

# Full System Chemical Decontamination Concept for Kori Unit 1 Decommissioning

## 고리1호기 해체시 전계통 화학제염 운전개념

Doo Ho Lee\*, Hyuk Chul Kwon, and Deok Ki Kim

*KHNP Central Research Institute, 70, Yuseong-daero 1312beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

이두호\*, 권혁철, 김덕기

*한수원중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70*

(Received February 10, 2016 / Revised March 14, 2016 / Approved March 29, 2016)

---

Kori Unit 1, the first PWR (Pressurized Water Reactor) plant in Korea, began its commercial operation in 1978 and will permanently shut down on June 18, 2017. After moving the spent fuels to SFP (Spent Fuel Pool) system, Kori Unit 1 will perform a full system chemical decontamination to reduce radiation levels inside the various plant systems. This paper will describe the operation concept of the full system chemical decontamination for Kori Unit 1 based on experiences overseas.

Keywords: Kori Unit 1, Full system chemical decontamination, Radiation level

---

\*Corresponding Author.

Doo Ho Lee, KHNP Central Research Institute, E-mail: dooho.lee@khnp.co.kr, Tel: +82-42-870-5735

### ORCID

Doo Ho Lee <http://orcid.org/0000-0002-8951-9655>

Hyuk Chul Kwon <http://orcid.org/0000-0001-7224-4088>

Deok Ki Kim <http://orcid.org/0000-0003-4506-5767>

국내 최초로 건설된 가압경수로형 발전소인 고리1호기는 1978년 4월 첫 상업운전을 개시하였고, 2017년 6월 18일 영구정지될 계획이다. 고리1호기에서는 사용후핵연료가 사용후핵연료저장조로 모두 이송된 이후, 계통 표면의 선량을 감소시키기 위한 목적으로 전계통 제염을 실시할 계획이다. 이 논문에서는 해외 원전의 계통제염 사례분석을 통해 국내 최초로 시행될 예정인 고리1호기의 계통제염 운전개념을 기술하고자 하였다.

중심단어: 고리1호기, 전계통 화학제염, 선량을

## 1. 서론

고리1호기는 국내에 건설된 첫 번째 가압경수로형(PWR: Pressurized Water Reactor) 상용원전으로서, 1977년 6월 19일 첫 임계에 도달하였고, 1978년 4월 29일 첫 상업운전을 개시하였다. 2007년 6월 18일을 기준으로 30년의 설계 수명이 만료되었으나, 2007년 12월 11일 10년 연장운전에 대한 운영허가를 재취득하여 2014년 말 기준 누적 발전량 45.4억 kWh를 기록하는 운영성과를 거두었다. 10년 계속운전에 대한 운영허가 재신청을 준비 중이던 2015년 6월 16일, 2차 계속운전에 대한 운영허가 변경을 신청하지 않기로 최종

결정함에 따라 고리1호기는 공식적인 해체 준비작업에 착수하게 되었다.

고리1호기는 원자로가 영구정지되고, 사용후핵연료를 원자로압력용기에서 사용후핵연료저장조로 이송한 이후 원자로냉각재계통에 대해 화학적 제염법을 활용한 계통제염을 우선 실시할 계획이다. 계통제염은 발전소 단위설비를 운전하여 원자로냉각재계통의 오염 산화막과 기저금속 일부를 화학약품으로 제거하는 운전방식으로서, 계통제염의 성공적인 수행을 위해서는 최적의 화학공정을 선정하는 것 못지않게 계통제염 운전전략을 수립하는 것 역시 중요한 요소로 작용한다. 본 논문에서는 해외 원전의 계통제염 사례분석을

Table 1. Summary of International Full System Decontaminations

Process	Plant		
	Maine Yankee[1]	Connecticut Yankee[1]	Jose Cabrera[2]
	DfD	CORD	DfD
Decon. Scope	RCS/PZR/CVCS/RHR(RV/SG bypass)	RCS/PZR/CVCS/RHR(RV bypass)	RCS/PZR/CVCS/RHR
Driving Force	Vendor's pump	RHR Pump	RCP
Flow Rate (gpm)	300/650	1,800	NA <sup>1)</sup>
Cleanup Bed	Vendor's Equip.	CVCS+SFP Bed	Vendor's Equip.
Cleanup Rate (gpm)	250/350	140	NA <sup>1)</sup>
Temp./Pressure	195±10°F / -	195±10°F / -	200°F / 430psig
Temp. Control	Vendor's Equip.	PZR Heater	RCP/RHR, RHR Hx
Pressure Control	-	-	PZR N2 Purge
RCP Seal Protection	Isolation	Isolation	DI Water Injection
Charging Pump	Bypass	Bypass	In-Service

<sup>1)</sup> NA : Not Available

통해 국내에서 최초로 시행될 예정인 고리1호기의 계통제염 운전개념을 발전소 운전의 관점에서 도출하고자 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 해외사례 분석

고리1호기를 비롯한 경수로형 원전의 구조재료 표면에 형성되는 산화막 층은 철, 니켈과 크롬 등의 금속산화물로 구성되어 있다. 발전소 구조재료 표면의 산화막 층을 효과적으로 제거하기 위해서는 산화제와 환원제를 순차적으로 적용하는 것이 필요하다. 현재까지 상용원전의 해체제염에 활용된 제염방법은 크게 두 가지로 구분되는데, 하나는 AREVA사가 개발한 CORD(Chemical Oxidation Reduction Decontamination) 공정이고, 다른 하나는 EPRI가 개발한 DfD(Decontamination for Decommissioning) 공정이다.

Table 1에는 상용원전 해체를 위한 계통제염이 시행된 미국의 Maine Yankee 발전소와 Connecticut Yankee 발전소, 그리고 스페인의 Jose Cabrera 발전소의 계통제염 수행 방법을 간략히 요약하였다. Maine Yankee 발전소의 계통제염 대상계통은 원자로냉각재계통과 잔열제거계통(RHRS : Residual Heat Removal System), 화학 및 체적제어계통(CVCS : Chemical and Volume Control System)이었으며, 원자로압력용기와 증기발생기는 제염유로에서 제외되었다. 동 발전소에서는 제염제와 계통수의 순환력을 제염사가 공급한 펌프에만 의존하다 보니 제공유량(300~650 gpm) 부족으로 인해 제염유로를 다단계로 구성할 수밖에 없는 한계를 보였다. 반면 Connecticut Yankee 발전소의 경우 제염제 및 계통수 순환운전을 발전소 잔열제거펌프(2,000 gpm)를 활용하였고, 이로 인해 단일유로에 의한 제염운전이 가능해져서 Maine Yankee 발전소에 비해 제염운전이 단순화된 장점을 얻을 수 있었다. 두 원전 모두 원자로압력용기를 제염유로에서 배제하기 위하여 Fig.1과 같은 노즐뿔을 원자로압력용기에 설치한 바 있다. 스페인의 Jose Cabrera 발전소의 경우 원자로냉각재펌프를 활용하여 제염유로를 구성하였고, Maine Yankee 발전소나 Connecticut Yankee 발전소와는 달리 원자로압력용기와 증기발생기까지 제염유로에 모두 포함하여 운전하였다. Jose Cabrera 발전소에서는

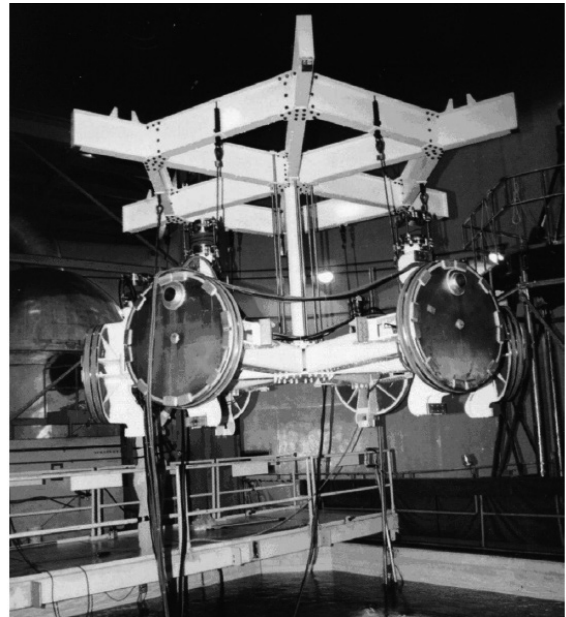


Fig. 1. Maine Yankee Nozzle Dam Spider Assembly [1].

원자로냉각재펌프 운전이 필요한 최소한의 유효흡입수두(약 430 psig)를 제공하기 위해 가압기에 질소를 가압하였고, 또한 원자로냉각재펌프 Seal을 보호할 목적으로 순수를 밀봉수 주입배관을 통해 별도 공급할 수 있도록 설계변경하였다. 그리고, 원자로냉각재펌프의 활용으로 인하여 원자로 저온관의 주분무 배관을 통한 제염제 및 순환유량을 가압기로 충분히 제공할 수 있게 됨에 따라 가압기 역시 효과적으로 제염유로에 포함할 수 있었다.

Fig. 2에는 Connecticut Yankee 발전소와 Jose Cabrera 발전소의 계통제염 운전시의 금속 및 핵종 제거량과 이를 토대로 계산한 비방사능(mCi/g) 농도를 보여주고 있다. 먼저 Connecticut Yankee 발전소의 사례를 보면 제염운전 첫 주기의 비방사능 값이 두 번째 제염운전 주기의 비방사능 값에 비해 높다는 점을 확인할 수 있다. 이는 제염운전 초반에는 주로 산화막이 제거되고, 이후 주기에는 모재 금속의 제거에 의한 제염이 이루어졌던 것으로 판단할 수 있다. 한편, Jose Cabrera 발전소의 비방사능 값은 Connecticut 발전소의 비방사능 값에 비해 훨씬 높게 나타난다. 이는 Jose Cabrera 발전소의 제염유로에는 상대적으로 방사화가 많이 된 원자로압력용기가 포함되어 있었기 때문에 나타난 현상으로 풀이될 수 있다. Jose Cabrera 발전소의 적용결과에서

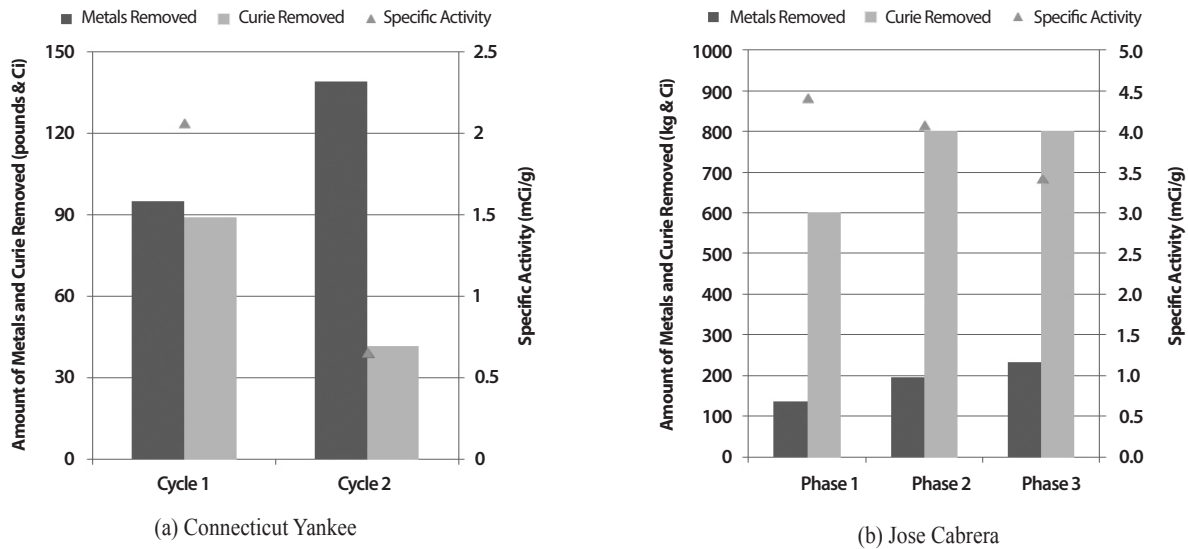


Fig. 2. Amount of Metals and Activity Removal.

특기할만한 또 한가지 사항은 Phase 2와 Phase 3가 원자로냉각재계가 아닌 화학 및 체적제어계통과 잔열제거계통 등의 보조계통에 대해서만 실시되었음에도 불구하고 비방사능 값은 여전히 높게 나타난다는 점이다. 이는 원자로압력용기가 제염유로에 포함되어 있던 Phase 1 운전 시 정화유량이 불충분하다보니 순환유량이 낮아지는 보조계통에서 방사성 핵종의 침적현상이 나타났었기 때문으로 풀이될 수 있으며, 충분한 정화유량의 확보가 계통제염의 성공적 수행을 위한 필수요소임을 암시한다고 할 수 있다.

## 2.2 고리1호기 계통제염 수행전략

해외사례 분석을 통해 제염운전 시의 발전소 설비 활용여부에 따라 매우 다양한 양상으로 계통제염 운전이 수행될 수 있음을 확인하였다. 이러한 해외사례 분석결과를 토대로 고리1호기의 계통제염 운전개념을 도출하면 다음과 같다.

### 2.2.1 계통제염 대상계통 선정

고리1호기 계통제염 운전개념을 수립함에 있어 가장 먼저 결정해야 하는 요소는 제염 대상계통을 선정하는 일이다. 본 논문에서는 대용량설비의 제염유로 포함 시의 문제점에도 불구하고[3], 원자로압력용기 절단시의 용이성 확보 등을

고려하여 우선적으로 원자로압력용기와 증기발생기, 가압기 등을 포함한 원자로냉각재계통 전체와 화학 및 체적제어계통, 잔열제거계통이 제염 대상계통에 포함되는 것으로 가정하였다. 하지만 고리1호기 발전소 현장여건에 따라 일부 설비의 활용이 불가능한 경우에는 계통제염 대상계통과 제염유로를 재선정할 계획이다.

### 2.2.2 순환유량 제공방안

제염 대상계통이 선정되면 다음으로 결정해야 하는 요소는 제염제와 계통수의 순환유량 제공방안이다. 앞선 해외사례에서 살펴보았듯이 Maine Yankee 발전소의 경우처럼 제염사가 공급하는 펌프를 이용하는 방안보다는 Connecticut Yankee 발전소나 Jose Cabrera 발전소의 경우처럼 발전소 잔열제거펌프나 원자로냉각재펌프를 활용하는 방안이 선호된다. 이는 제염사가 공급하는 펌프로는 순환유량 제공에 한계가 있어서 단일유로 구성에 의한 제염운전이 사실상 불가능하기 때문이며, 따라서 고리1호기에서도 발전소 펌프를 활용할 수 없는 경우에만 차선책으로 고려 가능한 대안으로 설정하였다. 그러므로 고리1호기 제염운전 시에는 원자로냉각재펌프나 잔열제거펌프를 활용하는 방안을 순환유량 제공방안으로 고려하였다.

먼저, 고리1호기의 원자로냉각재펌프(~89,000 gpm)가 제염운전에 활용되면 모든 제염 대상유로에 충분한 유량과

난류를 제공할 수 있는 장점을 지니므로 원자로압력용기와 증기발생기까지 제염 대상유로에 포함시켜도 제염제의 불충분한 혼합으로 인한 제염효과 저하의 문제는 발생하지 않을 것으로 예상된다. 다만 원자로냉각재펌프가 정상 운전되기 위해서는 CVCS 충전계통을 운전하여 밀봉수의 주입 및 회수운전을 수행하여야만 한다. 하지만 제염운전 기간 동안에는 산화제의 반응에 의한  $MnO_2$  형성으로 계통수의 입자성 부유물 함량이 높을 것으로 예상되므로 계통수 자체를 밀봉수 주입용으로는 활용하지 못할 것으로 판단된다. 따라서 스페인의 Jose Cabrera 발전소의 경우처럼 밀봉수 주입배관을 별도 설치하여 순수를 밀봉수 주입용으로 활용하는 것이 필요하다. 일단,  $MnO_2$  등이 주로 생성되는 산화공정 시에만 순수를 주입한다고 가정하면 고리1호기의 경우 48,000~72,000 갤런의 순수가 밀봉수로 소요될 것으로 계산되며, 이 경우 고리1호기의 85,000 갤런 용량의 PMWST(Primary Makeup Water Storage Tank)를 순수 공급용 탱크로 활용하면 될 것으로 판단된다.

이 외에도 원자로냉각재펌프를 운전하려면 고리1호기의 경우 최소 370~427 psig로 계통을 가압해야 한다. 통상적으로 원자로냉각재계통은 가압기 상부에 기포를 생성시켜 가압하지만, 가압기 히터가 사용되면 가압기의 온도가 크게 증가하게 된다. 가압기의 온도가 증가되면 유기산의 분해에 의해 제염제가 과다 소모되는 부작용이 예상되며, 무엇보다도 가압기 분무량을 연속적으로 제공하지 못해 가압기가 제염유로에서 배제되는 결과를 가져온다. 따라서 가압기 상부에 기포를 형성시키는 방안보다는 가압기 기상부 공간에 질소를 공급하여 원자로냉각재계통을 가압시키는 방안을 고려할 예정이며, 여기에 소요되는 질소의 공급량 및 공급 방법에 대해서는 보다 상세한 엔지니어링 평가를 수행할 계획이다.

반면, 제염운전시 잔열제거펌프를 순환유량 제공에 활용되는 경우의 원자로냉각재계통 주요배관과 증기발생기에서의 유속과 레이놀즈수를 Table 2에 나타내었다. 표에서처럼 원자로냉각재계통 주요배관에서의 유속은 비록 느리지만 배관내 난류의 형성으로 인해 제염약품 혼합은 원활하여 배관 표면의 제염효과 측면에서는 별다른 문제가 없을 것으로 평가되었다. 하지만 증기발생기로 향하는 유로에는 불충분한 유량이 제공되므로 증기발생기에서의 유속이 약 0.05 ft/s로 매우 느린데다가 레이놀즈 수 865의 층류가 형성되어 효과적인 제염운전이 어려울 것으로 판단된다[4]. 이는 핵연료

Table 2. Flow Rate and Reynolds Number in case of RHR pump operation

	Flow Rate (ft/s)	Reynolds No.
Cold Leg	0.151	102,982
Hot Leg	0.136	97,656
Crossover Leg	0.119	90,355
Steam Generator	0.052	865

집합체가 노내에서 인출된 이후 제염운전이 시행되므로 원자로압력용기에서의 수두 손실량이 최소화되어 잔열제거펌프로 제공된 대부분의 유량(약 80%)이 원자로압력용기를 순환하는 유로 방향으로 공급되기 때문이다. 따라서 고리1호기 계통제염 운전시 잔열제거펌프를 순환유량 제공을 위한 주 펌프로 활용하는 경우에는 증기발생기 또는 원자로압력용기를 제염유로에서 배제하는 방안을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

이상 살펴보았듯이, 원자로압력용기와 증기발생기를 포함한 전계통 제염을 위해서는 원자로냉각재펌프의 운전이 필수적인 요소이며, 잔열제거펌프만을 운전하는 경우에는 원자로압력용기 또는 증기발생기를 제염유로에서 배제하는 방안을 고려할 필요가 있을 것으로 보인다. 향후에는 원자로냉각재펌프 운전시의 압력 및 온도 제어방안을 수립할 예정이며, 고리1호기 현장상황에 따라 원자로냉각재펌프 운전이 불가한 경우를 대비하여 잔열제거펌프 운전 시의 제염유로와 온도 제어방안도 함께 수립할 예정이다.

### 2.2.3 계통제염장치 구성

Table 3에는 Maine Yankee 발전소와 Connecticut Yankee 발전소, Jose Cabrera 발전소에서 활용된 제염장치(제염사 공급품) 구성현황을 요약하였다. 이 표에서 알 수 있듯이 제염제 주입설비는 공통적으로 별도 제작이 필요한 사항이라는 점을 알 수 있다. 고리1호기 역시 CVCS 충전계통에 설치된 화학약품 주입탱크의 용량이 5 갤런에 불과하다는 점을 감안한다면 제염제 주입설비는 별도 제작이 필요할 것으로 판단된다.

이온교환수지탑의 경우 Maine Yankee 발전소와 Jose Cabrera 발전소는 제염사에서 별도 제작한 설비를, Connecticut Yankee 발전소는 기존 발전소 설비를 활용하였다.

Table 3. Comparison of Decontamination Processing System

	Equipment	Tie-in Location
Maine Yankee	Vendor-Supplied Pump Heater Ion Exchanger Beds Temporary Shielding Chemical Injection System	SG(#2) Manway Bypass Line
Connecticut Yankee	600 kW Heater UV Burner(3 Sets) Chemical Injection System	RHR Outlet
Jose Cabrera	Ion Exchanger Beds(30 ft <sup>3</sup> × 4) Temporary Shielding(150 gals × 12) Chemical Injection System(300 gals)	CVCS Charging Pump Suction

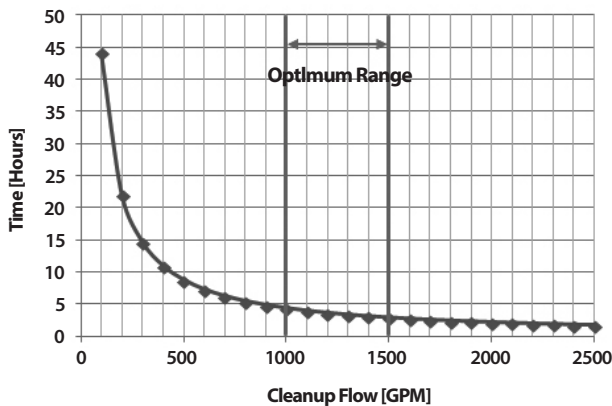


Fig. 3. Optimum Cleanup Rate for Kori 1 Full System Decontamination.

이처럼 발전소의 이온교환수지탑을 그대로 활용하는 경우 별도의 차폐설비가 필요치 않고, 수지 교체시에도 기존 발전소의 교체 절차를 그대로 준용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 계통제염 운전시의 수지 소모량을 감안한다면 빈번한 수지 교체운전이 필요할 것으로 보이며, 또한 수지 교체가 요구되는 시점에서 발전소 설비를 활용할 시에는 신속한 대응이 어려우므로 제염공정의 최적화라는 관점에서는 바람직하지 않은 상황이 발생할 수도 있다. 반면, 이온교환수지탑을 별도 제작하는 경우 제염 작업자의 피폭 방지를 위한 별도 차폐벽 설치 등 부수적인 설비가 필요할 것으로 보이나 수지탑이 포화되어 수지 교체가 요구되는 시점에서는

신속한 대응이 가능하다는 장점이 있을 것으로 판단된다.

이러한 장단점과는 별개로 이온교환수지탑의 별도 제작 또는 기존 발전소 설비의 활용 여부를 결정할 때 무엇보다도 중요한 사항은 바로 정화유량이라고 판단된다. Maine Yankee 발전소의 경우 비록 제염사가 공급하는 펌프를 제염운전에 활용하였지만 Connecticut Yankee 발전소나 Jose Cabrera 발전소에 비해서는 높은 정화유량을 확보할 수 있었던 것은 기존 발전소에 설치된 이온교환수지탑을 활용하지 않았기 때문으로 판단된다. 기존 발전소의 이온교환수지탑에 연결된 CVCS 유출 배관을 통해 공급받을 수 있는 최대 정화유량은 통상적으로 120 gpm 내외이며, Connecticut Yankee 발전소의 경우에도 비록 정화유량 증가를 위해 부스터 펌프를 설치하였더라도 최대 정화유량은 140 gpm 정도에 불과하였다[1]. 정화유량이 적은 경우 정화반감기가 길어지며, 유속이 느려지는 보조계통 등에서 입자성 핵종 또는 금속 원소의 침전이 발생하여 hot spot이 형성될 가능성이 있으며 이는 Jose Cabrera 경험에서도 확인된 바 있다. 따라서 고리1호기의 경우 이온교환수지탑을 별도 제작하여 활용하는 방안이 바람직할 것으로 판단된다. 고리1호기 제염유로의 총 체적을 7,700 ft<sup>3</sup>으로 가정했을 때 제염공정의 최적화를 위해 요구되는 정화유량은 대략 1,000~1,500 gpm이며, 이 범위의 정화유량에서는 제염공정 1주기 운전시에 용출된 핵종 또는 금속 원소를 5시간 이내에 99% 제거할 수 있게 된다(Fig. 3 참조) [4]. 물론 정화유량이 제시한 값보다 커도 무방하겠지만

설비 치수 등이 증가할 것이므로 적정선을 유지하는 것이 좋을 것으로 보인다. 이온교환수지탑을 별도 제작하여 제염 유로에 연결하는 경우 1,000~1,500 gpm의 유량을 제공할 수 있는 지점은 잔열제거펌프 후단일 것으로 판단된다. 참고로, 고리1호기 잔열제거펌프가 제공할 수 있는 유량은 최대 2,000 gpm 수준이다. 향후 고리1호기 O/H시 발전소 현장실사를 통해 계통제염장치가 설치될 배관 위치와 설치 지점을 확정할 예정이다.

### 3. 결론 및 고찰

본 논문에서는 상용원전의 해체를 위한 계통제염이 시행된 해외원전 사례분석을 통해 도출한 고리1호기 계통제염 운전개념을 정리하였다. 고리1호기는 원자로압력용기와 증기발생기, 가압기를 포함한 전계통 제염을 시행한다는 가정 하에 원자로냉각재펌프를 활용하는 방안을 우선 고려할 계획이다. 원자로냉각재펌프의 운전을 위해서는 일정 수준 이상 압력을 가해줄 필요가 있을 것으로 보이며, 이를 위해 가압기 기상부 공간에 질소를 충전할 예정이다. 또한 원자로냉각재펌프 Seal 열화를 최소화하기 위한 별도의 순수 공급도 필요할 것으로 판단된다. 한수원중앙연구원에서는 가압기 기상부 공간에 대한 질소 공급량과 공급방법, 원자로냉각재펌프 Seal 보호를 위한 순수 공급량과 공급방법에 대한 구체적인 방안을 2016년까지 확정하고, 2017년부터는 이에 대한 상세설계를 수행할 예정이다.

한편, 고리1호기의 경우 계통제염 운전 시의 충분한 정화유량 확보를 위해 잔열제거펌프 후단 배관에 계통제염장치를 연결할 계획이다. 아직 제염약품 탱크 용량, 이온교환수지탑 용량 및 유기폐액 처리방안 등이 확정되지는 않았지만 계통제염장치와 발전소 계통과의 연결지점, 설치위치 등은 2016년 고리1호기 O/H시의 현장실사를 통해 우선 결정할 예정이다.

### 감사의 글

이 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.20141510300310).

### REFERENCES

- [1] T.A. Beaman and J.L. Smee, Evaluation of the Decontamination of the Reactor Coolant Systems at Maine Yankee and Connecticut Yankee, EPRI Report, 23-71, TR-112092 (1999).
- [2] R. McGrath, Jose Cabrera Nuclear Power Plant Full System Chemical Decontamination Experience Report, EPRI Report, 21-43, TR-1019230 (2009).
- [3] G.Y. Park and C.L. Kim, "Chemical Decontamination Design for NPP Decommissioning and Considerations on its Methodology", Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology, 13(3), 187-199 (2015).
- [4] D.H. Lee, "Analysis of Basic Requirements for Kori-1 Full System Decontamination", KHNP-CRI Report, 26-38, 2015-50003339-0488TC (2015).