

## Study on the Decontamination of Primary Cooling Pump in HANARO

### 하나로 1차 냉각펌프 제염에 대한 고찰

Jung-Sug An, Kyung-HO Lee, Kwang-Dug Kim, and Young-Chul Park\*

Decon Engineering Co., Ltd., Venture Center 213, Ajou Univ., Woncheon-Dong, Yeongtong-Gu,  
Suwon-Si, Gyeonggi-Do, Korea

Korea Atomic Energy Research Institute\*, 150 Duckjin-Dong, Yusung-Gu, Daejeon

안정석, 이경호, 김광득, 박용철\*

(주)데콘엔지니어링, 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5번지 아주대학교 산학협력원 213호  
한국원자력연구소\*, 대전시 유성구 덕진동 150번지

[nirvanabuda77@hotmail.com](mailto:nirvanabuda77@hotmail.com)

#### Abstract

The HANARO, a multi-purpose research reactor of 30 MWth open-tank-in-pool type, has been under normal operation since its initial criticality in February, 1995. Recently, ten years after the initial operation of the HANARO, one of the two primary cooling pumps was decontaminated for overhaul maintenance in 2004. Before decontamination exposure dose rate and surface contamination level of primary cooling pump measured at 4 points. After final decontamination exposure dose rate and surface contamination level of primary cooling pump remeasured by same method done before. It is easy to decontaminate the out side exposed surfaces of the pump, but it is difficult to approach the inside surface due to double volute installed in the casing. Therefore, a new decontamination facility has been developed to solve this problem. A concentrated de-contaminant (DX-300) is rotated in the closed pump casing by the impeller actuated by a temporary motor. Nuclide particles are removed by the emulsification effect of the de-contaminant and the surface contaminants are chemically removed from the pump by the corrosion and dissolution effect. The inside surfaces of the primary cooling pump have been decontaminated by using the facility. As results, the contamination level of the inside surfaces was maintained below the surface contamination limit.

**Key word:** Chemical Decontamination, Primary Cooling Pump, DX-300, Sodium hydroxide, Sodium Gluconate

#### 요 약

30 MW의 연구용 원자로인 하나로는 1995년 2월 초임계에 도달한 이후, 정상적으로 가동하고 있다. 가동 후 약 10년이 경과하여 1차 냉각펌프를 분해 점검하기 위해 펌프에 대한 화학제염이 2004년에 수행되었다. 제염을 수행하기 이전에 4개의 point를 설정하여 방사선량을 및 표면오염도를 측정하였고, 최종제염이 수행된 이후 같은 point에 대하여 방사선량을 및 표면오염도를 재측정하였다. 펌프 외부는 노출되어 있어 쉽게 제염할 수 있으나 케이싱 내부에는 2중 볼류트가 있어 접근이 용이하지 않았다. 이를 제염하기 위하여 제염장치를 개발하였다. 이 장치는 일정 농도의

제염제 (DX-300)를 케이싱 내부에 담아 밀폐시킨 후 펌프의 임펠러를 저속으로 회전함으로써 제염제가 순환된다. 제염제의 유화작용에 의해 표면의 입자성 방사선 물질이 이완되고, 화학 작용에 의해 부식력과 용해성으로 표면 오염이 제거된다. 이 장치를 이용하여 하나로 1차 냉각펌프의 케이싱 내부를 제염하였다. 그 결과 1차 냉각펌프의 케이싱 내부는 반출허용표면오염도 이하로 낮출 수 있어 성공적으로 제염할 수 있었다.

중심단어: 화학제염, 1차 냉각펌프, DX-300, 수산화나트륨, 글루콘산 나트륨

## 1. 서 론

대부분의 금속폐기물은 원자력시설 해체시 발생되며, 금속폐기물 재활용을 위한 화학제염기술은 크게 해체전 계통제염기술 및 해체 후 제염 기술로 나눌 수 있다. 사용되는 화학제로는 강산, 염, 착화제 및 유기용매에 이르기 까지 매우 다양하다[1]. 원자력시설의 제염은 작업자의 피폭량이 높은 BWR 형 원전에서 시작되었으며 BWR원전의 수화조건에서 형성된 크러드의 조성은 철산화물이 주성분으로서 이를 용해하기 위한 유기산 제염법(CAN-DECON, CORD, CITROX 및 LOMI)을 발전시켰다. 그러나 이들 제염방법에 의해서는 수소가압 환원분위기의 PWR원전 수화조건하에서 형성된 크러드층은 다량의 크롬이 함유되어 있어 제거가 용이하지 않을 뿐 아니라 높은 제염효과를 기대하기도 어려운데 이는 크롬산화물인 불용성  $Cr_2O_3$ 는 강한 산화제( $KMnO_4$ ,  $K_2Cr_2O_7$ )에 의해서만 용해성인 Chrom IV로 변하며, 철산화물은 유기산에 의한 착화합물 생성으로 보다 용이하게 제거되기 때문이다.

또한 강산화제와 유기산은 서로 양립할 수 없기 때문에 불행히도 PWR의 제염공정에서는 별개의 공정으로 처리되어야 한다. 대표적인 화학제염법인 CAN-DECON, CAN-DEREM, OZAX-A, CITROX, LOMI 등의 공정은 철과 니켈을 주로 함유한 산화침전물의 경우에 효율적으로 작용하지만 제염대상 기기의 오염층 산화물이 Chromium Oxide( $Cr_2O_3$ )나 Iron Chromite( $FeCr_2O_4$ )와 같은 혼합된 Spinel의 형태로 많은 량의 크롬을 함유하고 있다면 이 산화물들을 잘 용해시키지 못한다. Chromium(III) Oxide는 유기산을 사용하는 CAN-DEREM과 CITROX 공정에 사용되는 약한 유기산에서 간단한 산분해에 의해서는 용해되지 않으며 LOMI 공정의 환원분위기에서도 잘 용해되지 않는다. 크롬의 비가 10%이상 이 되면 산화막이 안정되어 이 공정들에 의해서 용해되지 않는다[2].

그러나 Chromium(III) Oxide는 강한 산화제에 의해 쉽게 산화되어 용해도가 높은 이온성  $CrO_4^{2-}$  또는  $HCrO_4^-$ 가 된다. PWR에서 볼 수 있는 산화막은 주로 크롬의 함량이 높은 침전물이고 특히 몇주기동안 수소분위기에서 운전되기 때문에 화학적으로 산화공정이 필요하다. 일반적으로 사용되는 화학제염법은  $MnO_4^-$ 를 이용하는 것으로 첨가된 수산화나트륨, 질산 등의 pH 조절제 첨가에 따라서 Alkaline Permanganate(AP), Nitric Permanganate(NP), Permanganic Acid의 세가지로 구분된다.

전세계에는 많은 원자로가 있으며, 그 사용목적은 에너지 이용, 중성자 이용, 플루토늄 생산으로 크게 나눌 수 있다. 연구용 원자로는 원자로에서 발생하는 중성자를 이용하여 여러 가지 연구를 수행하는 원자로이며, 이러한 원자로를 개발하는 단계에서 시험적으로 짓는 원자로도 연구용원자로라고 하는 경우가 있으나, 일반적 연구용 원자로와는 완전히 다른 것이다. 동력용 원자로 높은 에너지효율로 인해 전세계적으로 발전시설로서 사용되고 있으며 동력로에 비해 소형이지만 다방면에 걸친 원자력 이용의 기초가 된다. 30 MW의 연구용 원자로인 하나로는 상향 강제 순환식으로 경수와 중수를 사용하는 원자로이며, 중성자를 이용한 연구를 수행할 수 있도록 설계되고 건설된 다목적 연구용 원자로이다. 또한 1995년 2월에 최초 핵연료를 장전하여, 첫 임계에 도달하였고, 1996년 1월부터 출력운전에 들어가 현재까지 운전 중에 있다.

가동 후 약 10년이 경과하여 1차 냉각펌프를 분해 점검하기 위해 펌프를 제염하였다. 펌프 외부는 노출되어 있어 쉽게 제염할 수 있으나 케이싱 내부에는 2중 볼류트가 있어 접근이 용이하지 않았다. 이를 제염하기 위해서 제염장치를 개발하였다.

이 장치는 일정 농도의 제염제 (DX-300)를 케이싱 내부에 담아 밀폐시킨 후 펌프의 임펠러를 저속으로 회전시킴으로써 제염제가 순환된다. 제염제의 유화작용에 의해 표면의 입자성 방사성 물질이 이완되고, 부식력과 용해성에 의해 화학적으로 반응하여 표면오염이 제거된다.

이 장치를 이용하여 하나로 1차 냉각펌프의 케이싱 내부를 제염하였으며, 제염 전과 후에 대해 스메어 방식으로 표면 오염상태를 수거하여 핵종분석을 하여 제염상태를 점검하였다.

본 문에서는 하나로 1차 냉각펌프의 표면오염상태, 제염제, 제염장치, 제염 결과 및 분석 그리고 결론 순서로 실제 제염과정에 대해 기술하였다.

## 2. 본 론

### 가. 하나로 1차 냉각펌프의 표면오염상태

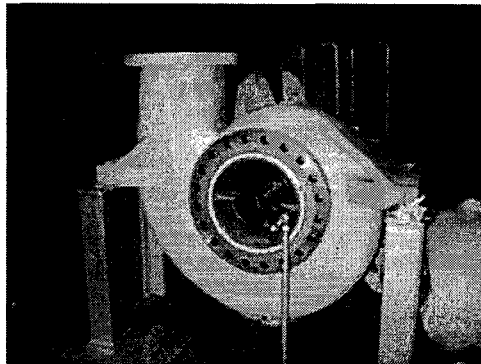


그림 1. 하나로 1차 냉각펌프

하나로의 1차 냉각펌프는 건조상태에서 총무게 1134 kg으로 하나로 Pool 내의 고순도 1차 냉각수(Primary Coolant)를 2차 냉각수(Secondary Coolant)와의 열교환을 위해 1차열교환기(Primary Cooling Heat Exchanger)로 이송하는 역할을 하며, 400 HP, 1,170 RPM의 회전수를 갖는다. 펌프의 내부는 Stainless Steel로 구성되어 있으며, 내부표면은 부식 및 방식에 내식성을 갖는 산화막(Oxide Layer)층이 형성되어있다.

제염대상인 1차 냉각펌프는 하나로 운전 중, 1차 냉각수를 1차 열교환기로 이송한다. 이 과정에서 하나로의 운전 중, 또는 핵연료 교체 시, 발생하는 오염물질이 고속으로 회전하는 펌프의 내부 케이싱 및 Impeller에 물리적으로 흡착된다. 수년간의 가동으로 인해 오염물질은 일정두께의 층(Layer)을 형성하고 있으며, 이렇게 물리적으로 흡착된 오염물질을 제거하는 것을 본 제염작업의 주목표로 설정하였다.

제염의 여부는 Smear Test의 결과를 기준으로 결정하였으며, 계측기로는  $\alpha$ ,  $\beta$  Counter(S5XLB)를 사용하였고, 계측기의 Count Time은 1분이었다. 사용된 계측기의 Analysis Parameter는 표 1과 같다. 제염작업과 관련된 방사선량율에 대한 기준은 방사선방호등에 관한기준(안전관리 절차서 RSC-03-03의 7.1.2의 2), 제4조(선량한도의 적용) 2호로 적용하였으며, 표면오염도의 경우 방산규칙 제3조(방사선관리구역) 2호로 적용하였다. 또한, 최대표면허용농도는  $\alpha$ : 4 kBq/m<sup>2</sup>,  $\beta$ : 40 kBq/m<sup>2</sup>, 반출표면허용농도는  $\alpha$ : 0.4 kBq/m<sup>2</sup>,  $\beta$ : 4 kBq/m<sup>2</sup>으로 제염작업의 완료기준으로 선정하였다. 효과적으로 표면오염도를 측정하기 위하여 그림 2, 3과 같이 Point를 구획하였다.

표 1 Analysis Parameters

|       | Background<br>(cpm) | Efficiency<br>(%) | Source | Removal | 최소검출농도<br>(MDA) |
|-------|---------------------|-------------------|--------|---------|-----------------|
| Alpha | 0.24                | 61.69             | 0.25   | 0.50    | 0.0966          |
| Beta  | 5.66                | 69.40             | 0.5    | 0.50    | 0.108           |

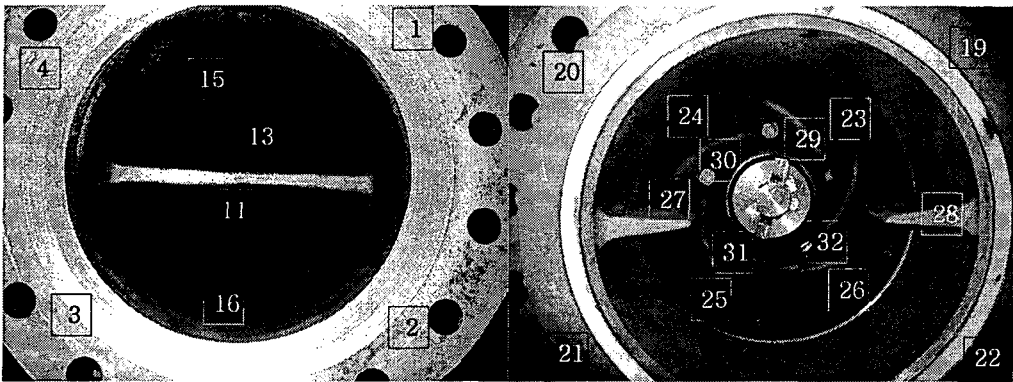


그림 2. 1차 냉각펌프 표면오염도 검사를 위한 Mapping Point(임펠러 분리 전)

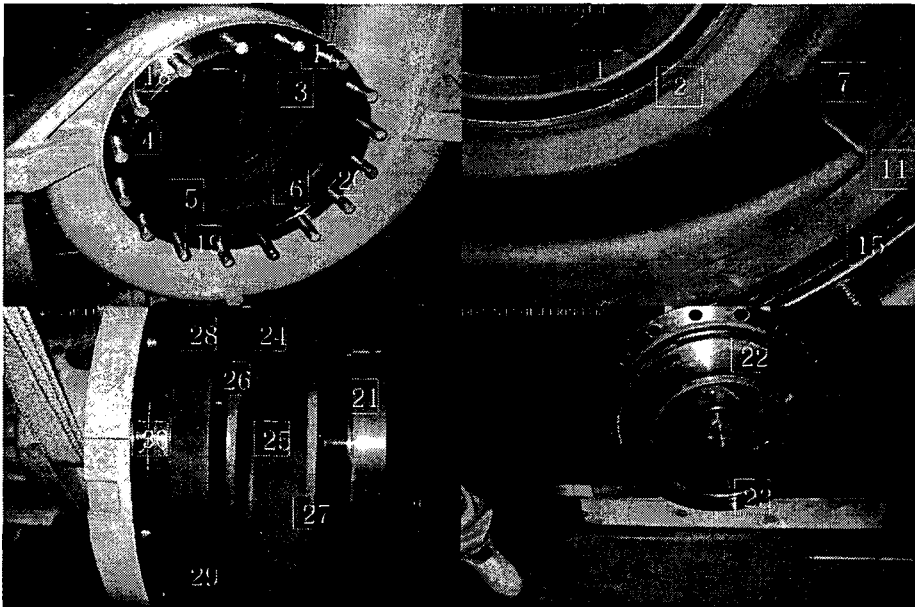


그림 3. 1차 냉각펌프 표면오염도 검사를 위한 Mapping Point(임펠러 분리 후)

제염작업에 앞서, 제염대상 펌프의 토출관 1 Point에 대해 Smear Test를 실시하였으며, 이 측정 시료를 통해 펌프에 존재하는 오염물질의 핵종을 분석하고, 표면오염도를 측정하였다. 그 결과 표면오염도는 2,790 kBq/m<sup>2</sup>를 나타내었으며, 측정시료를 통해 분석한 검출핵종의 결과는 표 2에 수록하였다.

또한 1차 냉각펌프를 제염하기에 앞서 펌프가 설치되어 있는 작업장의 방사선량을 측정된 결과 10 ~ 100  $\mu$ SV/h 값을 얻을 수 있었다.

표 2. 1차 냉각펌프 표면오염  
도 측정시료 핵종분석

| 번호 | 주요검출핵종 |
|----|--------|
| 1  | Co-60  |
| 2  | Zn-65  |
| 3  | Nb-95  |
| 4  | Zr-95  |
| 5  | Ru-106 |
| 6  | I-132  |
| 7  | Ce-141 |
| 8  | Ce-144 |

나. 제염제

1차 냉각펌프의 내부는 Stainless Steel로 구성되어 있으며, 내부표면은 부식 및 방식에 내식성을 갖는 산화막(Oxide Layer)층이 형성되어있다. 제염작업은 하나로 풀(Pool) 상부에서 진행되었으며, 제염대상펌프의 특성상 오염물질이 비산될 수 있는 브라스팅(Blasting)기술은 배제되었으며, 제염대상펌프에 손상을 줄 수 있는 제염방법 또한 배제되었다. 물론 제염계수가 크고, 제염시간 또한 빠른 제염방법을 적용 가능 하였지만, 2차로 발생되는 액체폐기물의 처리를 위해 폐액의 pH가 중요한 제염인자로 작용하였기 때문에 pH가 중성인 DX-300을 사용한 습식화학제염방법이 적용되었다. 또한 KMnO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 등의 산화제를 사용한 전처리 역시 폐기물처리가 곤란한 이유로 사용이 제한 및 배제되었다. 제염제로 사용된 DX-300의 성분은 표 3에 요약하여 수록하였다.

표 3. DX-300의 구성성분 및 함유량

| Contents         | CAS Number | 함유량      |
|------------------|------------|----------|
| Sodium Hydroxide | 1310-73-2  | 5 ~ 10 % |
| Sodium Gluconate | 527-07-1   | 3 ~ 5 %  |
| Build            |            | 3 ~ 6 %  |
| Surfactant       |            | 5 ~ 12 % |
| 향료               |            |          |
| water            |            | Balance  |

DX-300의 주요 구성성분은 Sodium Hydroxide와 Sodium Gluconate이며, Sodium Hydroxide는 강한 부식력 및 용해성을 가지며, 특히 금속표면의 가공, 세척 등에 사용된다. Sodium Gluconate는 알카리성에서 뛰어난 Chelating Power를 갖는 Chelating Agent로써 EDTA, NTA보다 Ca, Fe, Cu, Al 및 다른 중금속과 안전한 킬레이트 화합물을 형성하는 것으로 알려져 있다.

다음의 그림 4와 그림 5는 Sodium Hydroxide의 온도와 농도에 기준으로 하여 Sodium Hydrate 수용액 속에서의 Carbon Steel, Nickel 합금에 대한 부식한계를 나타낸다. 다음의 그림에서도 알 수 있듯이 적용되는 화학제염에 대하여, Stainless Steel로 구성된 1차 냉각펌프의 표면에 부식은 없는 것으로 판단하고 제염작업을 수행하였다.

다. 제염장치

1차 냉각펌프에 존재하는 오염물질은 대부분이 케이싱내의 2중 볼류트에 존재하고 있어 접근이 수월하지 않으며, 구조상 침수상태에서 제염 수행이 불가능하다. 이런 문제점을 해결하기 위해 흡

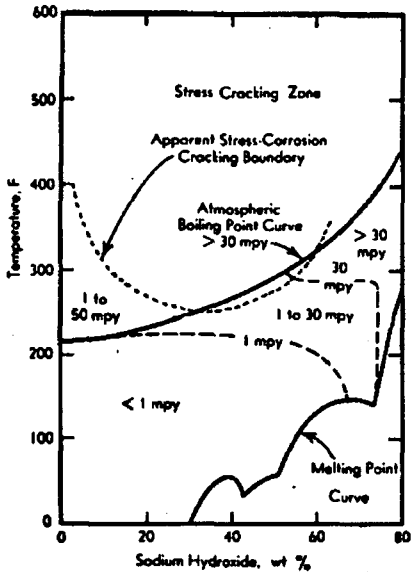


그림 4. Stainless Steel의 부식한계 입부(Suction Chamber)와 토출부(Discharge Chamber)를 밀봉한 상태에서 제염액을 순환시켜 제염할 수 있는 제염장치를 개발하였다.

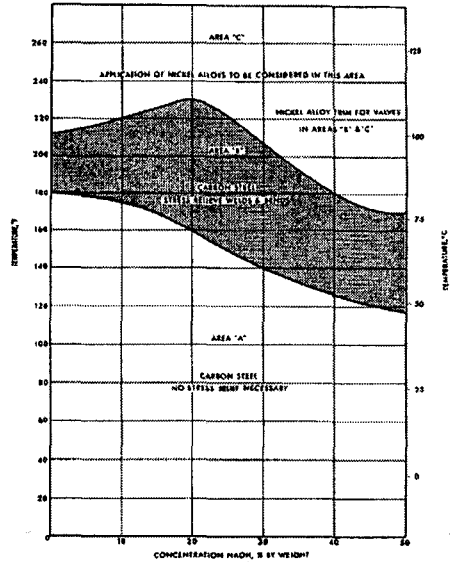


그림 5. Caustic Soda Service Graph

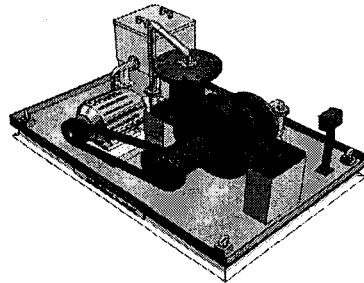
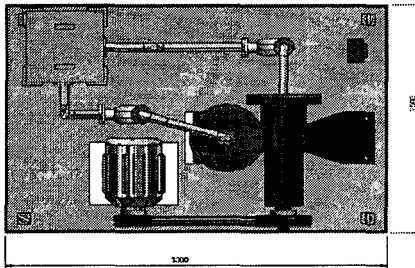


그림 6. 1차 냉각펌프 제염장치 System

표 4. 제염장치의 구성

| 구 성           | 성 능                       | 규 격  |
|---------------|---------------------------|--|
| Motor         | 제염대상 Pump의 임펠러의 회전        | 7.5 HP, 6극   |
| 제염액순환펌프       | 제염대상 Pump내의 제염액의 순환       | 1 HP, 135 l/min  |
| Flange        | 흡입부, 토출부의 밀봉              | 12" CLASS 300 ANSI RF (토출부)<br>14" CLASS 300 ANSI RF (흡입부) |
| Control Panel | Inverter, Motor, Pump의 제어 | -  |
| Inverter      | Motor의 회전수 제어             | -  |
| 제염액보관용기       | 제염액의 보관/회수                | -  |

본 제염장치는 제염대상펌프의 구동축에 Belt를 연결하여 제염대상펌프의 임펠러를 회전시켜 Pump 내에서의 제염액의 화학반응도를 높여, 유화작용에 의해 표면의 입자성 방사선 물질이 이완 되고, 화학 작용에 의해 부식력과 용해성으로 표면 오염을 제거 할 수 있도록 설계, 제작되었다. 또한 작업자의 피폭을 최소화 할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

라. 제염결과 및 분석

(1) 펌프내부

제염작업을 수행하기 위하여, 제염장치를 하나로 홀(Hall) 상부 새핵연료(Fresh Fuel) 저장조 앞에 설치하고, 1차 냉각펌프의 Drain을 개방하여 내부에 잔존하는 냉각수를 모두 제거한 뒤, 토출 배관에 Blind Flange를 제거하고, 토출배관을 통해 DX-300 144 ℓ를 제염대상 펌프에 채운 뒤, 토출관에도 Blind Flange를 체결하였다. 또한 펌프내에서 DX-300의 화학반응도를 높이기 위하여, 2개의 원심식펌프를 연결하여, 제염액을 순환시켰다.

1차제염 후, 그림 2에서 선정해 놓은 Point에 대하여 표면오염도를 측정하였다. 그 결과 토출부에 위치하는 Point 6과 15, 17, 18, 19에서 반출표면허용농도( $\beta < 4 \text{ kBq/m}^2$ )의 5~10배를 넘는 오염도를 나타내었다. 이는 펌프의 케이싱이 2중 볼류트로 되어있어 제염액이 토출부의 상부까지 완전하게 채워지지 않았기 때문이었다.

제염액을 전량 회수한 뒤, 제염액의 방사선량률을 측정된 결과,  $116 \mu\text{Sv/h}$ 을 나타내었으며, 세척수를 사용하여 펌프의 내부를 세척하고, 새로운 제염액을 채운 뒤, 2차제염을 수행하였다. 2차제염시에는 1차제염에서 발생한 문제점을 해결하기 위하여, Vent Cock를 개방한 상태에서 Impeller를 천천히 회전시키며, 제염액을 채워 넣었다. 제염액을 채운 뒤, 임펠러를 회전시키며, 제염액을 순환시키며, 2차제염을 수행하였다. 2차제염 후, 내부를 세척하고 표면오염도 측정하였다. 표면오염도 측정결과 7개의 Point만이 반출표면허용농도 이상의 값을 나타내었으며, 1차제염시 높은 오염도를 나타내었던 5개의 Point 모두 반출표면허용농도 이하의 값으로 제염되었다. 3차제염 역시, 2차제염과 같은 방법으로 수행되었으며, 제염 후, 모든 Point에 대하여 반출표면허용농도 이하로 제염되었음을 확인하였다.

하지만, 2중 볼류트내에 고선량의 이물질이 있음을 방사선량률 측정을 통해 확인하였고, 이물질을 제거하기 위해, Impeller Assembly를 분리하였다. Impeller Assembly를 분리하기 이전에 접근이 불가능 하였던 케이싱내부가 접근 가능하였지만, 2중 볼류트내는 역시 접근이 용이하지 못하였다. 2중 볼류트내에 존재하는 고선량의 이물질은 접착식 Tape를 사용하여 제거하였으며, 이물질의 방사선량률을 측정된 결과,  $900 \mu\text{Sv/h}$ 을 나타내었다.

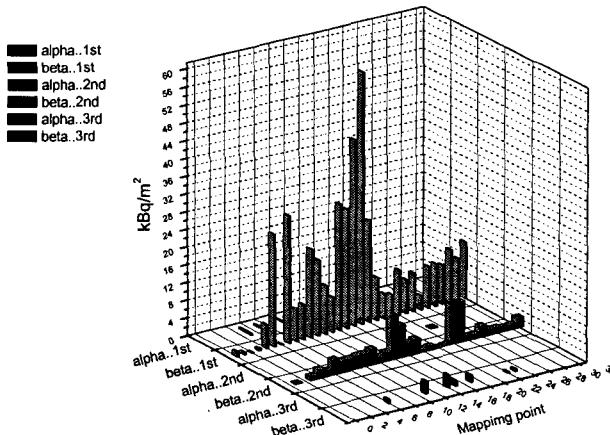


그림 7. 1차 냉각펌프의 내부표면에 대한 제염경향

제염작업 결과 제염제의 유화작용에 의한 입자성 방사선 물질이 이완되어 오염물질이 제거됨을 확인할 수 있었다. 3차 제염이후, 총 350 ℓ의 액체폐기물이 발생하였으며, 약 18시간의 제염작업을 통해 제염 전, 최대 2,790 kBq/m<sup>2</sup>의 오염도가 제염 후, 4 kBq/m<sup>2</sup>이하로 성공적으로 제염되었다.

(2) 펌프외부

외부제염은 내부제염 수행 후, 수행되었으며 Blushing을 통해 표면에 존재하는 오염물질을 이완시키고, 제염액과 제염용지를 사용하여 오염물질을 제거하는 방법으로 수행하였다. 총 24개의 Point에 대하여 표면오염도를 측정하였으며, 5차에 걸쳐 수행되었다. 펌프외부제염의 결과를 살펴보면 그림 8과 같다.

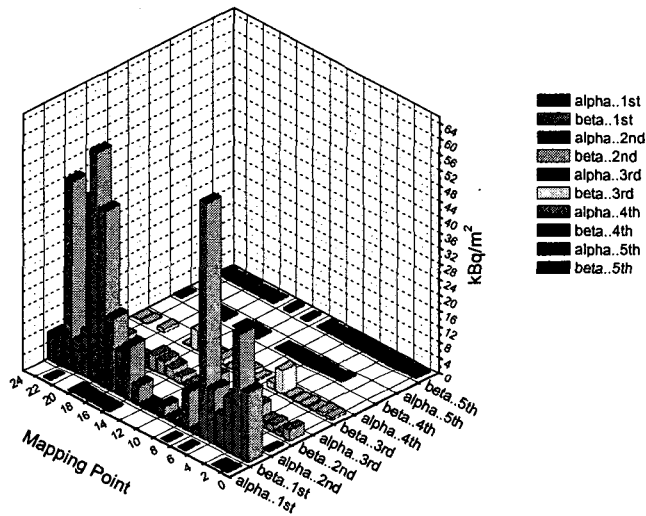


그림 8. 1차 냉각펌프의 외부표면에 대한 제염경향

외부제염의 경우, Impeller와 Nut, Bolt에 Grease가 도포되어 있어 제염작업에 어려움이 있었지만, Nut와 Bolt의 경우는 완전해체하여, 제염액에 침수시켜, Grease를 제거하였다. 외부제염결과 제염용지와 제염액을 사용하여, 24개의 Point에 대하여 반출표면허용농도 이하로 제염이 가능하였다.

또한 펌프내부와 외부의 제염을 마친 결과, 7명의 작업자에 대한 피폭량은 평균 7.88 mR 이하로 나타났다.

3. 결 론

하나로 1차 냉각펌프를 제염한 결과 제염제(CX-300)의 유화작용에 의한 입자성 방사선 물질이 이완되는 것을 확인할 수 있었으며, 화학작용에 의해 부식력과 용해성으로 표면오염을 제거 할 수 있었다.

또한 제염장치를 사용함으로써 제염시간을 단축 할 수 있었으며, 작업자의 피폭량 또한 최소화 할 수 있었다. 발생된 액체폐기물 역시 최소화하여 전량 처리 가능 하였으며, 결과적으로 금번 제염을



통해 하나로 1차 냉각펌프는 반출허용기준치 이하로 제염됨으로서 분해수리를 위해 반출이 가능하였다.

펌프내부의 경우, 제염전  $2,790 \text{ kBq/m}^2$ 의 오염도가 반출표면허용농도인  $4 \text{ kBq/m}^2$ 이하로 제염되었으며, DF값 또한 약 500을 나타내었다. 펌프외부의 경우 역시, 반출표면허용농도 이하로 제염이 가능하였다. 금번의 제염작업을 통하여 연구용 원자로의 1차 냉각펌프를 제염하기 위한 제염장비와 제염액 및 제염작업 계획의 선정이 타당함을 입증할 수 있었다.

하지만,  $\text{H}_2\text{O}_2$ 와 같은 산화제를 사용하여 전처리를 수행한 뒤, 화학제염을 시행할 경우, 제염시간을 단축시킬 수 있을 것으로 판단되며, 하나로 출입절차에 따른 제염계획 또한 철저히 준비되어야 할 것이다. 이에 대한 추가의 노력도 진행되어야 할 것이라 판단된다.

#### 4. 감사의 글

본 연구는 하나로 계통관리실의 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 5. 참고문헌

1. D. R. Diercks, "Chemical Decontamination and Chemical Cleaning of LWR Components and Possible Interactions with Metallurgical Aging Effect" NUREG/CR-5180 (1988).
2. W. Z Oh, et al. " The State of Art on the Radioactive Metal Waste Recycling Technologies" KAERI/AR-474/97.