

원전해체 계통제염 공정 특성 분석

김학수*, 이두호, 김덕기

한수원(주)중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

*hskim0071@khnp.co.kr

1. 서론

일반적으로 제염이란 방사성물질로 오염된 각종 계통 및 구성품, 부지를 물리적·화학적 방법으로 제거하는 것을 말하며, 원자력발전소에서는 일차계통 주요설비와 배관, 펌프, 탱크류, 그리고 콘크리트 및 토양 등 방사성물질에 오염된 시설과 부지를 제염대상으로 한다. 특히 원자력발전소 해체 시 제염은 운영 중 제염과 다르게 모재의 손상도 일부 허용하면서 가능한 한 많은 양의 방사성 물질을 제거하여 해체작업 시 작업자 피폭저감을 목적으로 한다. 본 논문은 원전해체 작업전에 수행되는 계통제염 사례를 통하여 계통제염 공정별 주요 특성 및 운전결과에 대하여 살펴보았다.

2. 본론

2.1 계통제염 공정 및 적용 사례

경수로형 원전 일차계통내 주요 구조물 표면에 형성되는 산화막 층은 철, 니켈과 크롬 등의 금속 산화물로 구성되어 있다. 철과 니켈은 환원적 방법으로, 크롬은 산화적 방법으로 용해가 가능하다. 따라서 구조물 표면의 산화막 층을 효과적으로 제거하기 위해 계통제염에서는 산화 및 환원공정을 순차적으로 적용하는 것이 필요하다. 상용원전 해체과정에서 실제 적용된 대표적인 계통제염 공정으로는 CORD (Chemical Oxidation Reduction Decontamination, 프랑스)공정, DfD (Decontamination for Decommissioning, 미국)공정 및 ASDOC_D(Advanced System Decontamination by Oxidizing Chemistry, 독일)공정이 있다. CORD 공정은 과망간산을 활용한 산화공정과 옥살산을 활용한 환원/제염(용해) 공정 등으로 구성되며, DfD 공정은 과망간산칼륨과 옥살산을 기본으로 하고 불화붕산을 활용하여 모재 금속과 산화막 층을 효과적으로 제거하도록 고안되었다. ASDOC_D 공정 또한 과망간산과 옥살산을 기본으로 하나 pH 조절제로 황산을 사용한다. CORD 공정은 Connecticut Yankee(CY) NPP 및 Stade NPP(SD)에, DfD 공정은 Maine Yankee(MY)/Big

Rock Point(BRP) NPP 및 Jose Cabrera(JC) NPP)에 성공적으로 적용되었으며, ASDOC_D 공정은 Biblis A NPP(독일)의 Volume Control System에서 기술실증을 통해 Biblis A&B NPPs 계통제염에 적용하고 있다.

2.2 계통제염 공정별 특성 및 사례 분석

○ 계통제염 공정별 특성

AREVA사에서 개발한 CORD 공정은 4 단계별로 구별할 수 있으며 단계별 주요반응은 다음과 같다.

- 산화단계 : 산화제인 과망간산을 200ppm 정도 주입, 반응온도는 약 87.7°C, 과망간산에 의해 3가의 크롬이 6가의 크롬으로 산화
- 환원단계 : 잔존 과망간산과 화학양론적으로 동일한 양의 옥살산 주입, 7가의 망간이 4가의 망간으로 환원, 환원된 망간은 MnO₂ 형태로 침전
- 제염단계 : 과량의 옥살산 첨가, 마그네타이트를 환원분해, 2가 철이온과 킬레이트 화합물 형성, 계통수를 양이온교환수지를 통과시켜 방사성핵종과 금속이온 제거, 옥살산이 재생
- 분해/정화단계 : 잔류 옥살산은 과산화수소와 UV에 의해 CO₂와 H₂O로 분해제거

아래 Fig. 1은 CORD 공정의 기본원리를 보여주고 있다.

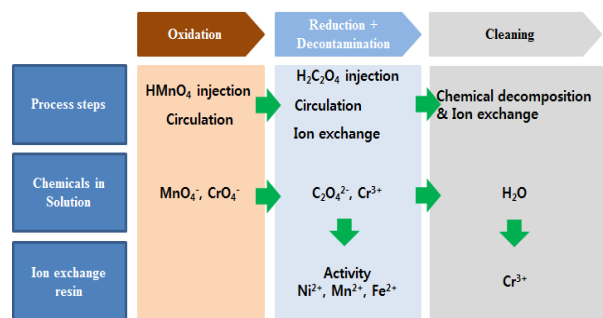


Fig. 1. Principal of CORD Process.

EPRI에서 개발한 DfD 공정은 3 단계로 구분할 수 있으며 각 공정별 주요 반응은 다음과 같다.

- 공정 전반에 걸쳐 pH 2를 유지할 수 있도록 불화붕산을 10 mM(0.0088%) 정도 첨가
- 산화단계 : 200 ppm 정도의 과망간산칼륨 주입,

반응온도는 약 93.3°C, MnO₂로 전환될 때까지 계속 순환, 이온교환수지 운전하지 않음

- 환원단계 : 잉여의 과망간산칼륨을 분해할 수 있을 만큼의 옥살산 주입, 양이온교환수지를 통과시켜 방사성핵종과 금속이온 제거

ASDOC_D 공정은 CORD공정과 유사하나 산화/환원제의 농도가 낮아 oxalic complex 침전이 거의 없고 CO₂ 발생량도 작다고 알려져 있다. Table 1은 계통제염공정별 주요 특성을 요약한 것이다.

Table 1. System Decontamination Process Comparison

Phase	CORD	DfD	ASDOC_D
Oxidation	200 ppm (HMnO ₄)	200 ppm (KMnO ₄)	50 ppm (HMnO ₄)
Reduction & Decon. (H ₂ C ₂ O ₄)	2,000 ppm	equivalent to the residual KMnO ₄	100 ppm
HBF ₄	-	10 mM	-
pH-adjustment	-	-	500 ppm

Table 2. Operation Conditions for System Decontamination

구분	발전소		
	MY NPP	CY NPP	JC NPP
적용공정	DfD	CORD	DfD
제염범위	RCS/PZR/CVCS/RHR (RV/SG제외)	RCS/PZR/CVCS/RHR (RV제외)	RCS/PZR/CVCS/RHR
순환유량 구동력	Vendor's Pump	RHR Pump	RCP
순환유량(gpm)	300/650	1,800	NA
정화용 탈염탑	Vendor's equip.	CVCS+SFP Bed	Vendor's equip.
정화유량(gpm)	250/350	140	NA
제염온도/압력	195±10°F/-	195±10°F/-	200°F/430psig
온도제어	Vendor's equip.	PZR Hx	RCP/RHR, RHR Hx
압력제어	-	-	PZR N ₂ Purge
RCP seal 보호	격리	격리	별도 증류수 공급
충전펌프	우회	우회	우회

○ 원전해체 계통제염 운전 결과

계통제염은 제염대상(범위), 순환 및 정화유량, 발전소 계통/장비 활용 등에 따라 다양한 운전조건에서 수행될 수 있으며 그 결과도 다양하다. Table 2는 CORD 공정을 적용한 Connecticut Yankee NPP와 DfD 공정을 적용한 Maine Yankee 및 Jose Cabrera NPP의 계통제염 운전방법을 보여주고 있으

며 Table 3에는 이러한 운전방법에 따른 계통제염의 결과를 보여주고 있다. Table 3에서 보듯이 원자로용기의 제염대상 포함여부에 따라 방사능제거량에 큰 차이를 보임을 알 수 있으며 DfD 공정이 CORD 공정보다 모재 금속에 대한 부식성이 큼을 알 수 있다.

Table 3. Results of System Decontamination Operation

발전소(공정)	MY NPP (DfD)	JC NPP (DfD)	CY NPP (CORD)
금속제거량(kg)	307	234	106
방사능제거량(Ci)	99	713.7	129
폐수지발생량(m ³)	15.1	13.1	13.2
제염계수(RCS)	8.7	7.8~50.23	17.6

3. 결론

원전해체에 실제 적용된 계통제염 공정의 특성과 운전결과를 조사하였다. 이러한 조사결과에서 알 수 있듯이 계통제염은 모재손상을 허용하여 높은 제염계수가 요구되지만 제염대상을 어디까지 할 것인가에 따라 폐기물 발생량이 증가하는 역효과가 발생할 수 있다. 따라서 국내 원전 해체시 계통제염 공정은 안전성(Risk), 효과성(High DF), 효율성(비용-이득), 폐기물 최소화 및 작업 용이성(작업자 피폭 최소화) 등을 고려하여 공정 전체의 최적화를 고민하여 선정해야 할 것이다.

4. 감사의 글

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No.2014510300310)

5. 참고문헌

- [1] EPRI, "Evaluation of the decontamination of the reactor coolant systems at Maine Yankee and Connecticut Yankee," TR-112092, Palo Alto, CA, (1999).
- [2] EPRI, "Jose Cabrera nuclear power plant full system chemical decontamination experience report," TR-1019230, Palo Alto, CA, (2009).
- [3] Andreas Loeb, "Chemical system decontamination at PWR power stations Biblis A and B by ASDOC_D process Technology," Waste Management Conference, (2013).
- [4] 이두호, "고리1호기 계통제염 기본요건 분석," 한수원중앙연구원, 2015.