

소류지 물을 2차 냉각계통의 보급수로 사용하는 경우 2차 냉각수의 수질평가

Evaluation of Water Quality in Case of Using Pond Water as Supply Water of Secondary Cooling System in HANARO

박용철, 조영갑, 우종섭, 김양곤
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

30 MW 연구용 원자로인 하나로가 운전되는 동안 약 80 m³/h의 2차 냉각수가 증발, 비산 및 취출 등에 의해 손실된다. 2차 냉각계통의 수질관리 경비를 절감하기 위해 순환수 여과장치를 추가하고 수질관리 방법을 저경도 고경도 수질관리방법으로 변경하여 강제 취출수를 최소화하였다. 그러나, 수질 관리비용을 더 줄이기 위해 하나로 주변에 있는 소류지 물을 2차 냉각계통의 보급수로 사용하기 위해 급수장치를 추가로 설치하였다. 본 논문에서는 소류지 물을 2차 냉각계통의 보급수로 사용 가능한지를 확인하기 위하여 수질관리의 주요인자를 평가하였다. 결론적으로 이 평가를 통하여 2차 냉각계통의 보급수로 소류지 물을 사용하여도 2차 냉각수의 고경도 수질관리는 안전하게 유지됨을 확인하였다.

Abstract

There is about 80 m³/h loss of the secondary cooling water by evaporation, windage and blowdown during the operation of HANARO, 30 MW research reactor. To reduce the cost to maintain the water quality of secondary cooling system, we have added the filtering system for the circulation water of secondary cooling system and applied high Ca-hardness treatment program instead of low Ca-hardness to minimized blowdown. But, we intend to more reduce the cost maintaining the water quality treatment, water supply system has been added to use the pond water, around HANARO, as supply water of the secondary cooling system. In this paper, the main factors for water quality treatment were evaluated to confirm whether it is applicable to use the pond water as the supply water of secondary cooling water. As results, it was confirmed that high Ca-hardness treatment program is safely maintained through the evaluation.

1. 서론

30 MW 연구용 원자로인 하나로가 운전되는 동안 약 80 m³/h의 2차 냉각수가 증발, 비산 및 취출 등에 의해 손실된다. 2차 냉각계의 수질관리 경비를 절감하기 위해 순환수 여과장치를 추가하고 수질관리 방법을 저경도 수질관리에서 고경도 수질관리 방법으로 변경하여 강제 취출수를 최소화하였다.

그러나, 수질관리 비용을 더 줄이기 위해 하나로 주변에 있는 소류지 물을 2차 냉각계의 보급수로 사용하기 위해 급수장치를 추가로 설치하였다. 본 논문에서는 소류지 물을 2차 냉각계의 보급수로 사용 가능한지를 확인하기 위하여 수질관리의 주요인자를 평가하였다. 평가방법은 2002년도 전반기에 2차 냉각수의 보급수로서 시수와 소류지 물을 사용하였고, 하나로 운전주기가 4일 운전 3일 정비 방식에서 2주 운전 1주 정비 방식으로 변경됨에 따라 수질관리의 주요인자에 대해 고경도 수질관리 방식에 따라 안전하게 관리될 수 있는지를 평가하였다. 평가에 적용된 2002년도 전반기 운전 중에 운전방식의 주요 변경사항은 다음과 같다.

- 1주 - 11주와 26주 - 29주: 시수를 2차 냉각계의 보급수로 사용
- 12주 - 25주: 소류지 물을 2차 냉각계의 보급수로 사용
- 4주 - 13주: 순환수 여과장치의 역세주기를 4 시간에서 11시간으로 늘려 운전
- 14주 - 29주: 순환수 여과장치의 역세주기를 11시간에서 4시간으로 줄여 운전
- 23 주: 하나로 운전주기를 4일 운전 3일 정비에서 2주 운전 1주 정비로 변경

본 논문에는 이론적 고찰에서 2차 냉각수위 수질관리 기준, 소류지 물의 수질 및 소류지물의 여과장치에 대해 고찰하였고, 실험방법, 수질관리의 주요인자에 대해 고찰하여 2차 냉각수의 보급수로 소류지 물의 사용 가능성, 하나로 운전주기에 따른 2차 냉각수 수질관리의 타당성에 대해 기술하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 2차 냉각수의 수질관리 기준

수질관리 방식은 저경도, 중경도, 고경도로 분류된다. 하나로는 2차 냉각수의 수질을 관리하기 위해 가동 초기에는 저경도 수질관리 방식을 채택하여 수질을 관리하였다. 저경도 수질관리 방식은 부식성 용존이온을 불포화 상태로 유지하기 위해 강제로 배출하므로 용수손실과 유지비가 많이 든다. 이를 최소화하기 위해 2차 냉각수를 강제배출을 하지 않는 경우 비산 수량에 의해 농축도가 12에 수렴함을 확인하였다⁽¹⁾. 시수를 사용하여 농축

도를 12로 관리하는 경우 수질관리 인자별로 관리기준치는 사용되는 약품의 특성과 관련 문헌⁽²⁾을 참조하여 표 1과 같이 설정하였다. 하나로 2차 냉각수는 탁도를 제외한 모든 인자가 이 기준치를 만족하였다. 탁도를 기준치 이내로 관리하기 위해 순환수 여과장치를 추가하였으며 여과장치의 성능을 통해 탁도가 관리기준치 (20도)의 25%로 관리할 수 있음을 확인하였다⁽³⁾.

그리고 이 기준치에 대해서는 고경도 수질관리 방식을 적용하여 수질의 장해요소인 부식, 스케일, 슬라지 및 슬라임 등의 영향을 실제 운전결과로 평가하여 장해요소들이 관련 기준치를 만족하여 관리기준치가 적절히 선정되었음이 입증⁽⁴⁾되어 금번 소류지 물을 2차 냉각수의 보급수로서의 적합성 여부를 판정하는데 기준으로 정하였다.

Table 1 Predicted Water Quality

Parameter	Supply Water	Circulating Water	Predicted Quality N=12	Limit (N=12)
PH@25°C	7.54	8.6	8.7-9.0	8.3-9.0
Conductivity ($\mu S/cm$)	131	1015	1572	3000>
M-Alkalinity (ppm)	25.4	226	305	100-400
Ca-Hardness (ppm)	26.3	350	316	150-400
Cl ⁻ (ppm)	18.5	110	222	400>
Turbidity (degree)	0.01	6.05	42	20>

2.2 소류지 물의 수질

하나로 주변 야산에 소류지가 있다. 이 소류지는 인근 주민의 농업용수를 공급하기 위해 건조되었다. 연구소가 설치되면서 인근 주민이 이주되면서 소류지에 저장된 물은 유희

Table 2 Water quality of pond water

Description	Turbidity (degree)	pH @25°C	Conductivity ($\mu S/cm$)	M-Alkali (ppm)	Ca-Hard., (ppm)	Cl ⁻ (ppm)	SiO ₂ (ppm)	T-Fe (ppm)
City Water	0.01	7.09	118	28	24	18	1.10	0.06
Pond Water	5	7.21	76	26	16	11	8.63	0.43
Pond water after filt'g	1.4	7.51	83	32	18	11	9.21	0.09

에너지로 남게 되어 2차 냉각수의 보급수로 사용하게 되었다. 소류지 물의 수질에 대해 시수와 비교하여 표 2에 나타내었다. 소류지 물은 전도도와 칼슘 정도가 낮게 유지되지만 탁도와 규소의 농도가 높게 유지되고 있다. 탁도와 규소의 함량이 높은 것은 장시간 야외에서 수집된 물이기 때문에 비, 바람, 먼지 등의 자연조건에 의한 것으로 판단된다.

2.3 소류지 물의 여과장치

탁도와 규소 함량을 줄이기 위해 소류지 물의 여과장치를 그림 1과 같이 설치하였다. 여과장치는 seal tank, head tank, 여과기, 사이폰관 및 연결배관으로 구성된다. 소류지 물은 수위 차에 의해 6" 공급관을 따라 여과장치의 seal tank에 공급되면 배관내의 공기와 물이 분리된다. 분리된 공기는 head tank를 통해 외부로 유출되고, 물은 여과기내부로 유입된다. 보급수는 여과제를 거쳐 여과기 하부에 집수되고, 여과수량이 많아지면 공급수의 수두압에 의해 4"로 제작된 3개의 내부배관을 따라 여과기 상부로 모인다. 그 수위가 6" 송출관 수위보다 높아지면 여과제를 거친 물(여과수)은 송출관을 따라 4개로 등분된 2" 송출관을 통해 냉각탑 저수조에 고루 공급된다.

보급수는 여과제를 거치면서 이물질이 여과되고 이물질에 의해 차압이 상승하여 미처 여과제를 통과하지 못한 보급수는 그림 2와 같이 여과기 상부에 설치된 8" 역세 배수관으로 흐른다. 그 수위가 상부 사이폰관에 도달하면 1" 사이폰 억제관(siphon break tube)을 따라 역세수 수집탱크로 방출된다. 이 때 8" 역세 배수관에 연결된 6" 역세 배수관을 통해 외부 공기가 유입되다가 수집탱크의 수위가 상승하여 6" 역세 배수관으로 흐르면 이 물이 관을 막아 진공상태가 되어 사이폰 현상이 일어난다. 이 현상에 의해 여과기 내부의 유체 흐름이 반대가 되어 상부에 고인 여과수가 역류하면서 여과제에 여과된 이물질을 배출시킨다. 여과수의 수위가 여과기 내부에 설치된 1" 사이폰 억제관 끝 부분 이하로 내려가면 공기가 유입되어 사이폰 현상이 중단되고 여과를 반복한다.

여과장치를 거친 소류지 여과수의 수질을 분석하여 표 2에 같이 나타내었다. 탁도는 30%로 감소되었으나 규소량은 다소 증가함을 보였으며 이는 여과제가 모래이므로 이로 인한 영향으로 판단된다.

3. 실험방법

2차 냉각수위 수질을 관리하기 위해 주 1회 시료를 채취하였다. 시료를 채취하는 방법은 그림 3과 같이 시수에 대해서는 공급관에서, 소류지 물에 대해서는 여과기를 전후하여 각 1개소에서 각각 채취하고, 순환수에 대해서는 순환수 여과장치의 공통 흡입관에서 시료를 채취하였다. 이는 순환수 여과장치의 펌프 흡입관이 냉각탑 저수조의 하부에 길이 방향으로 설치되어 있고, 흡입구가 균일하게 배열되어 있어 저수조에 있는 순환수를 고루 흡입하기 때문이다.

채취된 시료는 전문회사의 시료분석설비에 의해 분석되고, 그 결과는 매주 실험분석 보고서로 제출되며 수질관리의 주요인자에 대해서는 6주간의 변동을 동시에 표시하여 변동사항을 검토하고, 그 추이를 예측하였다. 이에 따라 순환수 여과장치의 역세주기를 조절하여 농축도를 관리하고, 약품 투입량을 조절하며 소류지의 수질에 따라 소류지 물의 주입여부를 결정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 탁도의 변화

금번 실험은 2002년 전반기에 1차 냉각수위 수질을 분석한 것이며 탁도의 변화를 그림 4에 나타내었다. 시수를 보급수로 사용한 경우, 탁도는 대부분이 0.01도를 나타내었고, 순환수의 탁도는 평균적으로 약 2도를 나타내었다. 소류지 물을 보급수로 사용한 경우 12주 운전 때에는 순환수의 탁도가 그 전보다 3배로 증가하였고, 14주부터는 낮아지는 경향을 보였다. 이 시점에서 보급수의 탁도도 증가하였으나 그 변화상태가 순환수와는 상관없이 변하였다.

하나로 2차 냉각수는 고경도 수질관리방식으로 관리되므로 탁도를 조절하기 위해 순환수 여과장치가 설치되어 있으며 4시간 여과 90초 역세로 설계되어 4시간 단위로 역세가 된다. 운전 초기부터 4주까지는 4시간 단위로 역세하여 탁도가 2도 이하를 유지하였다. 적절한 역세주기를 찾기 위해 5 주에서 13주까지 역세주기를 4시간에서 11시간으로 점차 길게 하였고, 14주부터 29주까지는 반대로 역세주기를 11시간에서 4시간으로 점차 짧게 운전하였다. 그림에 나타난 바와 같이 역세주기 변경시점 이전에서 역세주기가 길수록 순환수의 탁도가 증가하였고, 그 이후에는 역세주기가 짧을수록 순환수의 탁도가 감소함을 보여 탁도는 보급수의 수질이나 하나로 운전주기 보다는 순환수 여과장치의 역세주기에 지배됨을 확인하였다.

4.2 pH의 변화

pH는 수중의 수소이온농도를 역수로 하여 상대로그를 취한 값으로 순수의 pH는 25°C에서 7을 나타내므로 pH가 7보다 작으면 산성, 7보다 크면 알칼리성으로 분류된다. 수질관리 방식에 따라 적정범위 내를 유지하여야 하며 하나로 2차 냉각수의 pH는 8.3-9.0 사이로 관리되고 있다.

금번 실험에서 pH의 변화를 그림 5에 나타내었다. 시수를 보급수로 사용한 기간의 보급수 pH는 약 7.1을 나타내었고, 순환수는 pH 8.5 이하를 나타내었다. 소류지 물을 보급수로 사용한 기간의 보급수 pH는 약 7.2정도를 나타내었으며 순환수의 pH는 8.5 이상을 나타내었다. 하나로 운전주기를 변경한 경우에는 소류지 물을 보급수로 사용할 때 순환수의 pH는 상승하는 경향을 보였고, 시수를 보급수로 사용할 때에는 순환수의 pH가 낮아

짐을 보였다. 그리고 순환수의 pH는 순환수 여과장치의 역세주기 변경시점을 기준해 볼 때 순환수의 pH에는 큰 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다.

따라서, pH는 보급수의 pH에 따라 변함을 알 수 있으며 소류지 물을 보급수로 사용하는 경우 보다 시수를 사용하는 경우가 순환수의 pH를 낮게 유지하지만 소류지물을 사용하여도 pH는 기준치 이내를 유지하므로 소류지 물을 2차 냉각수의 보급수로 사용하여도 큰 어려움이 없다.

4.3 전도도

전도도는 수중의 염류가 이온으로 해리 되면 전기를 통하는 능력을 가지게 되므로 이러한 특성을 전도도라 한다. 그 크기는 이온의 성질과 농도에 비례하며 전도도가 높을수록 부식성이 증가하나 적절한 방식제를 사용하면 관리가 가능한 것으로 보고되고 있다⁽²⁾. 하나로 2차 냉각수는 고경도로 관리되며 전도도는 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하로 관리되고 있다.

금번 실험에서 전도도의 변화를 그림 6에 나타내었다. 소류지 물을 보급수로 사용한 경우 그 전도도가 시수보다 낮지만 순환수의 전도도는 소류지 물을 보급수로 사용한 경우가 반대로 높게 나타나고 있다. 순환수의 여과장치 역세주기가 변경된 시점을 전후하여 순환수의 전도도는 큰 변화를 보이지 않아 순환수 여과장치의 역세주기와는 상관이 없는 것으로 판단된다.

그리고, 하나로 운전방식을 변경한 시점 이후에는 보급수를 소류지 물이나 시수를 사용하여도 순환수의 전도도가 상승하는 경향을 보이고 있어 순환수의 전도도는 하나로 운전방식에 영향을 받아 운전기간이 길수록 농축되어 전도도가 상승함을 알 수 있다.

4.4 M-알카리도

M-알카리도는 수중에 용해되어 있는 중탄산염, 탄산염, 수산화물 등 알카리성염 등을 중화하여 pH가 4.8에 도달할 때까지 소요되는 산의 양을 탄산칼슘의 농도 (ppm)로 표시한 수치이다. M-알카리도는 탄산칼슘이 방식피막을 형성하여 부식을 억제하지만 과도한 경우 석출되어 스케일을 형성한다. 관리기준치 이내에서 유지되는 경우 효과적으로 부식을 억제할 수 있으므로 하나로 2차 냉각수는 125-400 ppm으로 관리되고 있다.

금번 실험에서 M-알카리도의 변화를 그림 7에 나타내었다. 소류지 물을 보급수로 사용하는 경우 M-알카리도는 시수보다 낮게 유지되었으나 순환수의 M-알카리도는 반대로 높게 나타내어 보급수의 수질에는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 순환수의 역세주기가 변한 시점을 전후하여 비교해 보면 M-알카리도는 역세주기와 상관없이 변하고 있다. 하나로 운전주기를 변경한 시점을 전후하여 비교해 보면 변경 전보다 약 1.5배 증가함을 보이고 있어 하나로 운전주기가 길수록 M-알카리는 농축되어 증가하는 경향이다.

4.5 칼슘경도

칼슘 정도는 수중에 용해된 칼슘이온의 농도를 탄산칼슘의 농도 (ppm)로 환산하여 나타낸 것으로 칼슘농도가 적은 물은 부식성을 가지고, 많은 물은 탄산칼슘의 스케일성이 강해진다. 그래서 적정량을 유지하도록 수질을 관리하여 스케일을 억제하고 방식효과를 향상시킬 수 있으므로 하나로의 경우 칼슘경도는 150-400 ppm 사이로 관리하고 있다.

금번 실험에서 칼슘경도의 변화를 그림 8에 나타내었다. 소류지 물을 보급수로 사용하는 경우 칼슘 정도는 시수보다 낮게 유지되었으나 순환수의 경우에는 시수를 사용하는 경우 보다 높게 유지되어 보급수의 수질에는 큰 영향을 받지 않았다. 하나로의 운전주기를 변경한 시점에는 칼슘경도가 크게 상승하여 기준치를 상회하였으나 23주 이후에는 낮아지는 경향을 보였다. 이 때 순환수의 역세주기는 4시간 주기로 변경한 경우이며 칼슘경도를 완화시키는 효과를 나타내었다.

농축도는 순환수의 칼슘경도와 보급수의 칼슘경도의 비로 표시된다. 그림에서 소류지 물을 사용하는 경우 보급수의 칼슘경도가 낮아 순환수의 농축도가 높아짐을 보이고 있다. 농축도의 변화를 역세주기와 연관지어 보면 역세주기를 11시간으로 한 12주와 13주 그리고 10시간으로 한 17주까지 농축도는 상승하고, 역세주기를 점점 짧게 했던 그 이후의 운전에서는 농축도가 낮아 농축도는 순환수 여과장치의 역세주기에 영향을 받으며 이는 용존된 이온이 역세를 통해 배출되기 때문이다.

4.6 염소이온

수중에 용해되어 있는 염화물 중의 염소이온은 황산이온과 함께 강한 부식성을 나타낸다. 계절적으로 갈수기이거나 해수가 냉각제로 유입되는 경우에는 순환수의 염소이온 농도가 증가하여 부식을 유발한다. 하나로의 경우 2차 냉각수의 염소이온은 300 ppm 이하로 관리하고 있다.

금번 실험에서 염소이온 농도의 변화를 그림 9에 나타내었다. 보급수인 소류지 물의 염소이온 농도는 시수보다 낮고, 순환수는 소류지 물을 사용하는 경우 보다 운전주기를 변경한 경우에 더 높은 농도를 보여주고 있다. 이는 운전시간이 길므로 농축에 의해 염소이온농도가 증가하는 것으로 판단되며 보급수의 수질에 의해서는 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

그러나, 27주 이후의 운전에서와 같이 역세주기를 4시간으로 유지하는 경우 염소이온 농도가 낮아짐을 보이고 있어 염소이온을 안전하게 관리할 수 있다.

4.7 실리카 농도

수중에 용해된 실리는 메타형으로 존재하며 일반경도성분과 달리 산 세정으로도 제거하기가 곤란한 경질 스케일을 형성하므로 가능한 한 낮게 유지하여야 한다. 하나로의 경우 2차 냉각수의 실리카 농도는 150 ppm 이하로 관리하고 있다.

금번 실험에서 실리카 농도의 변화를 그림 10에 나타내었다. 소류지 물을 사용한 경우

보급수의 실리카 농도는 시수보다 높고, 순환수의 실리카 농도도 높아 실리카 농도가 상승하는 주요원인은 보급수의 수질에 의한 것으로 판단된다. 그리고 실리카 농도는 하나로 운전주기를 변경하였을 때 운전주기와 상관없이 변화함을 보이고 있다.

4.8 철분농도

순환수의 철분은 보급수에 의해 들어오는 이온 성분과 콜로이드 성분이외에 계통 내의 부식에 의해 발생하는 성분이 포함된다. 철분이 높게 유지되는 경우에는 2차 부식을 유발할 수 있으므로 낮게 유지하여야 한다. 하나로 운전의 경우 2차 냉각수의 철분농도는 2 ppm이하로 관리하고 있다.

금번 실험에서 철분 농도의 변화를 그림 12에 나타내었다. 소류지 물은 시수보다 철분 농도가 높게 나타내었으며 순환수의 경우도 마찬가지이므로 보급수의 철분 농도가 높을수록 순환수의 철분농도도 상승함을 알 수 있다. 그리고, 하나로 운전주기 변경기간에도 순환수의 철분농도는 운전주기 변화에 상관없이 보급수 수질에 따라 변화를 보이고 있다.

5. 결론

금번 실험에서 하나로 2차 냉각수를 고경도 수질관리방식으로 관리할 때 경비절감을 위해 보급수로 소류지 물을 사용하는 경우 하나로 운전 주기를 4일 운전 3일 정비에서 2주 운전 1주 정비의 운전주기를 변경하는 경우와 순환수의 역세주기를 변경하였을 때 수질관리의 주요인자에 대한 영향을 고찰하였으며 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 소류지 물을 보급수로 사용하는 경우 수질관리의 주요인자가 관리범위 내에서 유지될 수 있으므로 소류지 물을 사용하는 만큼 시수를 절약할 수 있으므로 운전경비를 절약할 수 있다.

2) 경비절감을 위해 순환수 여과장치의 역세주기를 변경해 보았으나 하나로 운전 기간을 감안하면 설계요건대로 4시간 주기로 운전하는 것이 2차 냉각수를 안전하게 관리할 수 있다.

3) 하나로 운전주기를 4일 운전 3일 정비 방식에서 2주 운전 1주 정비 방식으로 변경하여도 2차 냉각수의 수질은 관리범위 내에서 유지되므로 안전하게 관리할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분에게 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Y. C. Park, et. al., "Minimizing Secondary Coolant Blow down in HANARO", 원자력학회, 2000년 추계학술발표논문집, 2000. 10.
- [2] Iwata, Osamu, et. al., "Kurita Handbook of Water Treatment", Kurita Water Industrials Ltd. 1985.
- [3] Y. C. Park, et. al., "Performance Test of Filtering System for Controlling the Turbidity of Secondary Cooling Water in HANARO", 원자력학회, 2001년 춘계학술발표논문집, 2001. 5.
- [4] Y. C. Park et al. "High Ca-Hardness Treatment Program of Secondary Cooling Water in

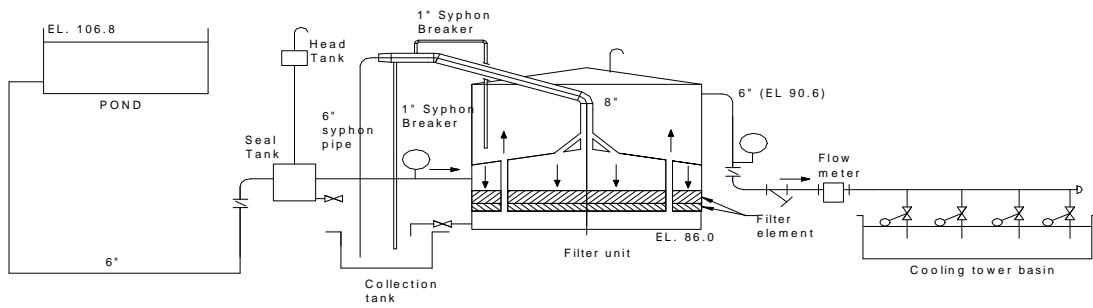


Fig. 1 Flow Diagram of filter system for pond water

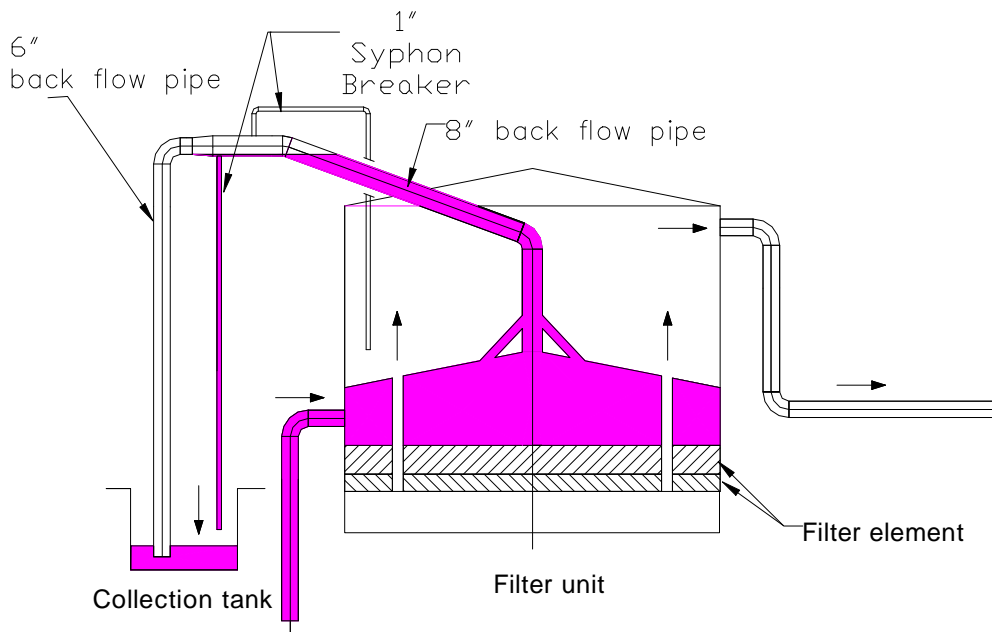


Fig. 2 Flow diagram of filter element cleaning due to siphon

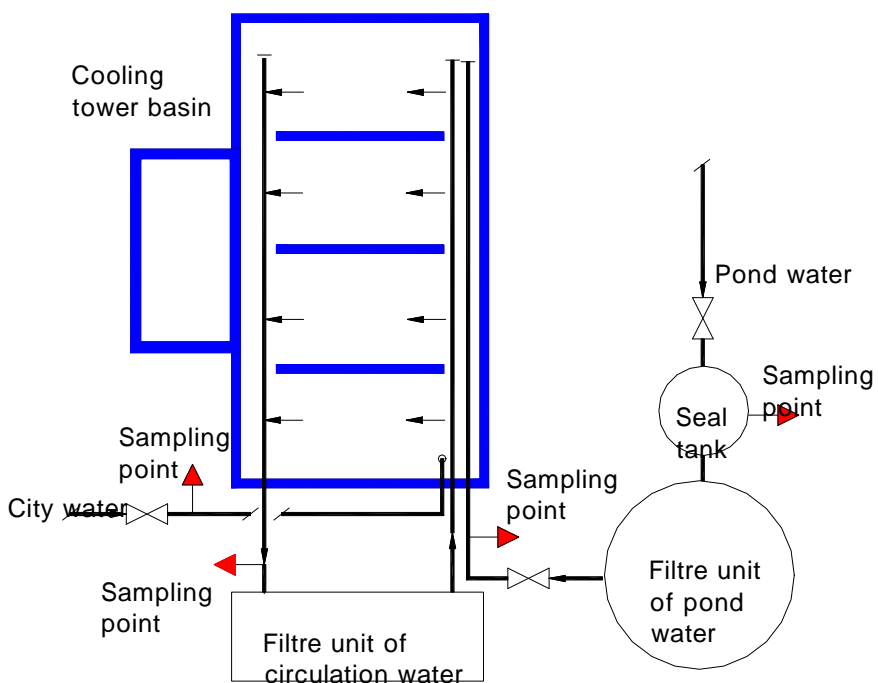


Fig. 3 Layout of Sampling points

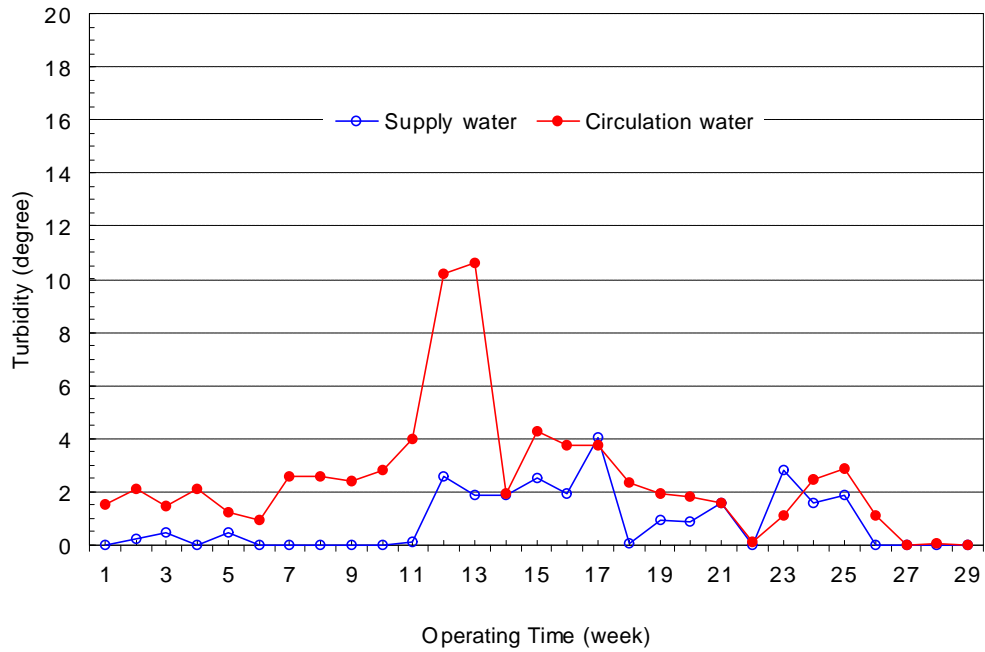


Fig. 4 Variation of turbidity

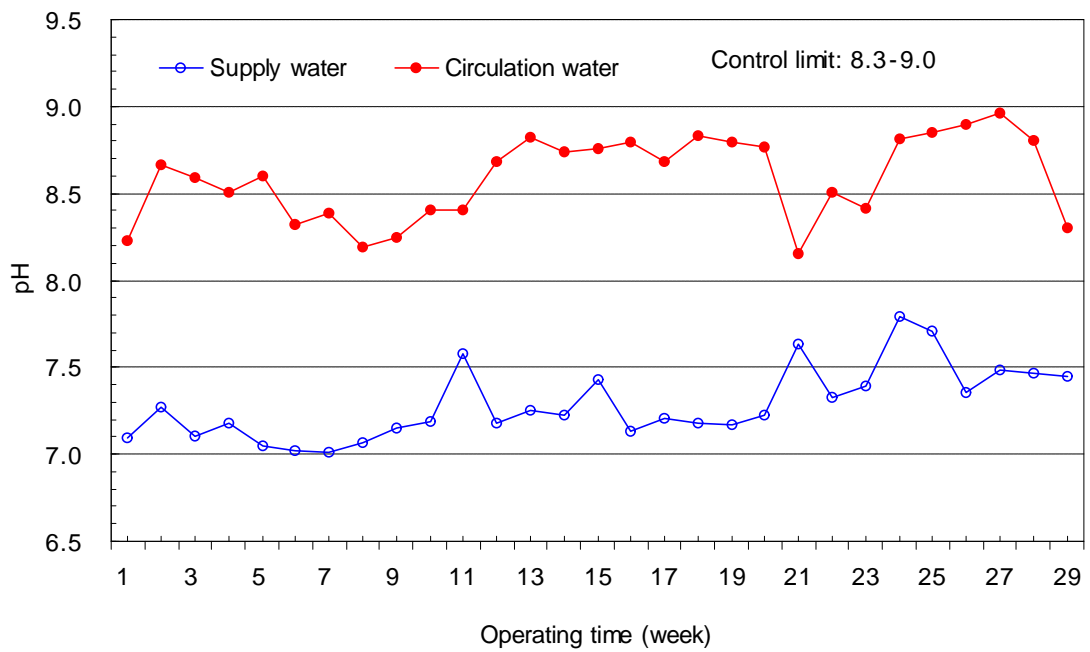


Fig. 5 Variation of pH

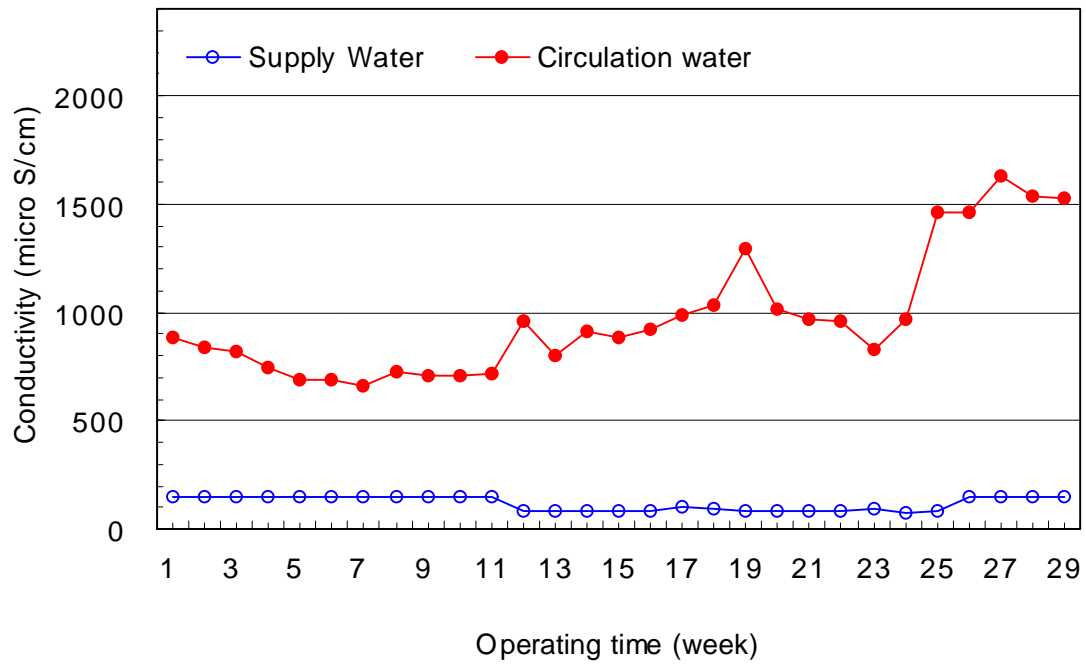


Fig. 6 Variation of conductivity

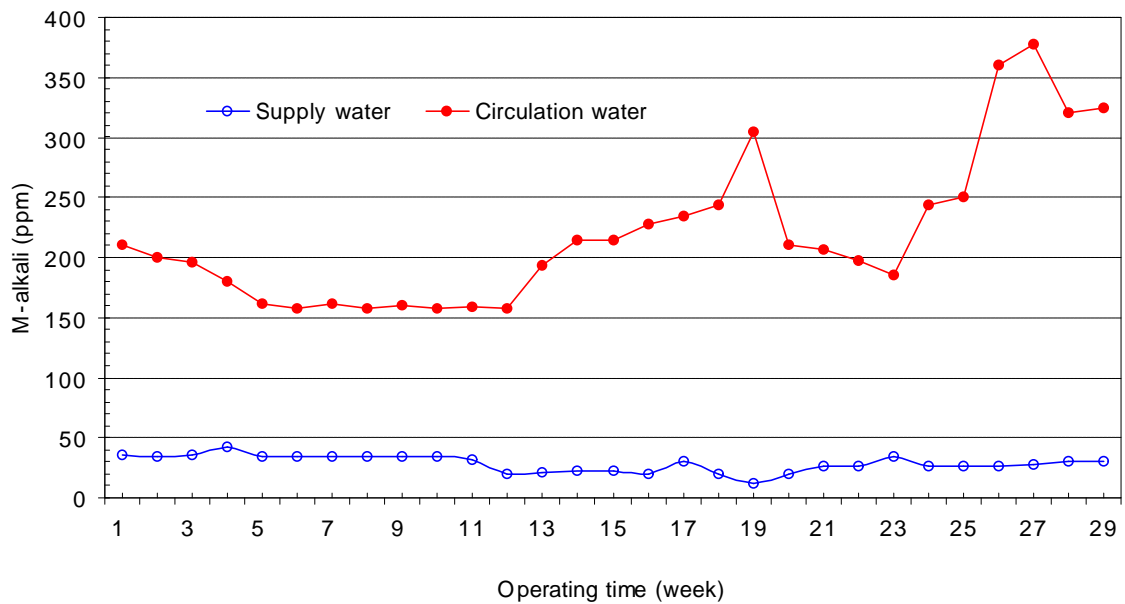


Fig. 7 Variation of M-alkali

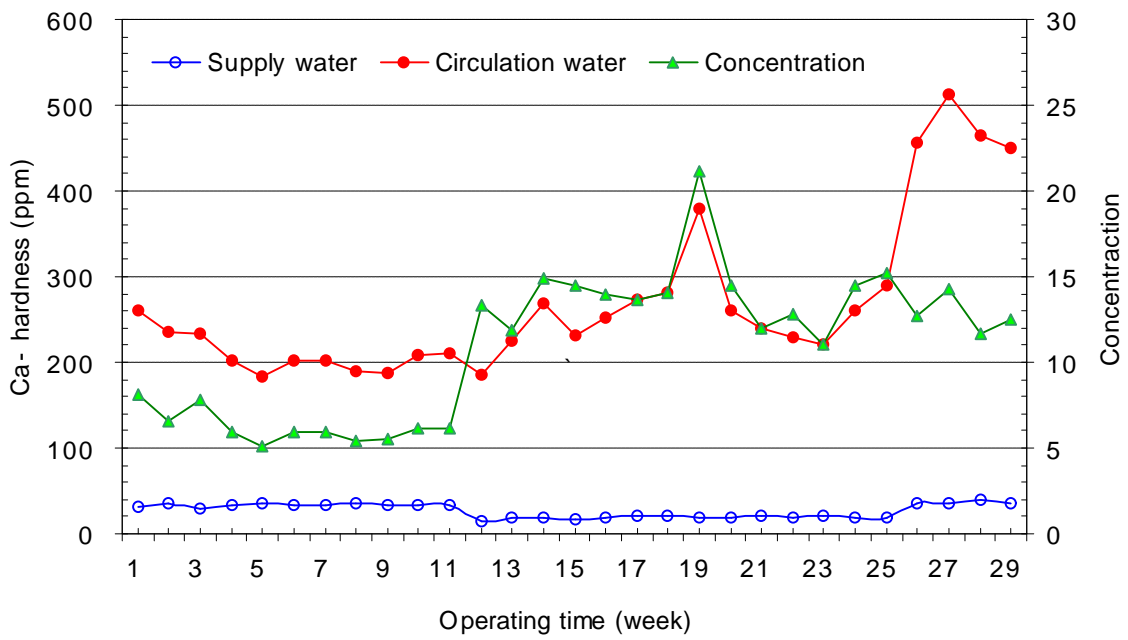


Fig. 8 Variations of Ca-hardness and concentration

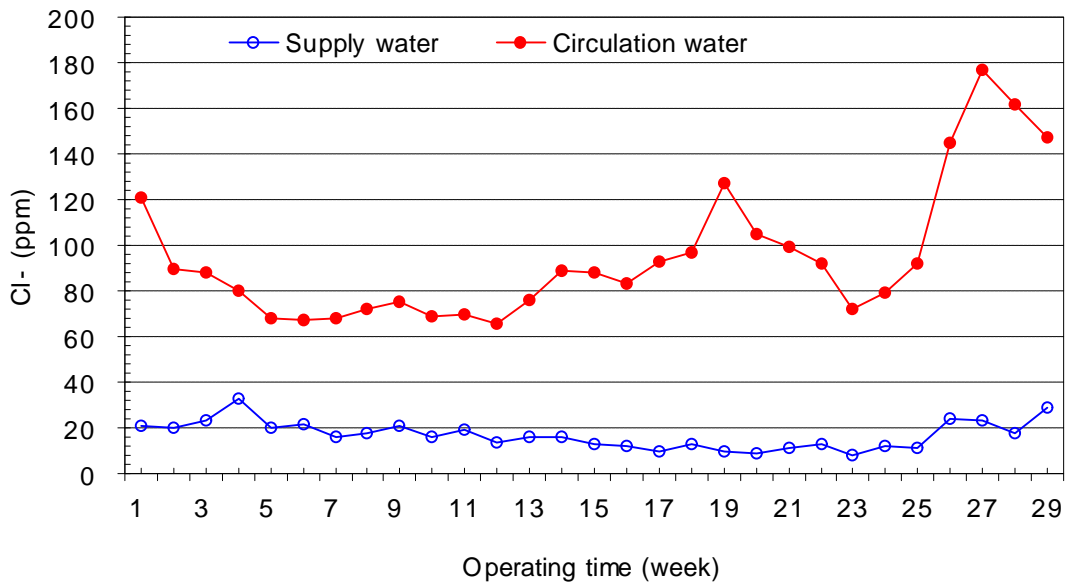


Fig. 9 Variation of Cl⁻ ion

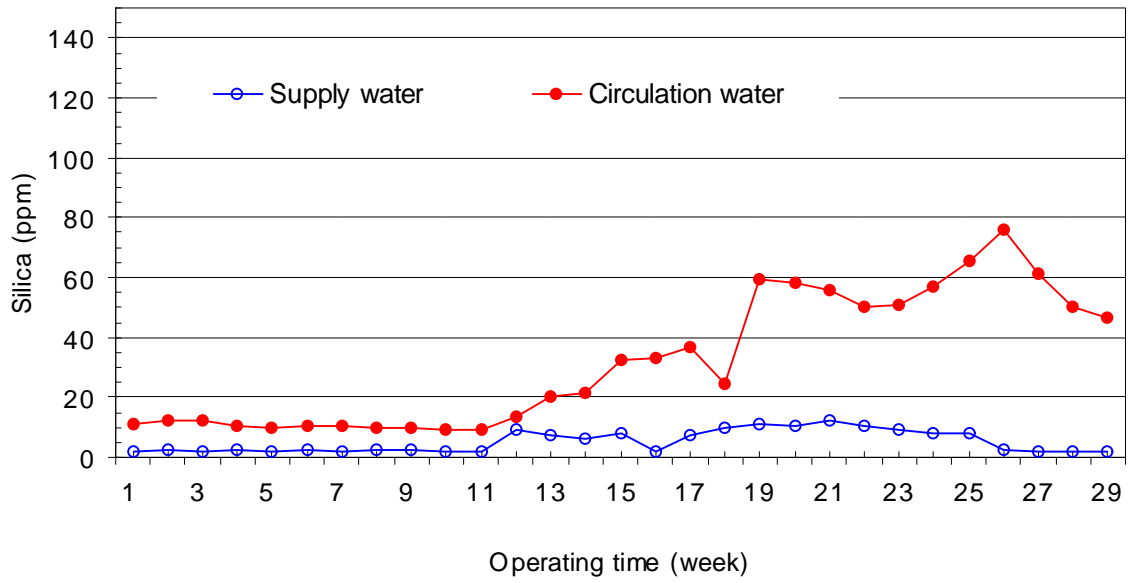


Fig. 10 Variation of silica

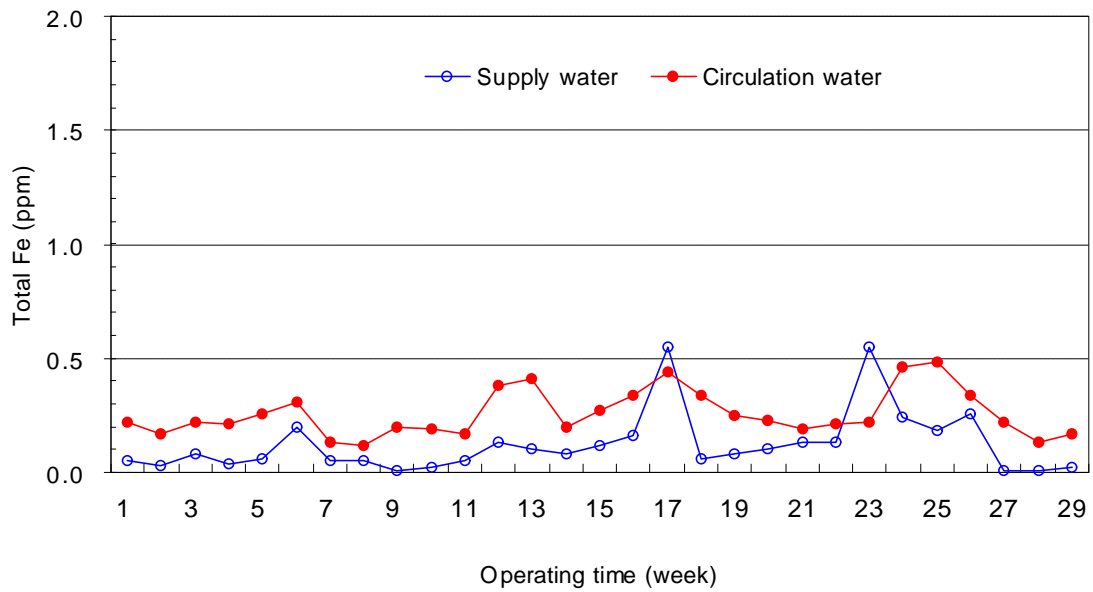


Fig. 11 Variation of total Fe