

국내원전 액체방사성폐기물계통 설계경험

이병식, 김길정

한국전력기술주식회사

요 약 문

The performance of the Radwaste System is measured in terms of generation of waste volumes, the release of radioactive materials to the environment and the occupational radiation exposure to workers. Based on our design and operating experience from PWR plants, various design goals for liquid radwaste system were developed to improve system performance. It has been making continuous effort to develop the advanced liquid radwaste processing technology for new PWR plants since 1998. The primary goal of this effort was to obtain better performance and to design a more economical liquid radwaste system. This paper describes lesson learned experience from design of the liquid radwaste system in Korea Nuclear Power Plants.

I. 개 요

국내원전이 1978년 상업운전을 시작한 이후로, 3개 부지에서 14기의 가압경수로형 원전이 운영되고 있으며, 2004년 - 2010년도에 상업운전을 목표로 6기의 원전이 추가 건설 중에 있다. 국내원전에는 다양한 액체방사성폐기물 처리기술이 적용되고 있으며, 이들 폐기물 처리기술들을 크게 구분하면 4개의 그룹으로 분류할 수 있다.

사회적 및 정치적으로 환경에 대한 관심이 점차적으로 증가하고 있으며, 이러한 추세는 관련 법, 규칙, 및 규제요건들에 반영되어 왔다. 또한, 향후 예상되는 물 부족현상으로 인한 발전용수 확보를 위해, 경제성 및 효율성 차원에서 처리된 액체방사성폐기물을 원자로설비에 재활용하는 방안을 검토하게 되었다. 이러한 여건의 변화는 액체방사성폐기물 처리기술 개선방안을 지속적으로 검토하게 된 계기가 되었으며, 그 검토결과를 반영하여 액체방사성폐기물 처리기술을 신규원전과 기존 원전 설비개선에 적용하여 왔다.

본 논문에서는 각 방식별 액체방사성폐기물 처리기술에 대한 설계개념 및 운전경험을 기술하고 액체방사성폐기물 처리기술 도입경험을 제시하며, 향후 폐기물처리 신기술 도입에 고려할 사항에 대해 기술한다.

II. 설계 및 운전특성에 따른 계통분류

운영중 또는 건설중인 원전의 액체방사성폐기물계통을 설계 및 운영특성에 따라 다음과 같이 4개의 그룹으로 분류할 수 있다.

그룹1 - 단일 증발설비

그룹1로 분류된 액체방사성폐기물계통은 국내 원전에 초기 도입된 설비로, 호기별 처리개념 및 단순 방출개념으로 설계되어 있다. 그룹 1에는 고리1호기, 고리2호기, 울진 1,2호기가 포함된다.

액체방사성폐기물은 처리방법에 따라 세탁 및 Hot shower 탱크, 바닥배수탱크 및 방사성폐액 수용탱크 등 3개의 탱크에 수집된다.

세탁 및 Hot Shower 탱크에 수집된 폐액은 단순 여과 처리되며, 바닥배수 폐액은 여과 및 탈염 처리공정을 거친다. 방사성폐액 수용탱크에 수집된 액체방사성폐기물은 증발설비에 의해 처리되며, 증발설비에서 처리된 증류수는 탈염처리 된다. 처리된 액체방사성폐기물은 방출전 감시탱크에 수집된다. 그룹1의 특징은 저용량의 단일 증발설비를 적용하고 있다는 것이다.

그룹1의 액체방사성폐기물계통은 정상 운전중 액체방사성폐기물 발생량을 기준으로 용량이 산정되어 있다. 다중성 개념이 적용되어 있지 않으므로, 운영중 단일 증발설비 고장으로 인한 방사성폐기물 처리 문제가 예상될 수 있다.

그룹2 - 이중 증발설비

그룹2의 계통구성은 그룹1과 유사하나, 그룹1에 비해 처리용량이 증가되었으며, 운전성 향상을 위해 다중성 개념으로 액체방사성폐기물계통이 설계되었다. 그룹2에는 고리 3,4호기, 영광 1,2호기, 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 등 8기의 원전이 해당된다.

액체방사성폐기물은 처리방법에 따라 3개 처리계열(고용존 고형물폐액, 저용존고형물 폐액, 및 화학폐액)로 구분된다. 제염폐액은 화학폐액 처리계열로 이송되어 여과 처리되며, 저용존고형물 폐액은 여과처리 및 탈염처리 된다. 고용존고형물 폐액은 수집된 후 30 gpm의 용량을 지닌 증발설비에서 처리되며, 증발설비에서 처리된 증류수는 탈염 처리된다. 모든 처리폐액은 감시탱크에 수집된 후, 바다로 방출 또는 발전소 재사용을 위해 재순환된다.

계통운전성 향상을 위해 예상운전과도상태를 수용할 수 있는 용량으로 설계되어 있고, 계통 신뢰성 향상을 위해 2개의 증발설비를 설치하고 있다. 그러나, 동 운전방식에서는 여과기 교체빈도 증가, 유입폐액에 동반되는 기름 및 부유고체로 인한 이온교환설비 및 증발설비의 기능 저하 등과 같은 문제점이 발생하고 있다.

그룹3 - 원심분리설비 및 선택성 이온교환설비

그룹3은 기계적 여과방식 및 증발설비 대신 원심분리설비 및 이온교환설비를 적용하여 폐액을 처리한다. 그룹3에는 영광 5,6호기와 울진 5,6호기가 포함된다.

이온교환설비 및 원심분리설비는 각각 미국 및 유럽 원전에서 검증된 설비이며, 동 설비에서 발생하는 폐수지 및 원심분리설비 슬러지 발생량은 그룹2의 증발설비 농축폐액 및 폐여과기 발생량에 비해 매우 적으므로 고체방사성폐기물 발생량 최소화가 가능하다. 또한, 증발설비를 제거함으로써 주요 보수항목이 제거되어 운전보수원의 방사선 피폭이 저감되고, 설비비용을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

그러나, 액체방사성폐기물계통은 전량방출개념으로 설계되어 있으며, 방사성물질 소외방출량이 그룹 2에 비해 증가하는 단점이 있다. 그룹3에서는 폐기물 처리량을 최소화하고 효율적인 폐액 처리가 가능하도록 분리수집 개념을 적용하고 있다.

그룹4 - 역삼투압설비

그룹4의 계통은 그룹3의 원심분리설비 대신 역삼투압설비를 적용하고 있다. 그룹3의 처리개념은 충분한 제염능력과 액체방사성폐기물계통 설계목표를 달성하고 있는 것으로 판단되나, 액체방사성폐기물계통 처리효율성 증대와 처리된 폐액의 재사용률 증대를 위해 역삼투압설비 및 이온교환설비를 적용하게 되었다.

역삼투압설비는 미국 원전에서 사용실적이 증가하는 추세이며, 그 실적도 우수한 것으로 확인되고 있다. 역삼투압설비를 적용하고 있는 미국 PWR원전 중 Surry 및 Wolf Creek 원전이 역삼투압설비를 운영하고 있다. 역삼투압설비 및 원심분리설비를 적용하여 설계중인 발전소는

신고리 1,2호기와 신월성 1,2호기이며, 향후 신규 건설되는 원전에도 적용할 예정이다.

액체방사성폐기물계통은 발전소 재사용을 고려하고 있으며, 그룹3에 적용되어 있는 분리수집개념을 반영하고 있다.

III. 성능

액체방사성폐기물계통의 성능인자로 일반적으로 방출방사능, 고체방사성폐기물발생량, 작업자 피폭선량을 고려하고 있으며, 각 성능인자에 대한 각 액체방사성폐기물 처리기술별 평가결과는 다음과 같다.

환경 방출방사능

액체 방출물에서의 연간 예상방출방사능은 PWR-GALE 코드에 의해 계산되며, NUREG-0017에 제시된 제염계수를 적용하였다. 여러 처리기술별 예상 설계방출방사능 및 2001년도 운영자료 기준으로 실제 방출실적은 다음 표와 같다.

표 1 액체방사성폐기물계통 예상 방출방사능 및 2001년도 방출실적

처리기술	예상 방출방사능	방출실적	비고
그룹1	7.2 Ci/yr	0.00053 Ci/yr	고리1,2기준
그룹2	0.52 Ci/yr	0.00037 Ci/yr	영광3,4기준
그룹3	0.64 Ci/yr	0.027Ci/yr	영광5,6기준
그룹4	0.57 Ci/yr	-	

GALE 입력 자료로 증발방식의 경우 90%의 처리수를 발전소 용수로 사용하는 것으로 적용하였으며, 기타 방식에서는 모든 처리폐액이 소외로 방출되는 것으로 가정하였다. 단, 역삼투압설비는 증발설비와 동일한 가정을 적용하였다.

폐기물발생량

증발설비, 원심분리설비/선택성 이온교환설비, 및 역삼투압/이온교환설비에 의한 고체방사성폐기물 발생량 비교결과를 표 2에 제시하였으며, 고체방사성폐기물발생량 비교시 사용된 가정사항은 다음과 같다.

- 증발 및 농축폐액 건조설비
연간 고체방사성폐기물드립 발생량은 농축폐액건조설비에 의한 운영 자료를 기준으로 하였다.
- 원심분리설비 및 선택성이온교환설비
미국 원자력발전소에서의 선택성이온교환설비 운영경험으로부터 처리량이 18,000 - 33,000 gallon/ft³ 이었다. 국내 운영경험을 토대로, 연간 약 2,500,000 gallon의 액체방사성폐기물을 처리하는 것으로 적용하였다.
- 역삼투압 및 이온교환설비
미국 원자력발전소에서 역삼투압설비에 의한 운영경험으로부터, 연간 고체방사성폐기물 발생량을 추정하였다.

표 2 액체방사성폐기물계통 운영에 따른 연간 고체방사성폐기물 발생량

처리방법	평균(cu-ft/yr)
증발설비	680
원심분리설비 / 선택성 이온교환설비	380
역삼투압설비 / 이온교환설비	285

따라서, R/O 및 이온교환설비를 적용할 경우에는 폐기물부피가 이전 방식에 비해 감소하게 될 것으로 예상된다.

작업자 피폭선량(ORE) 감소

원자력발전소 운영경험으로 원심분리설비 및 선택성 이온교환설비에 의한 ORE는 각각 1.12 mrem/yr 및 0.5mrem/yr 이다. 증발설비를 운영하고 있는 국내원전에서 ORE는 고화운전을 포함하여 약 7.5 mrem/yr 이었다. 반면, 역삼투압설비 및 이온교환설비에서의 ORE는 총 0.9 mrem/yr로 조사되었다.

IV. 신규 액체방사성폐기물처리설비 도입시 고려사항

신규 폐기물처리 설비 도입을 위해서는 Reg. Guide 1.110에 제시된 비용이득분석을 수행하여야 하며, 충분한 비용이득이 있음을 입증하여야 한다. 기존설비 대비 신규설비에 대한 기기구매 및 유지비용, 방사능의 환경 방출영향, 고체방사성폐기물발생량, 운전원 방사선피폭 등이 고려되므로 비용이득 분석결과는 종합적인 타당성을 검증하는 결과로 이용되고 있다.

이러한 비용이득분석을 기준으로 국내원전에 신규 액체방사성폐기물 처리개념을 도입하는 과정에서 각 관련 기관으로부터 다양한 의견이 제시되었으며, 환경 소외방출 방사능에 대한 의견이 가장 많은 편이었다.

신뢰성

신규 도입된 액체방사성폐기물 처리기술은 해외 운영경험이 있는 기술이었으며, 해외원전 운영경험과 계통 변경에 따른 비용이득분석을 토대로 그 도입여부를 결정하였다.

반면, 국내 원자력산업계에서는 실증실험 등과 같은 검증이 미확보 되었다는 점이 가장 큰 논의 대상이었으며, 실제 도입 후 운영결과가 해외 원전 운영결과와 다른 결과를 나타내는 경우가 일부 발생하고 있으므로 신뢰성에 이견을 제기하기도 하였다.

운영성

신규 도입설비에 대한 설계목표로 운전편이성 / 작업자 피폭선량이 포함되어 있다. 각 처리기술별 비료로부터 신규 도입되는 설비에서는 작업자 피폭선량 감소가 확인되고 있으며, 계통을 단순화하고, 대형설비를 자제하고, 보수 기기항목을 최소화하고 있다.

그러나, 신규 설비 도입으로 인해 기존 운전경험을 활용하지 못한다는 지적이 있으며, 운전원의 운영부담 증가를 우려하는 일부 의견이 있다.

환경방출방사능

액체방사성폐기물계통은 과기부 고시 2002-23호에 제시된 환경 방출허용기준치를 준수하도록 설계하고 있으며, 추가적으로 환경 방출방사능 최소화가 가능한 설비를 적용하는 것을 목표로 하고 있다.

국내원전은 최근 몇 년간 Zero Release를 목표로 운영하였고 그 결과 환경 방출방사능을 극소화할 수 있었으며, 소외 방출실적이 해외에 비해 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 반면, 미국발전소의 환경 방출방사능량이 국내원전에 비해 높은 유지되고 있었으며, 이는 폐기물처리비용 절감과 고체방사성폐기물 발생량 최소화를 목표로 운영한 결과로 국내원전과 미국 원전간의 액체방사성폐기물 처리개념에 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다.

환경에 대한 사회적 및 정치적 관심 증가에 따라, 국내원전에서는 환경 방출방사능에 민감하게 고려되고 있는 상태이며, 결과적으로 액체방사성폐기물계통에 대한 처리목표로 가장 큰 비중을 두는 의견이 많았다.

신규 액체방사성폐기물처리설비를 도입한 경험으로부터 처리기술에 대한 신뢰성 및 경제성을 판단하는 일관된 기준이 설정될 필요가 있음을 확인하게 되었으며, 다음 사항을 고려하여 처리기술 평가기준을 설정하여야 할 것이다.

1. 법적 방출허용기준치 대비 실제 방출허용기준?
2. 신규 도입되는 설비의 신뢰성을 확보하기 위한 방안은?
3. 신규 설비 도입시 설비 운영성 개선방안?
4. 관련 액체방사성폐기물계통 처리목표 수정 필요성?
5. 국내 표준 액체방사성폐기물 처리설비 설정이 필요한가?

V. 결 론

국내원전에 적용 가능한 방사성폐기물 처리기술들을 평가하여 왔고, 그 결과로 신규원전에 역삼투압설비 및 이온교환설비를 적용 중에 있다. 신규설비 도입과정 중 다양한 의견이 제시되었으며, 이는 궁극적으로 국내원전에 효율적이고 경제적인 방사성폐기물기술 도입에 관심이 집중되고 있다는 것을 의미한다.

국내 원자력산업계 의견 제시 및 조율을 통해 처리기술에 대한 신뢰성 및 경제성을 판단하는 일관된 기준이 설정되어야 하며, 향후 신규 처리기술 적용 평가에 효율적으로 활용되었으면 한다.

VI. 참고자료

- [1] B.S.Lee, K.J.Kim, Improvement of PWR Liquid Radwaste System in Korean Nuclear Power Plants, EPRI Int'l LLW Conference, 1995
- [2] B.S.Lee, H.G.Park, Y.H.shin, Application of Reverse Osmosis Technology to Liquid Radwaste Management at PWR Plants, the 16th KAIF-KNS Conference, 2001
- [3] T. Chandrasekaran, et.al., Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Pressurized Water Reactors(PWR-GALE Code), NUREG-0017 Rev.1, April 1985
- [4] Annual Summary Report of Radiation Management in 2001, KEPCO
- [5] J, Freeman, Wolf Creek Liquid Radwaste Processing System Improvements, EPRI LLW Conference 1998
- [6] Jack Torbitt, Nine Mile Point – Unit 1 Experience with Membrane Processing of Radwaste, EPRI International LLRW Conference 1997
- [7] J. Freeman, R.Werline, et. al., LRW Processing with Membranes, Tips, Tricks and Traps, EPRI LLW Conference 2000
- [8] Operating Experience for the Selective Ion Exchange System in US Nuclear Power Plant prepared by Diversified Technologies Service, 1996
- [9] A. Bilau and F. Ruter, Liquid Radwaste Processing History at Fort Calhoun Station, Omaha Public Power District Fort Calhoun Nuclear Station Unit 1, presented at WM'89
- [10] Chem-Nuclear's Thermax Operations at Surry Nuclear Power Plant, January, 1999