

## 하나로에서 1차 정화 계통 이온 교환 수지 교체 시 작업자의 피폭 방사선량 저감에 대한 연구

A study on the Mitigation of Radiation Exposure for Workers during  
Resin Replacement of the Primary Purification System in HANARO

강태진, 황승렬, 임인철, 이 문, 최호영  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

하나로 일차 냉각수 정화 계통은 원자로 냉각수, 원자로 수조수 및 작업 수조수의 화학적 상태를 제한치 이내로 유지하기 위하여 필요하다. 이를 위해 운전원은 주기적으로 일차 정화 계통 이온 교환 수지를 교체하는데, 이 작업은 원자로실에서 행하는 작업 중 방사선 피폭이 큰 작업 중의 하나이다.

따라서, 지금까지 이온 교환 수지 교체시 측정된 카트리리지 표면 선량 변화 추세를 분석하여 카트리리지 표면 선량이 방사선안전관리의 작업 권고치 이하가 되도록 하는데 필요한 카트리리지 수량을 추산한 후 추가로 3개의 카트리지를 확보하여 작업함으로써 운전원의 피폭 선량을 감소시켰다.

### Abstract

The primary coolant purification system of HANARO is required to maintain the chemical state of the reactor coolant and pool water within the specified limits. For this, reactor operators replace periodically the resin of ion exchanger and this is one of the operator activities which could bring large radiation dose.

Therefore, we analysed the radiation level at the surface of resin cartridge from the previous replacement activities and found the required resin decay time to meet the limit specified for radiation protection.

As results, three more resin cartridge were found to be required for the primary purification system to meet the radiation protection limit. This was effective in reducing the radiation dose to operators

## 1. 서론

하나로의 일차 냉각수 정화 계통은 원자로 냉각수, 원자로 수조수 및 작업 수조수를 운영기술지침서에 규정되어 있는 화학적 상태 제한치 이내로 정화·유지시키는데 목적이 있다. 원자로 운전원은 1일 3회 일차 냉각수 정화 계통의 이온 교환기 입·출구에 있는 전기 전도도 계기의 지시치를 판독하고 기록하면서 냉각수의 전도도가 운영기술지침서상의 제한치보다 낮은 자체 수질 관리 기준치인 1.0 micro mho/cm 이내가 되도록 관리한다. 전도도 지시값이 제한치에 근접할 때는 운전 중인 정화계통 트레인을 대기중인 트레인으로 교체 운전한다.

교체된 트레인의 수지 카트리지는 방사선량이 높기 때문에 교체 후 약 1 개월 정도 냉각시킨 후 임시 보관 장소로 옮겨 보관한다. 수지 교환 작업은 보관 중인 카트리지 중에서 표면 방사선량이 가장 낮은 카트리지를 꺼내어 작업을 한다. 이 작업은 원자로실에서 행하는 작업 중 피폭이 큰 작업 중의 하나이다.

본 논문에는 수지 교체시 운전원의 피폭량을 저감하기 위하여 취한 조치와 그 효과에 대하여 기술하였다.

## 2. 본론

### 2.1 하나로의 일차 냉각수 정화 계통

#### 1) 설치 목적

일차 냉각수 정화 계통은 원자로 냉각수, 원자로 수조수 및 작업 수조수를 정화시키는데 목적이 있다. 냉각수의 화학적 상태 제한치는 운영기술지침서에 기술되어 있으며 표 1과 같다[1].

표 1. 일차 냉각 계통 냉각수의 화학적 제한치

매개 변수	정상 상태 제한치
pH	5.5 - 6.5
전도도	0.5 mS/m (5micro mho/cm)
염소이온( $Cl^-$ +불소이온 $F^-$ )	0.2 ppm 이하

#### 2) 일차 정화 계통의 구성

정상 운전 중 정화 계통 유량은 7.1 kg/sec 이다. 펌프를 이용하여 직접 원자로 냉각 계통, 원자로 수조와 작업수조에서 취수된 원자로 수조수나 작업 수조수는

정화 과정을 거친 후 작업 수조 또는 원자로 수조로 복귀하게 되어 있다. 계통은 2대의 여과기, 2대의 이온교환기, 1대의 펌프, 1대의 스트레이너, 관련 밸브 및 배관으로 구성되어 있는데, 계통도는 그림 1과 같다[2].

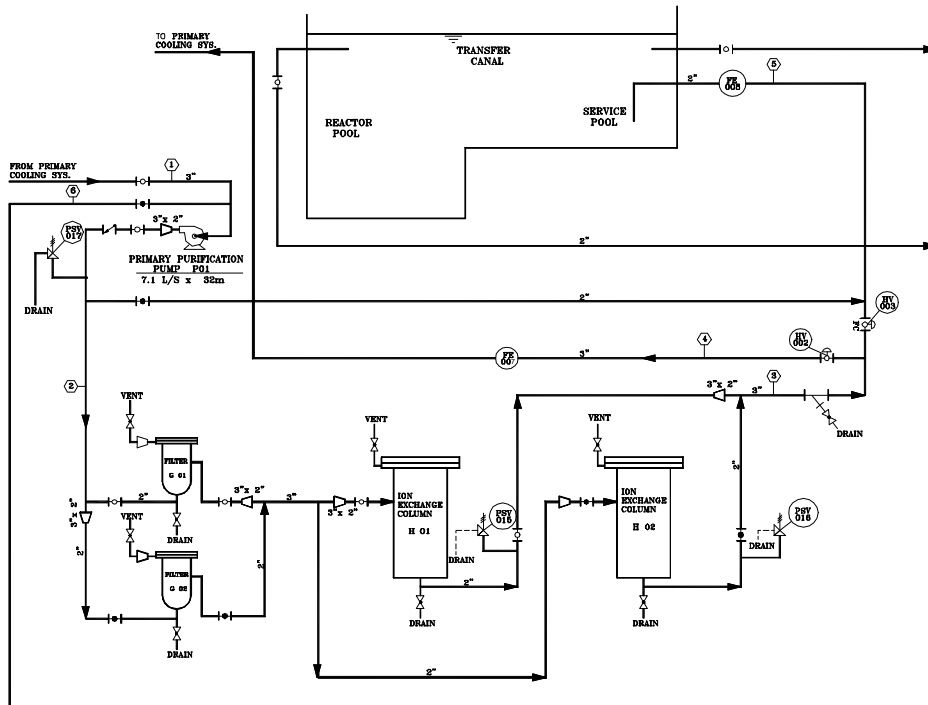


그림 1. 일차 정화 계통 계통도

### 3) 정화 능력

정화 계통의 여과기와 이온 교환기는 두 개의 트레인으로 구성되어 있다. 한 대의 여과기와 한 대의 이온 교환기를 사용할 때, 원자로 냉각수 정화 계통의 원자로 수조수와 원자로 냉각수에 대한 정화 반감기는 약 6시간이다. 정상시에 여과기 1대와 이온교환기 1대만 운전할 때 정화 계통의 유량은 7.1 kg/sec로 유지된다. 그러나 보충되는 냉각수의 수질이 저하되거나 정화 계통의 장시간 정지 후 재운전 시에는 2개의 트레인 모두를 가동시켜 정화 능력을 증가시킬 수 있다. 이때 정화 계통의 유량은 10 kg/sec이다[2].

#### 4) 이온 교환기의 특징

##### 가. 수지의 특성

하나로 일차 정화 계통에 사용하고 있는 수지는 원자력 등급 이온 교환 수지 Amberlite Irn 150이다. 이 수지는 양이온/음이온이 DVB(Di Vinyl Benzene) gel로 혼합된 particle로 강력한 양이온과 음이온의 교환 능력을 가지고 있다. 또한 이 수지는 충분히 재생된 H<sup>+</sup>/OH<sup>-</sup>로 만들어져 마찰과 삼투압(osmotic)충격이 bead의 crack으로부터 탁월한 저항력과 높은 능력을 가지고 있다. 모체는 polystyrene-divinylbenzene copolymer이며, 대부분의 입자 크기는 0.3~1.2 mm이나, 이 중 효과적인 입자 크기는 0.38~0.45 mm이다. Amberlite Irn 150 수지의 운전 조건은 표 2에, 수지의 물리적 및 화학적 특성은 표 3에 나타내었다[3].

표 2. Amberlite Irn 150 수지의 Bed 조건

운전 최고 온도	60 ℃
유량	8 - 50 *BV/h
최대 유속	60 m/h

\* 1BV(Bed volume) = 1m<sup>3</sup> 용액/m<sup>3</sup> 수지

표 3. Amberlite Irn 150 수지의 물리적, 화학적 특성

	구 분	특 성	
물리적 특성	형 태	구 모양의 일정한 입자	
	무 게	689 g/l	
	입자 크기	< 0.30mm : 0.5% max. > 1.18mm : 3.0% max.	
	양이온 평균 크기	650 ± 50 μm	
	음이온 평균 크기	630 ± 50 μm	
화학적 특성	분 류	양 이온	음 이온
	모 체	Polystyrene DVB gel	Polystyren DVB gel
	구성 요소	Sulphonic acid	T.M.A*
	이온 형태	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>
	수분 함량	49 ~ 55 %	54 ~ 60 %

\*T.M.A : Tri-methyl Ammonium

양이온 수지는 용액 중의 양이온을 취하고 자신의 다른 양이온을 방출하는 성질을 가진 이온 교환 수지로서 갈색 또는 흑갈색으로 불투명하며 일반적으로 가교도가 커서 색이 짙게 되는 경향이 있으며 수중에서의 비중은 1.3 정도이다. 가열하면 분해되어 교환 능력, 밀도, 수분 흡착이 저하되는데 186 °C에서 24시간 가열할 경우 교환 능력이 15~40 % 저하된다. 음이온 수지는 용액 중의 음이온을 교환하는 성질을 가진 이온 교환 수지로서 갈색 또는 담갈색이며 수중에서의 비중은 1.08~1.14이다. 음이온 수지는 제 4급 암모늄 교환기를 가진 것을 널리 사용하고 있으며, 염기형은 100 °C까지 안정하나, 수산기형은 상온에서도 서서히 분해하여 아민 냄새를 발산하는 특성을 갖고 있다[4].

#### 나. 이온 교환기

이온 교환기는 수지층의 두께가 0.91 m 이상이 되고, 수지층을 통과하는 최대 유량 32 kg/sec · m<sup>2</sup>를 수용할 수 있도록 설계되었으며, 그 용적은 200 ℓ 크기의 교체가 가능한 원통형 수지 카트리지를 넣을 수 있는 210 ℓ이다. 용기는 상단부가 플랜지로 뚜껑이 덮인 수직 원통이며 수지가 빠져나가는 것을 방지하기 위하여 유·출입로에 스크린(resin retention screen)을 부착하였다. 이온교환기 용기는 재사용이 가능하며, 수지 카트리는 단일 집합체로서 제거될 수 있도록 설계되었다. 수조 카트리의 구조는 그림 2와 같다.

## 2.2 하나로 이온 교환 수지 교체 및 표면 선량

### 1) 이온 교환 수지의 교환

일차 계통의 냉각수는 노심을 거쳐 순환하기 때문에 수조수와 달리 냉각수의 불순물 및 노심 구조물의 방사화물이나 핵연료 물질의 핵분열에 의한 생성물 등 많은 방사선원을 포함하고 있으며 방사능 준위도 매우 높다. 노심을 통과한 냉각수의 일부는 우회 수로를 통하여 원자로 수조로 배출되는데, 교환되는 카트리의 선량이 높은 이유는 우회수 중 일부가 수조로 유입되기 전 다시 정화 계통을 거치기 때문에 많은 양의 방사선원이 정화 과정에서 수지에 흡착되기 때문이다.

원자로 운전원은 하루에 3번 일차 냉각수 정화 계통의 이온 교환기의 입·출구에 있는 전기 전도도 계기의 지시치를 판독한 후 원자로 보조기기 운전 일지에 기록한다. 이온 교환기 입, 출구의 정상적인 전도도 지시값은 수질 관리 기준치인 1.0 μmho/cm 이하이어야 하고, 차압은 105 kPa(g)+10% 이내로 유지되어야 한다. 이온 교환기의 입·출구의 전도도가 관리 기준값을 초과하면 운전중인 이온 교환기를 대기중인 이온 교환기로 교체 운전한다. 운전 정지된 이온 교환기의 수지 카트리

지는 방사선량이 높아 약 1 개월 정도 냉각시킨 후 인출하여 임시 보관 장소로 옮겨 저장한다. 수지의 교환시에는 보관 중인 카트리지에서 방사선량이 가장 낮은 카트리지를 꺼내어 새 수지로 교환하고 이온 교환기에 장착하는데 수지 교환량은 약 130 kg 이다. 이 작업은 통상적으로 운전원이 원자로 실내에서 하는 작업 중 피폭이 가장 많이 되는 방사선 작업인데[5], 주요 작업 순서는 그림 3과 같다.

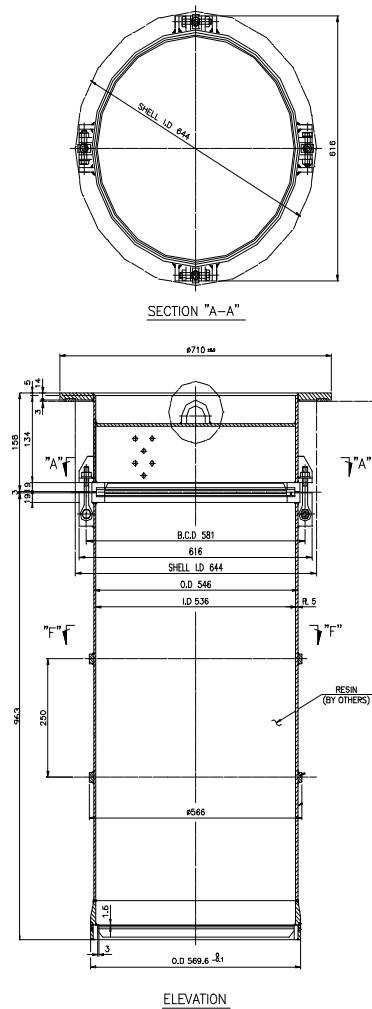
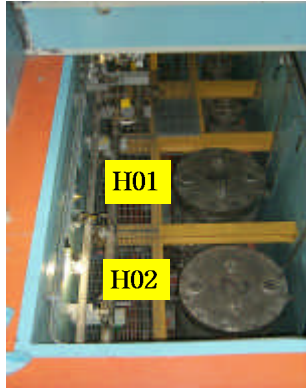


그림 2. 수지 카트리지 구조



가. 이온 교환기가 있는 기기실의 Hatch 개방



나. 이온교환기 뚜껑 개방



다. 교환 대상 카트리지를 인출



라. 인출된 카트리지를



마. 임시 보관 장소에 카트리지를 보관

그림 3. 수지 카트리지를 교환하는 작업

## 2) 카트리지 표면 선량 변화 추세

하나로 운전 중 일차 냉각수에서 발견되는 주요 핵종은 Na-24, Ar-41, Mn-56, W-187 등이다. 냉각수에 있는 핵종은 Na-24, Ar-41, Cr-51, Mn-56, Zr-95 등과 같이 냉각수에 용해된 물질이 노심에서 방사화된 것, 노심 구조재에서 방사화된 물질이 냉각수로 용해된 것들과 그 외의 핵연료 표면에 붙어있는 우라늄의 핵분열 또는 핵연료 손상 결과 냉각수 중으로 녹아 나온 핵분열 생성물로 크게 나뉘어진다. 핵분열 생성물은 정상적인 원자로 운전 중에도 항상 비슷하고 작은 양이 검출되고 있는 것으로 보아 핵연료 표면에 오염된 우라늄의 핵분열 때문인 것으로 생각된다 [6].

일차 냉각수의 방사성 핵종 중 반감기가 3시간 이하인 Ar-41, Mn-56은 수조 표면에서 거의 사라지고 반감기가 15.02시간인 Na-24와 23.09 시간인 W-187이 어느 정도 검출된다. 냉각수 방사능의 약 60 % 정도를 차지하는 Na-24는 일차 냉각수가 정화 계통의 이온 교환 수지를 지나면 대부분은 흡착되어 없어지며 반감기가 짧으므로 레진 교환 시에는 거의 없어진다. 그러나 핵분열 생성물로 생기는 핵종인 Zr-95, Nb-95, Ru-103, Ag-110m, I-131, Ba-140, Ce-141 등은 이온 교환 수지에 흡착되어 있기 때문에 이온 교환 수지 교체 시 높은 선량을 나타낸다. 이온 교환 수지 교환 작업 과정에서 측정된 카트리지 표면 선량은 최고 0.027 Sv/h 에서 최저 5.7 mSv/h 였으며, 표면 선량이 0.01 Sv/h 이상인 측정 결과를 해당 카트리지의 분리 후 경과 시간의 함수로 표시하면 그림 4와 같다. 이 추세선에서 카트리지 표면 선량이 방사선안전관리의 작업 권고치인 0.01 Sv/h에 도달하는 시기는 사용 중지 후 264일 정도인 것으로 추정된다. 추세선에 대한 회귀식을 이용하여 반감기를 계산하여 보면 240일인데 이는 Ag-110m의 반감기인 249.8일과 매우 유사하여 냉각이 충분히된 카트리지의 선량은 주로 Ag-110m에 의한 것으로 판단된다.

## 2.3 필요로 하는 카트리지 수 추정

그림 5에 있는 것처럼 이온 교환기 사용 중지 후 카트리지 냉각기간은 최저 23일에서 최고 78일로 평균 약 58일이며, 이온 교환 수지의 사용일수는 56일에서 86일로 평균 74일이다. 그림 4의 추세선에서 카트리지 표면 선량이 방사선안전관리의 작업 권고치인 0.01 Sv/h에 도달하는 시기는 사용 중지 후 264일이므로 방사선 안전관리의 작업 권고치를 준수하면서 교환 작업을 하려면 4개의 카트리지에 운전 중인 트레인에 있는 1개와 여유분 1개를 추가하면 총 6개가 필요하다. 따라서 카트리지를 기존의 3개에서 3개를 더 마련하여 수지 교체 작업시 운전원의 피폭을 최소화하였다.



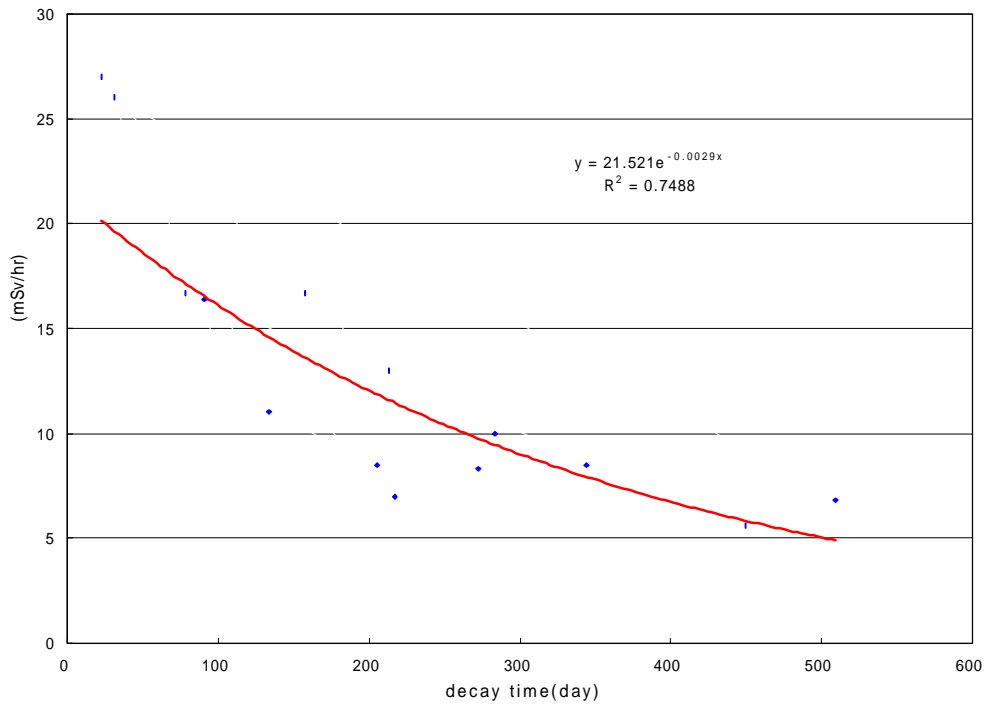


그림 4. 일차 정화 계통 카트리리지 선량 변화

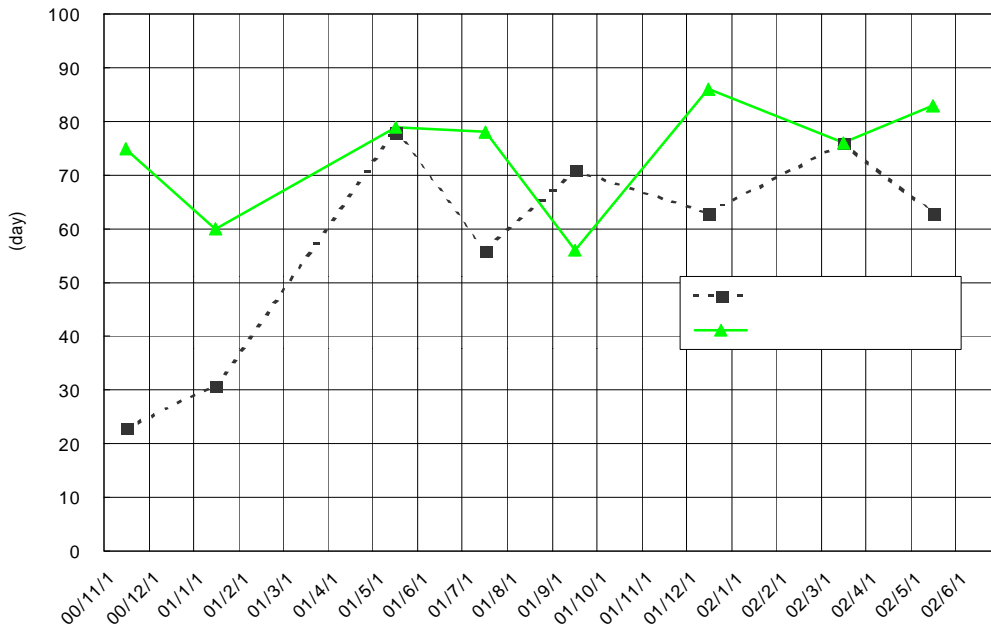


그림 5. 수지 카트리리지 교환 작업 이력

## 2.4 그 외 피폭 감소를 위한 조치

추가로 수지 카트리지를 마련하는 것 이외에 아래와 같은 조치를 취하였다.

- 1) 레진 카트리지를 임시 보관 장소에 옮긴 후 슬링(sling)을 바로 제거하지 않고 다음 카트리지 교환 작업 시 슬링을 제거하도록 작업 방법을 변경하여 임시 보관 장소에서 카트리지를 꺼낼 때 발생할 수 있는 작업자의 피폭 감소 시도.
- 2) 작업 인원을 3명에서 5명으로 증원함으로써 작업 시간을 단축하여 작업자의 피폭 감소 시도.
- 3) 카트리지 교체에 사용하는 공구를 현장에 비치하고, 이중 일부를 전동 공구로 교체하여 작업함으로써 작업 시간을 단축시켜 작업자의 피폭을 감소.
- 4) 임시 보관 장소에 있는 카트리지를 입고 일자별로 재배치하고 인출 작업 시 최소시간 내에 작업 가능토록 하여 작업자의 피폭을 감소 시도.
- 5) 작업 수조 및 원자로 수조를 주기적으로 청소하여 수조내의 이 물질을 제거함으로써 방사화된 물질이 수지에 흡착되지 않도록 조치.
- 6) 그림 6은 수지 교체 작업 시 운전원이 패용 하였던 AID(Automatic Individual Dosimeter)의 지시치를 참고하여 카트리지 확보 전, 후의 직업자 집적 피폭 선량 변화를 보여 주고 있다. 이 그림에서 카트리지의 추가 확보와 여러가지 조치 결과로 피폭 선량이 많이 감소하였음을 알 수 있다.

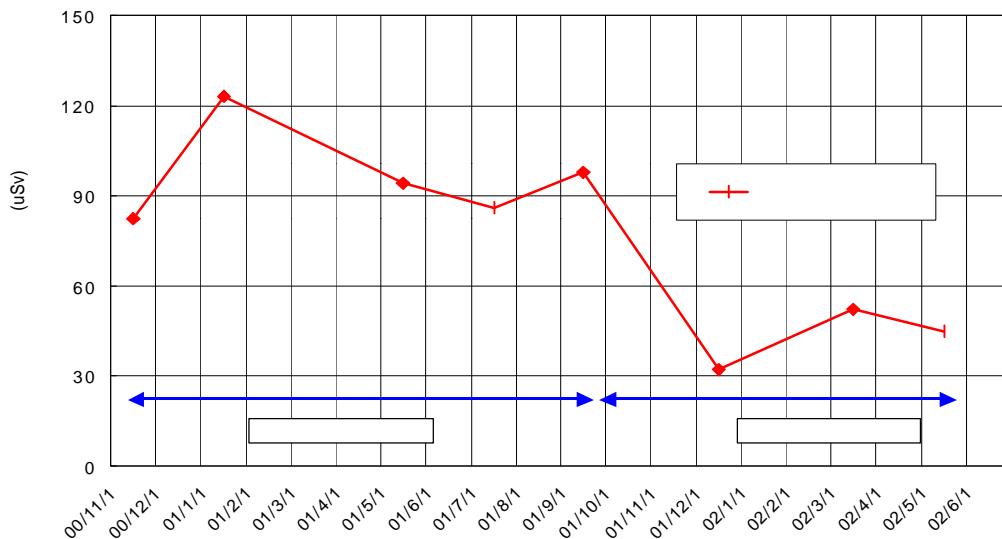


그림 6. 수지 카트리지 확보 전, 후의 작업자의 피폭 선량 변화

### 3. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 하나로 일차 정화 계통 카트리지의 표면의 선량이 방사선안전관리의 권고치인 1 R/h까지 감소하는데는 약 264일 정도가 걸린다.
- 2) 수지 카트리지의 표면 선량 변화 추세를 살펴 본 결과 충분히 냉각된 카트리지의 선량은 주로 Ag-110m에 의한 것으로 판단된다.
- 3) 추가로 수지 카트리지를 확보하고 피폭 선량 감소를 위한 수지 교환 작업상의 여러 가지 조치를 취한 결과, 교환 작업에 따른 운전원의 피폭 선량은 50% 정도로 감소하였다.

### 감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 기관 고유 사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

### 참 고 문 헌

- [1] 하나로 운영기술지침서, KAERI/TR-708/96, 한국원자력연구소
- [2] 하나로 안전성 분석보고서, KAERI/TR-710/96, 한국원자력연구소
- [3] Rohm & Hass, "AMBERLITE IRN 150", PDS 0545 A, 1998.
- [4] 박용철, "고온층을 이용한 수조 방사선 준위 저감 효과 연구", 충남대학교, p.22~27, 1999.12.
- [5] 방사선안전관리, KAERI/MR-312/97, 한국원자력연구소
- [6] 하나로 운영, KAERI/MR-358/2000, 한국원자력연구소