 및 폐수지(이물질 분리)로부터 분리한 양이온수지와 음이온수지에 대하여 방사능 농도를 분석하여 표 30.에 정리하였다. 초음파/마이크로버블로 이물질을 탈착하였을 때 폐수지 중 ^{60}Co , ^{14}C 농도가 MDA 이하이어서 폐수지 제염기술로 활용이 가능함을 확인하였다. 또한 폐수지(이물질 분리)를 양이온수지와 음이온수지로 분리하여 분석한 결과에 의하면, 양이온수지에서는 ^{60}Co , ^{137}Cs 이 검출되고, 음이온수지에서는 ^{14}C 이 검출되는 것으로 확인되었다.

표 30. 이물질 분리 및 양·음이온수지 분리 전·후 방사능 농도

(1) 폐수지(이물질 분리)와 이물질 중 방사능 농도

폐수지(이물질 포함)	
중량 (g)	30.15
Co-60 (Bq/g)	0.77
Cs-137 (Bq/g)	MDA
C-14 (Bq/g)	1.32

이물질 분리 (초음파+마이크로버블 처리)

폐수지(이물질분리)		제염효율(%)
중량 (g)	20.05	-
Co-60 (Bq/g)	MDA	100
Cs-137 (Bq/g)	MDA	100
C-14 (Bq/g)	0.17	87.1

이물질	
중량 (g)	3.1
Co-60 (Bq/g)	6.4
Cs-137 (Bq/g)	MDA
C-14 (Bq/g)	12.78

(2) 양·음이온교환수지 중 방사능 농도

양이온수지(이물질 분리)	
중량(g)	16.8
Co-60 (Bq/g)	0.034
Cs-137 (Bq/g)	0.064
C-14 (Bq/g)	MDA

음이온수지(이물질 분리)	
중량(g)	22.7
Co-60 (Bq/g)	MDA
Cs-137 (Bq/g)	MDA
C-14 (Bq/g)	0.15

폐수지(이물질 분리)에서는 ^{60}Co , ^{137}Cs 이 검출되진 않았지만 ^{14}C 은 검출되었으며, 이물질에서는 ^{60}Co , ^{14}C 가 높은 농도로 검출되었다. 이는 제염된 폐수지에 음이온수지가 훨씬 많이 포함되어 있기 때문으로 보인다. 이물질은 비방사성 부식생성물(Fe, Ni 등)들이 ^{60}Co 과 공침되어 형성된 크러드(CRUD)이므로 폐수지보다는 상대적으로 높게 나타난 것으로 여겨진다. 분리한 양이온수지에서는 ^{60}Co , ^{137}Cs 만이 검출되었고, 음이온수지에서는 ^{14}C 만이 검출된 것은 수용액상에서 ^{60}Co , ^{137}Cs 이 $^{60}\text{Co}^{2+}$ 와, $^{137}\text{Cs}^+$ 의 양이온으로 존재하고 ^{14}C 은 HCO_3^- , CO_3^{2-} 의 음이온으로 존재하여 양·음이온수지와 이온교환결합을 형성하였기 때문인 것으로 여겨진다.

4. 초음파를 이용한 폐수지 제염 성능평가

한빛 제1발전소에서 발생한 폐수지에는 상당량의 이물질이 함유되어 있어 초음파를 이용하여 폐수지와 이물질로 분리한 후 분석한 ^{60}Co , ^{14}C 농도를 채와 자석으로 분리한 후 분석한 ^{60}Co , ^{14}C 농도와 함께 표 31. 에 정리하였다. 폐수지로부터 이물질 분리성능은 채와 자석을 이용한 분리보다는 초음파를 이용한 분리가 더욱 효과적일 뿐만 아니라, ^{60}Co 과 ^{14}C 농도도 각각의 규제해제 기준농도인 0.1 Bq/g과 1 Bq/g 이하로 나타나 폐수지 제염공정에 활용할 수 있을 것으로 확인되었다.

표 31. 폐수지와 이물질 분리전·후 방사성핵종 분석결과

분리방법	항목	분리전	분리후		제염 효율(%)
		폐수지	폐수지	이물질	
채분리	Co-60 (Bq/g)	1.55	0.54	12.70	65.1
	C-14 (Bq/g)	4.28	0.96	3.91	77.5
자석분리	Co-60 (Bq/g)	1.55	0.29	10.00	81.2
	C-14 (Bq/g)	4.28	1.81	3.77	57.7
초음파분리	Co-60 (Bq/g)	0.77	MDA	6.4	100
	C-14 (Bq/g)	1.32	0.17	12.78	87.1

5. 초음파를 이용한 추가 폐수지시료 제염실험

추가 폐수지시료 A와 #1에 물을 첨가하여 Horn형 초음파장치로 1시간동안 처리한 후, 초음파 처리 전·후 폐수지와 이물질(그림 3.7 참조) 중 ^{60}Co 농도를 분석하여 표 32.에 정리하였다. 초음파를 이용하여 이물질을 분리한 결과, 폐수지 중 ^{60}Co 농도는 규제해제 기준농도까지 낮아졌으나, 이물질 중 ^{60}Co 농도는 높게 나타나 이물질에 대한 추가적인 처리대책이 필요한 것으로 확인되었다.

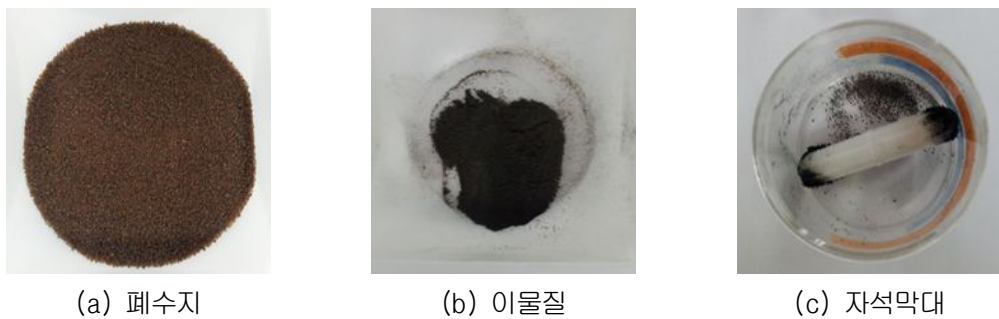


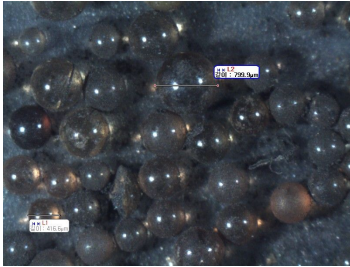
그림 18. 초음파처리 후 폐수지, 이물질 및 막대자석

표 32. 초음파를 이용한 추가 폐수지시료의 제염실험 결과

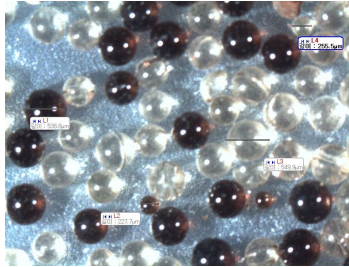
시료	초음파처리 전		초음파처리 후						
	폐수지 (이물질 포함)		폐수지		제염 효율 (%)	이물질		폐수	
	무게 (g)	Co-60 (Bq/g)	무게 (g)	Co-60 (Bq/g)		무게 (g)	Co-60 (Bq/g)	무게 (g)	Co-60 (Bq/g)
A	29.33	0.54	26.19	0.08	85.1	1.67	7.82	78	MDA
1	31.21	0.18	30.27	0.12	33.3	0.53	3.45	77	MDA

초음파처리 후 폐수지 중 ^{60}Co 농도가 낮아진 이유가 폐수지에 흡착되었던 이물질의 탈착에 의한 것인지를 확인하기 위하여 초음파처리 전·후 폐수지와 이물질을

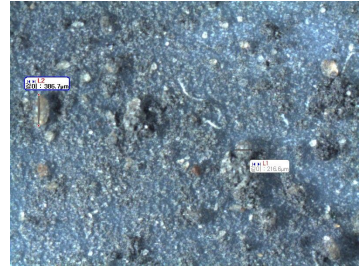
75배율의 전자현미경으로 관찰하여 그림 3.8에 나타내었다. 초음파처리를 한 폐수지에 이물질이 거의 남아있지 않은 것으로 보아 이물질의 탈착에 의해 폐수지 중 ^{60}Co 농도가 낮아진 것으로 확인되었다.



(a) 초음파처리 전 폐수지



(b) 초음파처리 후 폐수지



(c) 초음파처리 후 이물질

그림 19. 초음파처리 전·후 폐수지와 이물질의 전자현미경($\times 75$) 관찰모습

제 3 절 제염폐액 정화용 실험장치 구성 및 정화실험

1. 황산처리 및 초음파/마이크로버블처리 폐액 분석

황산 및 초음파/마이크로버블 처리폐액 중 감마핵종 분석결과 ^{60}Co 농도가 MDA 이하로 검출되었지만, 폐액 중의 주요성분을 확인하기 위해 유도결합플라즈마(ICP)와 이온크로마토그래피(IC)로 분석한 결과를 표 33.에 정리하였다. 황산처리를 한 경우는 양이온수지에 결합되어 있던 양이온성 금속성분(Co, Fe, Mn, Ni, Cr 등)과 음이온수지에 결합되어 있던 염소 음이온(Cl^-)이 치환되어 검출된 것으로 여겨지며, 초음파/마이크로버블로 처리할 경우는 양이온성 금속성분(Co, Fe, Mn, Ni, Cr 등)은 거의 탈착되지 않았으나, 음이온수지에 존재하던 황산(SO_4^{2-}) 및 염소 음이온(Cl^-)이 탈착된 것으로 여겨진다. 폐수지 제염과정중에 발생하는 폐액을 최소화하기 위해 고분자응집, 여과 등의 기술을 이용한 단위실험을 수행하였다.

표 33. 황산처리 폐액 및 초음파/마이크로버블처리 폐액 분석결과

시료	주요성분 (ppm)						
	SO_4^{2-}	Cl^-	Co	Fe	Mn	Ni	Cr
10% 황산 처리폐액	51,200	74	1.095	4,886	37.01	88.74	7.98
초음파/마이크로버블 처리폐액	1.97	2.62	0	0.015	0.028	0	0.001

2. 고분자응집제를 이용한 폐액처리 실험

가. 응집제투입량에 따른 제염성능평가

고분자응집제는 아크릴아미드(Acrylamide)계 열 에멀전과 수용액으로 0~100℃의 온도범위와 1~14의 pH 범위에서 사용이 가능하기 때문에 다른 종류의 응집제보다

응집생성이 용이한 것으로 알려져 있다. 상기 두 종류의 응집제를 혼합사용하여 저농도와 고농도 ^{60}Co 이 용해되어 있는 폐액에 대한 응집제 투입량에 따른 제거효율을 평가하여 표 34.에 정리하였다. 극미량 ^{60}Co 이 함유된 저농도 폐액에서는 제거 효율이 그다지 높지 않은 것으로 나타났으나, ^{60}Co 이 다량 함유된 고농도 폐액에서는 응집제를 500 ppm 투입하였을 때 제염 효율값이 99.6%로 나타났으며, 1,000ppm을 투입하였을 때 제염 효율 값이 99.6%로 유사한 값을 보여주고 있다. 따라서 고분자응집제는 약 500 ppm 정도가 적정 투입량임을 확인하였다.

표 34. 응집제 투입량에 따른 폐액 중 ^{60}Co 제거실험 결과

구분	핵종	폐액농도	응집제 투입량(ppm)에 따른 농도변화		
			200	500	1,000
저농도	Co-60 (Bq/g)	2.78E-02	2.28E-02	6.10E-03	5.65E-03
	제염효율 (%)		17.9	78	79.6
고농도	Co-60 (Bq/g)	2.12E+00	2.11E-02	7.98E-03	7.73E-03
	제염 효율 (%)		99.4	99.6	99.6

폐액이 산성일 경우를 감안하여 용액 pH에 따른 제거효율을 평가하여 표 35.에 정리하였다. pH 6.5에서 제염 효율은 99%로 ^{60}Co 제거효율은 산성 및 염기성에 비해 중성 조건에서 제거 효율이 가장 높은 것으로 나타났다. 고분자응집제는 pH 범위가 1~14로 매우 넓으나, 응집 보조제로 사용한 에멀전 응집제의 pH 범위가 6~13이기 때문에 산성조건에서는 응집효율이 좋지 않은 것으로 여겨진다.

표 35. 용액의 pH에 따른 폐액 중 ^{60}Co 제거 실험결과

핵종	폐액농도	pH에 따른 농도변화		
		3.5	6.5	9.0
Co-60 (Bq/g)	2.12E+00	8.03E-02	2.11E-02	2.41E-01
제염 효율(%)		96.2	99	88.6

나. 저농도 폐액 응집효율 향상실험

극미량 ^{60}Co 을 함유한 저농도 폐액에서의 응집효율을 향상시키기 위해 응집 핵인 철염(Fe-salt)을 추가로 투입하여 실험한 결과를 표 36.에 나타내었다. 실험결과 응집 핵의 투입은 폐액 중의 ^{60}Co 에 대한 응집효율을 크게 증가시키지 못하는 것으로 확인되었다.

표 36. 저농도 폐액 응집효율 향상실험 결과

핵종	폐액농도	응집핵 투입량(ppm)에 따른 농도변화		
		200ppm	500ppm	1,000ppm
Co-60 (Bq/g)	2.78E-02	2.28E-02	2.19E-02	2.41E-02
제염 효율(%)		17.9	21.2	13.3

다. 응집제 사용에 따른 COD 영향평가 실험

고분자응집제는 유기화합물로 용액 중에 잔존되어 있을 경우 화학적 산소요구량(COD)을 증가시킨다. 따라서 응집제의 종류와 사용량(1,000ppm)에 따른 화학적 산소요구량을 망간법(COD_{Mn})으로 평가하여 표 37.에 나타내었다. 고분자응집제를 단독 또는 철염과 함께 사용하였을 경우 화학적 산소요구량(COD_{Mn})이 약 2.25~2.48 ppm으로 무기응집제에 비해 약간 높았지만 수질에는 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

표 37. 응집제 사용에 따른 COD 영향평가 실험결과

	고분자응집제	고분자응집제 + 철염	무기응집제
	1,000ppm	1,000ppm	1,000ppm
COD _{Mn} (ppm)	2.25	2.48	0.11

3. 여과기술을 이용한 오염폐액의 정화 실험

초음파를 이용한 폐수지 제염공정에서 발생한 폐수를 여과에 의해 정화가 가능한지를 평가하기 위하여 5 μm 와 0.2 μm 의 필터로 각각 여과한 후, 용액 중 금속성분을 유도결합플라즈마로 분석한 결과를 표 38.에 나타내었다. 0.2 μm 의 필터로 여과시 폐수 중 금속성분이 상당량 제거되어 정화가 가능함을 확인하였다.

표 38. 초음파공정 폐수 중의 금속이온농도

시료	여과 (μm)	금속이온 (ppb)				
		Co	Fe	Mn	Ni	Cr
A	5.0	ND	704	12.4	ND	8.4
	0.2		23.2	4.3		ND
1	5.0	ND	43.3	7.6	ND	5.7
	0.2		ND	6.3		ND

제 4 절 초임계 이용 방사능 추출실험 및 추출제 선정

폐수지 중 ^{60}Co 을 추출·분리효과를 평가하기 위해 초임계이산화탄소를 추출용매로 이용한 예비실험을 수행하였다. 이산화탄소는 비극성 물질이므로 이온상태의 $^{60}\text{Co}^{2+}$ 에 대하여 낮은 용해도를 나타낸다. 따라서 초임계이산화탄소를 이용하여 효과적으로 Co-60을 추출하기 위해서는, $^{60}\text{Co}^{2+}$ 과 결합하여 수용액으로부터 초임계이산화탄소로 분배되는 추출제를 사용하여야 한다. 폐수지 중 ^{60}Co 을 추출·분리하기 위해 Co를 추출하는 데 널리 사용되고 있는 Cyanex-272를 추출제로 선정하였다. Cyanex-272는 수용액의 pH가 6 이상인 용액에서 Co 추출이 효율적이나, 수용액에 초임계이산화탄소가 용해된 경우에는 용액의 pH가 3 이하로 Cyanex-272에 의한 Co 추출효율이 감소하게 된다. 따라서 초임계이산화탄소가 용해된 수용액의 pH를 중·염기성으로 변화시켜 Co 추출효율을 향상시키기 위한 보조추출제로 디에틸아민(DEA, Diethylamine)을 사용하였다. 초임계이산화탄소 조건(60°C , 200bar) 하에서 Cyanex-272와 디에틸아민을 이용하여 폐수지와 황산수용액에 용해되어 있는 Co 추출·분리실험을 수행한 후 유도결합프라즈마로 분석한 결과를 그림 3.11의 그래프로 나타내었으며, 디에틸아민의 양이 증가할수록 Co 추출효율이 80%까지 향상되는 것을 확인하였다.

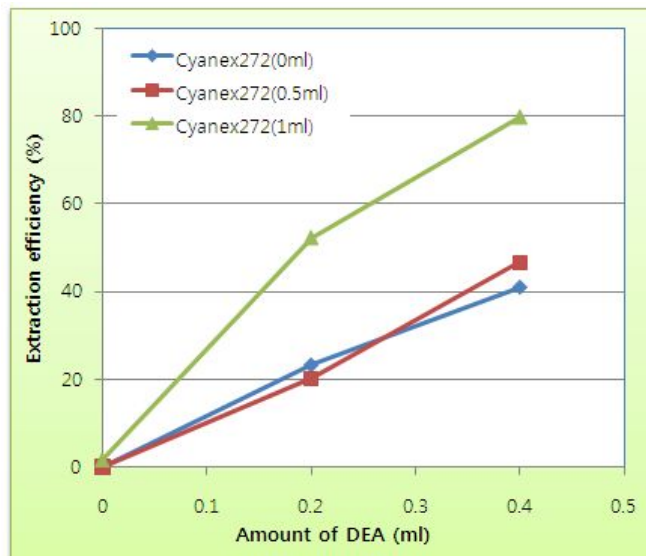


그림 20. 초임계이산화탄소 하에서 Co 추출효율

제 5 절 초임계로 제작 및 분리·추출실험

1. 초임계이산화탄소를 이용한 방사성핵종 추출·분리 메커니즘

폐수지에 결합되어 있는 방사성핵종을 추출·분리하는 메커니즘을 그림 3.12에 나타내었다. 초임계이산화탄소는 비극성 물질로서 폐수지로부터 방사성 코발트이온 ($^{60}\text{Co}^{2+}$)을 직접 추출하지 못하므로 방사성 코발트이온($^{60}\text{Co}^{2+}$)과 결합하여 초임계이산화탄소로 용해시키는 추출제를 함께 사용하여야 한다.

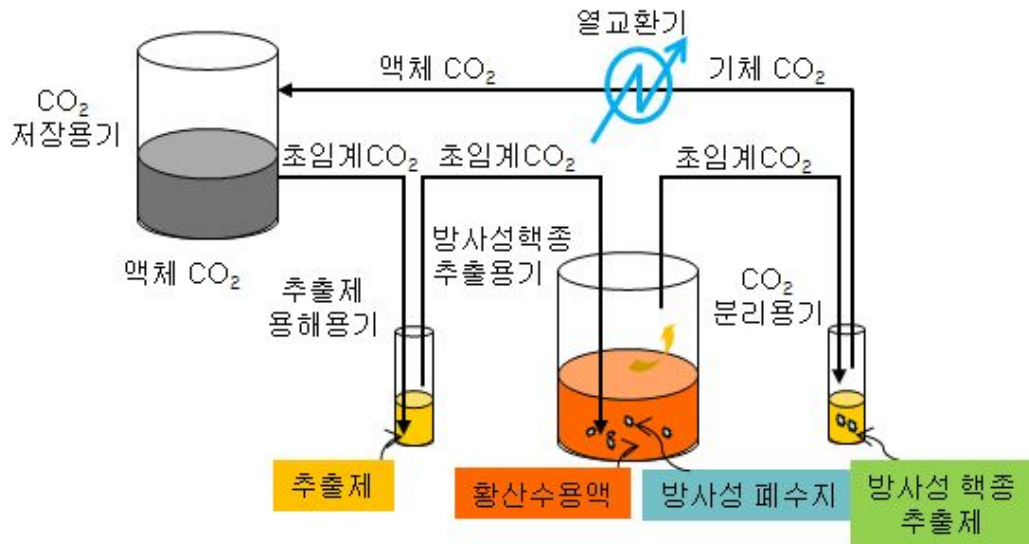


그림 21. 초임계이산화탄소를 이용한 방사성핵종 추출 메커니즘

2. 초임계이산화탄소 추출·분리장치 제작

폐수지에 결합되어 있는 방사성핵종을 추출·분리하는 Lab 장치를 활용하여 그림 3.13과 같이 공정개발 단위실험에 활용하였다.

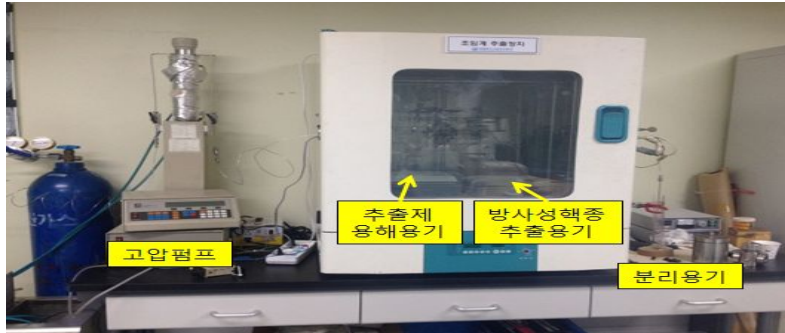


그림 22. 초임계이산화탄소 추출실험장치

3. 방사성폐수지로부터 ^{60}Co 추출 · 분리효율 평가 실험

방사성폐수지와 0.2% 황산수용액을 초임계 추출용기에 넣고 초임계이산화탄소 조건(60℃, 200bar) 하에서 Cyanex-272와 디에틸아민을 이용하여 ^{60}Co 을 추출 · 분리한 결과를 표 39.에 정리하였다. 폐수지뿐 만 아니라 황산수용액 중의 ^{60}Co 농도가 MDA 이하로 확인되어 폐수지 제염공정에 적용이 가능한 것으로 확인되었다.

표 39. 초임계를 이용한 폐수지 중 ^{60}Co 추출 · 분리결과

실험	^{60}Co 농도 (Bq/g)			제염 효율(%)
	실험 전	실험 후		
	폐수지	폐수지	황산용액	
1	0,86	MDA	MDA	100
2	0,59	MDA	MDA	100
3	0.77	MDA	MDA	100

제 6 절 2차폐기물(이물질) 처리 실험

1. 탈착 이물질 성분분석

폐수지로부터 분리된 이물질의 구성성분과 비율을 확인하기 위해 채분리 이물질, 자석분리 이물질, 폐수지 연소후 발생한 회분을 무기산과 과산화수소로 처리한 후 유도결합프라즈마를 이용하여 분석한 결과를 표 40.에 정리하였다. 분석결과 Fe(>98%), Ni(>1%), Mn(>0.2%) 및 Cr(0.1%) 순으로 존재하는 것으로 나타났으며, Co는 0.02% 이하인 것으로 확인되었다. 따라서 이물질은 원자로냉각재계통에 사용되는 스테인리스강과 인코넬 재료의 부식에 의해 생성된 물질로 형성된 크러드(CRUD)인 것으로 판단된다.

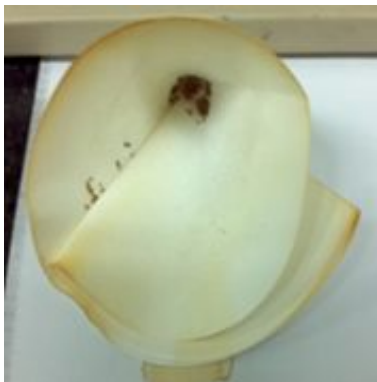
표 40. 폐수지로부터 분리한 이물질 분석결과

시 료		구성 성분				
		Fe	Ni	Mn	Cr	Co
채분리 이물질	농도 (mg/L)	466,251	5,510	1,422	524	83
	구성비 (%)	98.41	1.16	0.3	0.11	0.018
자석분리 이물질	농도 (mg/L)	545,419	6,909	1,384	679	109
	구성비 (%)	98.36	1.25	0.25	0.12	0.02
연소후 잔유물	농도 (mg/L)	294,584	3,444	1,068	771	62
	구성비 (%)	98.22	1.15	0.36	0.26	0.02

※ 구성비(%) : 5개 금속농도의 합을 100%로 기준함

2. 탈착 이물질의 산성용액처리

초음파 제염공정에서 발생한 이물질의 처리기술을 개발하기 위해 폐수지 시료 A와 #1을 산성용액으로 용해하여 여과한 모습을 그림 3.16에 나타내었다. 시료 A는 이물질에 포함되어 있던 일부 수지가 산성용액에 용해되지 않아 여과지에 남은 것이며, 두 시료 모두에서 이물질은 거의 다 용해된 것으로 확인되어 이물질 처리기술로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 폐수지시료 A



(c) 폐수지시료 1

그림 23. 이물질 산성용액처리 후 여과모습 (5 μm)

제 7 절 혼상폐수지 분리실험

1. 혼상폐수지 분리 기초실험

가. 염화나트륨 포화수용액을 이용한 분리실험

한빛 제1발전소에서 사용하는 혼상수지는 양·음이온수지의 비중이 각각 1.29와 1.09이므로 염화나트륨 포화수용액(비중≒1.2)을 이용하여 이물질 제거하지 않은 폐수지, 자석으로 이물질을 제거한 폐수지, 초음파로 이물질을 제거한 폐수지에 대하여 분리실험을 수행하여 그림 3.17에 나타내었다. 이물질을 제거하지 않은 폐수지와 자석으로 이물질을 제거한 폐수지는 분리가 잘 되지 않았지만, 초음파로 이물질을 제거한 폐수지는 분리가 잘 되었음을 확인하였다. 이물질을 제거하지 않았거나 자석으로 제거하였을 때는 폐수지에 남아 있는 이물질에 의해 수지비중이 변화되어 분리가 되지 않은 반면, 초음파로 처리한 폐수지는 이물질이 거의 다 제거되어 본래 수지비중과 유사하게 되어서 비중 차에 의한 분리가 잘 된 것으로 여겨진다. 염화나트륨용액으로 수지를 분리할 경우에는 용액 중 나트륨(Na^+)과 염소(Cl^-) 이온과 폐수지에 결합되어 있는 방사성 양·음이온과의 이온교환을 고려하여야 할 것이다.

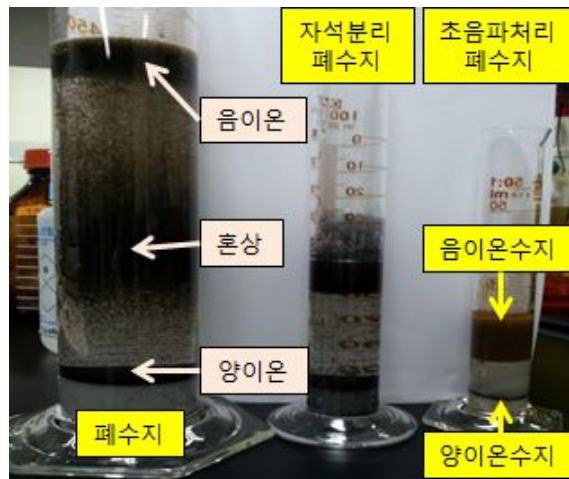


그림 24. 염화나트륨 포화수용액을 이용한 혼상수지 분리실험

나. 물의 유량을 이용한 폐수지 분리 실험

염화나트륨용액을 이용한 폐수지 분리시의 단점을 보완하기 위해 먼저 초음파로 이물질 제거한 폐수지를 대상으로 물의 유량에 의한 분리장치(그림 3.18 참조)를 이용하여 양이온수지와 음이온수지로 각각 분리하여 측정된 혼합비율을 표 41.에 정리하였다. 혼상폐수지를 분리한 결과, 양·음이온수지 혼합비율이 4 : 96으로 신품 혼상수지 혼합비율인 40 : 60과는 상당한 차이를 보였으며, 이는 폐수지가 균일하게 혼합되어 있지 않기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 보다 정밀한 폐수지 제염기술을 개발하기 위해서는 양·음이온수지 비율이 다양한 시료로 실험을 수행하여야 할 것으로 판단되어 폐수지시료를 추가로 선정하여 제염공정개발에 활용하였다.



그림 25. 양·음이온교환수지 분리

표 41. 혼상폐수지의 양·음이온수지 분리결과

항목	분리전	분리후	
	폐수지	양이온수지	음이온수지
부피 (ml)	675	25	650
부피비 (%)	100	4	96

제 8 절 폐수지 제염공정 및 시스템 개요

1. 폐수지 제염공정 수립

폐수지 중 방사성핵종 분리·추출을 위한 단위실험 결과를 바탕으로 저 방사성 SG BM 폐수지 제염공정을 4단계(그림 3.19 참조)로 구분하였으며, 각 단계별 세부 공정기술을 그림 3.19와 같이 수립하여 폐수지 제염시스템을 구성하였다.

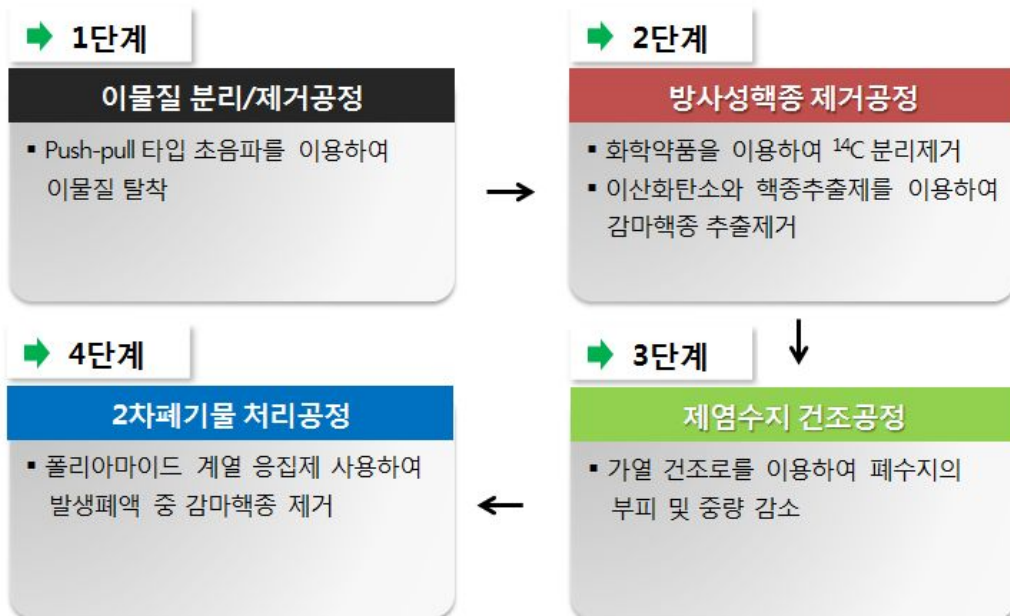


그림 26. 저 방사성 BM 폐수지 제염공정 단계

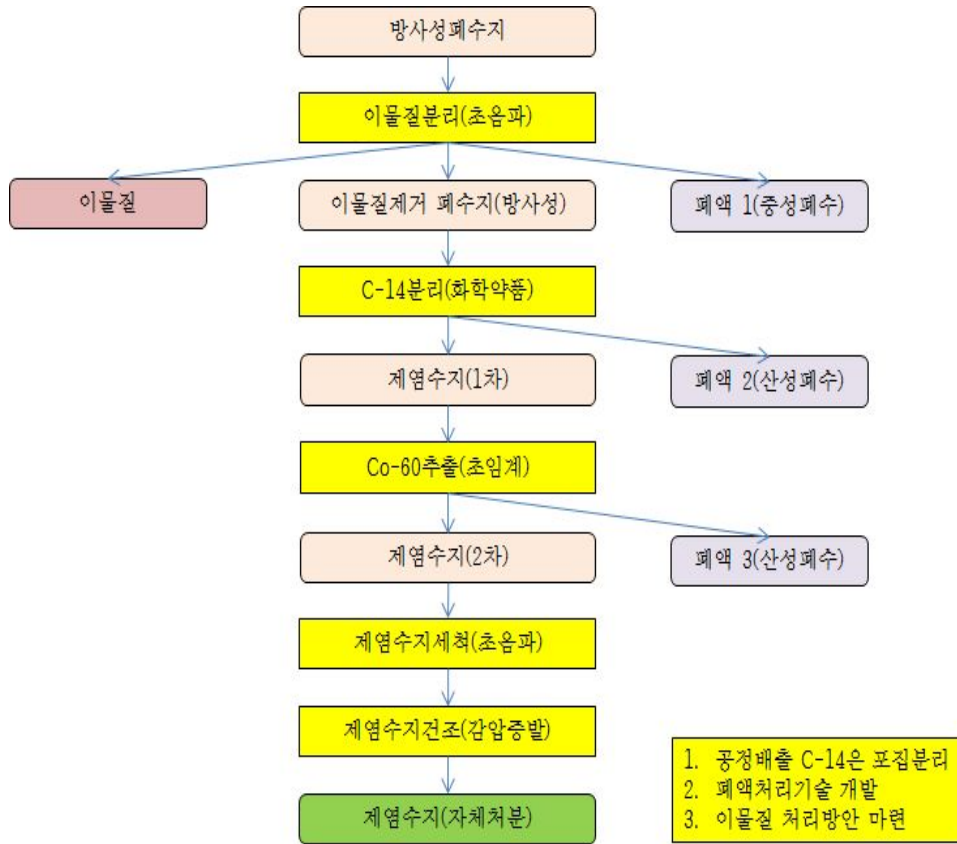


그림 27. 저 방사성 BM 폐수지 제염공정기술

2. 폐수지 제염시스템 구성

폐수지 중 방사성핵종 분리·추출에 적용할 제염공정기술을 바탕으로 저 방사성 BM 폐수지 제염시스템을 그림 3.21과 같이 구성하여 설계·제작을 진행하였다.

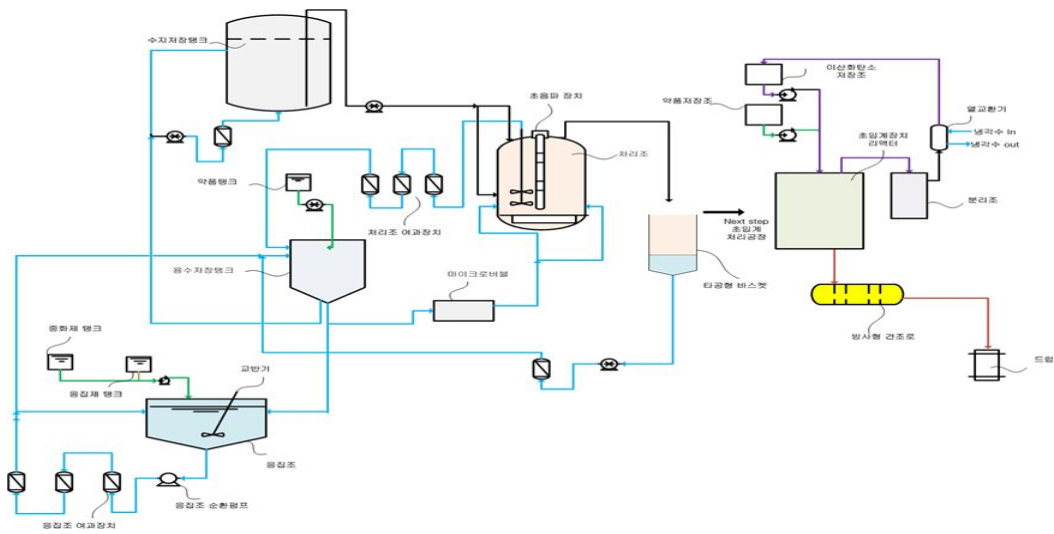


그림 28. 저 방사성 BM 폐수지 제염시스템 구성도

제 5 장 결 론

연구를 진행하는 과정에서 SG 취출수 정화용 폐수지에 함유된 핵종에 대한 화학적 특성을 규명하였고, 폐수지와 방사성핵종간의 이온결합 및 분리 메커니즘을 규명하였다. 원자력발전소 SG 취출수 정화계통 및 CPP(Condensate Polishing Plant) 수지의 오염정도는 샘플마다 조금씩 차이가 있지만 대부분 자체처분 기준치를 웃도는 값을 나타내었고 이러한 폐수지는 발전소의 폐기물 건물 내 여유 공간의 부족 및 악취발생과 화재위험성으로 폐기물 건물 운전 및 정비 수행에도 지장을 초래하므로 시급한 처리가 필요하다. 이러한 폐수지를 해결(자체처분)하기 위해 접근된 방법으로 화학약품, 초음파, 마이크로버블, 초임계 원리를 사용해 보았으며 각각의 제염결과를 보아 실제 현장에 적용하기 좋은 방법으로 초음파와 초임계원리를 사용하는 것이 효율적인 방법으로 보인다. 초음파 제염장치는 제염효율이 90 ~ 99% 정도로 나타났고 초임계이산화탄소 제염장치는 Co 핵종에 대해 최대 70% 제거효율을 나타냈다.

향후 본 제염기술을 잘 활용한다면, 원전에서 발생하는 극미량의 오염 폐수지에 완벽한 제염을 수행하게 되어 방사성폐기물 발생량 저 감화와 처분비용 저 감화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) 한국원자력안전위원회 고시 2013-33호, “방사성폐기물의 자체처분에 관한 규정”
- 2) IAEA Safety Standard Series No. RS-G-1.7 “Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance” , 2004
- 3) 한국원자력안전기술원(KINS), "경수로형 원자력발전소 규제기준 및 규제지침 (KINS/RS-N1200), 2011
- 4) <http://www.kntc.re.kr/openlec/nuc/Atomicpile/chapter3/3-7.htm>
- 5) DOWEX Ion Exchange Resins, Product Information, "DOWEX HGR NG (H)"
- 6) DOWEX Ion Exchange Resins, Product Information, "DOWEX SBR LC NG (OH)"
- 7) Graver Technologies, Data Sheet, "GRAVEX GR 3-16 N"
- 8) Purolite NRW 36, Nuclear Grade Mixed Bed, Product Data Sheet, 2007
- 9) Characteristics and applications Summary, Purolite Brochure, The Purolite Company, 2008
- 10) SSI report, Review of C-14 inventory for the SFR facility, 2002
- 11) Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 2(1), pp147-147, 2004
- 12) Ion Exchange Introduction, Rohm and Haas, 2008
- 13) 한국특허 10-0739855, 2007.07.29.
- 14) J. of the Korean Radioactive Waste Society, Vol. 4(4), p373-384, 2006
- 15) 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 논문요약집, 2006
- 16) 한국특허 10-0747762 2007.08.02
- 17) Korean Chem. Eng. Res., Vol. 45, No. 4, pp 319-327, 2007
- 18) 한국특허 10-1065353, 2011.09.08
- 19) <http://blog.naver.com/craem?Redirect=Log&logNo=40002277298>
- 20) <http://blog.naver.com/isteel9606?Redirect=Log&logNo=120187817279>
- 21) <http://www.o2bubble.co.kr/default/>
- 22) Wai, C. M., Lin, Y., Brauer, R. and Wang, S., Talanta 40, p1325, 1993
- 23) Erkey, C., J. Supercritical Fluids 17, p259, 2000
- 24) Lin, Y. and Wai, C. M., Anal. Chem., 66, p1971, 1994
- 25) Wiebe, R., Gaddy, V. L., J. Am. Chem., Soc., 62, p815, 1940W

감사의 글

대학을 졸업하고 한국전력에 입사하여 고리 연수원에서 전공인 전기공학과 다른 원자력 공학을 처음 접했습니다.

재미있고 신기하고 어렵고...내 인생에서 가장 화려한 삼십년을 한국전력, 한국수력 원자력과 같이 했습니다. 앞만 보고 달려온 삼십년 새로운 분야를 열어가고 거창하게 국가를 위한다는 사명감도 조금 있었고, 무엇보다 우리 가족의 행복을 위해 최선을 다했습니다.

이제 뒤를 돌아보니 참 행복했고 즐거웠습니다. 물론 후회도 없고. 다만 조금 아쉬움은 있습니다.

어느 날 내 자신에게 이런 질문을 했습니다. “삼십년 동안 회사를 다니면서 그리고 나이를 먹어가면서 얻은 것은 무엇이냐” 난 어떤 답을 해야 하나 ?

고민 끝에 그동안 잊고 있던 공부를 더 해보기로 했습니다. 부모님 덕분에 우리또래에는 평범한 가정에서 대학을 보내는 게 쉽지 않았던 시절 대학을 졸업하고 그리 어렵지 않게 한국전력에 들어와 무엇이 그리 급했는지 앞만 보고 달려온 자신에게 무엇인가 선물을 주고 싶어 늦게 아주 늦게 시작한 공부가 벌써 하나의 결실을 맺으려고 합니다.

늦게 시작한 공부를 적극적으로 지지해주고 성원해준 사랑하는 부인 김연화씨 그리고 아빠 대를 이어 한수원에 충성을 하고 있고, 또 대학원도 아빠랑 같이 다녀준 우리 딸 미지 그리고 우리 집 기동 용원 용익이 고맙다.

그동안 회사에서부터 지금까지 제게 많은 가르침을 주시고 제가 멘토로 삼고 있는 박병주 소장님 그리고 학업과 논문을 지도해 주시고 그 외에도 제게 많은 도움을 주신 정운관 교수님께 이 글을 빌어 진심으로 감사드립니다.

회사를 다니면서 우리가 편하게 공부 할 수 있도록 광주에서 교수님들이 어두운 밤길을 달려와 강의해주시고..... 그동안 우리는 행복했고 즐거웠습니다.

또 이 논문을 쓰는데 제일 많은 도움을 주신 휴비스 강덕원박사님 그리고 조영수씨 감사해요 그 외 감사할 분들이 어찌 좁은 지면에 다 쓸 수 있겠습니까 만, 저는 참복이 많습니다. 항상 주위에서 저를 도와주고 아껴주고 사랑해주시는 분들이 너무 많습니다. 모든 분들에게 진심으로 제 마음을 담아 감사드립니다.

저는 앞으로 계속 나갈 생각입니다. 그동안 수만 가지 핑계로 게으름을 덮어버리고 살았는데 제 욕심인지 모르지만 앞으로 즐겁고 행복하게 인생을 살면서 공부도 열심히 해볼 생각입니다. 그래서 제가 그동안 머릿속에 담아두었던 지식과 생각들을 꼭 후배들에게 알려주고 싶습니다. 그러기 위해서는 저도 발전이 필요하다고 느끼고 있고 실천 하고자 합니다.

앞으로 지켜봐 주십시오. 그리고 많은 도움과 격려 부탁드립니다. 감사합니다.

2015년 6월 1일

성 기 흥

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20137500	과 정	석사
성 명	한글 : 성 기 홍 한문 : 成 基 洪 영문 : SEONG GI HONG				
주 소	광주광역시 북구 서강로 77 운암산아이파크 106동 1505호				
연락처	E-mail : ds4akf@hanmail.net				
논문제목	한빛원전 폐수지 제염공정 개발연구				
	Research and Development for Decontamination System of Spent Resin in Hanbit 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(0) 반대()

2015년 6월

저작자: 성 기 홍 (인)

조선대학교 총장 귀하