2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

하나로 2차 냉각계통의 고경도 수질관리

High Ca-Hardness Treatment Program of Secondary Cooling System in HANARO

박 용철, 우 종섭, 류 정수, 조 영갑, 전 병진

한국원자력연구소
대전광역시 덕진동 150번지

요약

하나로는 2차 냉각수를 저경도로 수질을 관리하였으나 용수절약, 유지관리 비용절감 등을 위해 고경도 수질관리 방법으로 변경하였다. 수질관리 방법 변경 후에도 2차 냉각계통의 수질은 변경 전과 마찬가지로 관리 기준치 이하를 유지하였으며 이는 간접적으로 수질이 2차 냉각계통에 큰 영향을 미치지 않는 것을 의미한다. 이를 확인하기 위해 실제적으로 수질로 인한 2차 냉각계통의 직접적인 장해 요소인 부식, 스케일, 슬라임 및 슬러지의 영향을 분석하였다. 이 분석을 위하여 6개월 단위로 수질 감시장치를 2차 냉각계통에 연결하고 각 장해 요소의 감시 인자를 측정하여 그 영향을 해석하였다. 결론적으로, 금번 실험을 통하여 장해 요소들이 기준치 이하로 관리되므로 고경도 수질 관리 방법이 하나로 2차 냉각계통의 수질관리에 적합함을 확인하였다.

Abstract

The secondary cooling water in HANARO had been treated with a low ca-hardness treatment program. The program has now been altered to a high ca-hardness treatment program to reduce the consumption of service water and the maintenance cost. After the alteration of the water treatment method, the water quality of the secondary cooling system is maintained below the limit of water quality control as same as before the alteration. This means indirectly that the secondary cooling system is not much affected by the water quality. To confirm this fact, it is necessary to analyze the effects of corrosion, scale, sludgy and slime that the water qualities are directly interfered with the secondary cooling system. We analyzed the deteriorating effects with a water monitoring equipment connected to the secondary cooling system to measure the monitoring parameters every 6 months. As a result, it is confirmed through this examination that the effects are maintained below the control limits and the high ca-hardness treatment program is applicable to treatment of the water quality of the secondary cooling system in HANARO.

1. 서론

하나로[1]에서 발생되는 열은 열교환기를 통하여 2차 냉각수에 전달되며 흡수된 열은 냉각탑에서 외기로 냉각된다. 열전달 매체로 사용되는 2차 냉각수는 온도변화와 함유된 이물질에 의해 부식, 스케일, 슬라임 및 슬러지의 장해를 일으킨다. 부식은 계통의 수명을 단축시키고, 스케일은 냉각수 중에 녹아있는 난용성 염이 농축되어 전열면에 석출되면 열전달 효율을 저하시킨다. 그리고 슬라임 및 슬러지는 계통 내에서 열전달 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 부착물 하부에서 국부 부식을 유발한다.

이러한 장해를 억제하기 위해 저경도 수질관리 프로그램으로 수질을 관리하면 수처리 약품을 주입하고 계통내의 이물질을 제거하기 위해 취출 (blow-down)을 하므로 약품 처리된 냉각수가 손실된다. 이러한 손실을 최소화하기 위해 취출을 하지 않는 경우, 2차 냉각수는 비산 손실에 의해 농축도 12에 수렴[2]하며 탁도가 상승하여 냉각수가 혼탁해지고, 스케일 및 부식을 유발한다. 탁도를 조절하기 위한 순환수 여과장치[3]를 추가하여 고경도 수질관리 프로그램을 적용하였다.

하나로는 주중 4일을 운전하고 3일을 정비하므로 고경도 수질관리 방법에 따라 수질 인자들의 관리기준 이하로 유지해 왔으며 큰 변화는 보이지 않았으나 고경도 수질관리 방법이 2차 냉각계통의 실제적인 장해 요인인 부식, 스케일, 슬러지 및 슬라임 등에 대해 억제기능을 가지는지에 대한 확인이 필요하였다.

본 논문에서는 하나로에 적용한 고경도 수질관리의 적합성을 논의하기 위해 2차 냉각계통의 수질관리 장해 요인에 대해 6개월 주기로 2회에 걸쳐 수질 감시장치[4]를 설치하여 자료를 수집하였다. 수집한 자료를 기준으로 부식, 스케일, 슬라임 및 슬러지에 대해 부식도, 파울링 계수 (fouling factor) 및 바이오 파울링 계수 (bio-fouling factor)를 각각 산출하고, 이를 관리기준과 비교하여 실험결과에 따라 수질관리 방법을 평가하였다. 본 논문은 수질관리의 장해 요인을 측정하기 위한 시험장치의 기본 원리, 시험장치, 자료수집 및 분석 그리고 결론의 순으로 기술되어 있다.

2. 이론적 고찰

2.1 부식

부식을 측정하는 방법은 많이 개발되어 있으며 그 중에서 선형 분극법 (linear polarization resistance) 방식[5]은 금속 표면에 대해 순간적으로 부식도를 측정할 수 있다. 그림 1과 같이 시편 (anode)과 기준 전극 봉 (cathode)에 매우 적은 분극 (대개 10 ㎷ 이하)을 가하면 이 때의 산화 또는 환원 전류 값은 가한 전압과 직선적인 관계를 가지므로 부식도는 식 (1)과 같이 표시된다.

$$CR = K\frac{I}{\Delta E} \tag{1}$$

여기서, CR : 부식도 (corrosion ratio, mg/mm^2day, mmd)

K : 부식도 상수 (corrosion rate constant, mmd cm^2 A^{-1} V)

I : 시편과 기준 전극 간의 전류 밀도차 (current density, A)

ΔE : 시편과 기준 전극 간의 전위차에 대한 절대값 (V)

따라서, K는 실험으로 구한 부식도 상수로서 0.026이 적용되며 시편과 기준 전극 간의 전압과 전류를 측정하면 부식도를 구할 수가 있다.

2.2. 스케일

스케일은 표면에 이물질이 누적되는 현상인 파울링 (fouling)에 의해 생기며 파울링은 열교환 장치의 파울링 계수 (fouling factor)의 변화에 의해 평가할 수 있다. 그림 2와 같이 흐르는 냉각수 상에 시험용 튜브를 장착하고 튜브 내부에 일정한 열을 공급할 수 있는 전열기와 튜브 벽 두께 중간에 온도 감지기를 설치한다. 튜브 속은 일정한 전원 (W)으로 가열하므로 식 (2)와 같이 단위 면적당의 열속 (heat flux, Q)을 계산할 수 있다.

벽면과 냉각수의 온도에 대해 파울링이 발생하기 전의 초기 온도를 각각 측정하여 식 (3)에 적용하면 파울링이 발생하기 전의 총열전달계수(U_O)가 구해진다. 일정시간이 경과하면 파울링이 발생하여 열전달 능력이 저하되므로 동일한 방식으로 벽면과 냉각수 온도를 각각 측정되면 파울링 후의 총열전달 계수 (U_F)를 구할 수 있다. 이들을 식 (4)에 대입하면 파울링 계수 (R_F)가 구해진다[5]. 파울링 계수는 총열전달계수의 역수로 표시되므로 파울링이 생기면 튜브 표면에 이물질이 누적되어 열전달 능력이 떨어진다.

$$Q = 0.8598 \times \frac{W}{A} \tag{2}$$

$$U = \frac{Q}{T_W - T_C} \tag{3}$$

$$R_F = \frac{\Delta T_{WF} - \Delta T_{WC}}{Q} = \frac{1}{U_F} - \frac{1}{U_O} \tag{4}$$

여기서, Q: 열 플락스 ($kcal/m^2h$)

W : 공급전력 (W/h)

A : 열전달 면적 (m^2)

U : 총열전달 계수 ($kcal/m^2h^oC$)

T_W : 튜브 벽 온도 (^oC)

R_F : 파울링 계수 ($m^2h^oC/kcal$)

ΔT_{WF}: 파울된 튜브 벽과 냉각수의 온도차 (^{o}C)
ΔT_{WC}: 파울링 되기 전의 튜브 벽과 냉각수의 온도차 (^{o}C)
U_F: 파울링된 상태의 총열전달계수 ($kcal/m^2h^{o}C$)
U_o: 파울링되기 전의 총열전달계수 ($kcal/m^2h^{o}C$)

2.3 슬라임 및 슬러지

냉각수 계통에서 미생물이 흐르는 유체의 벽면에 부착되면 피막이 형성된다. 한번 부착된 피막은 피막 내의 유기물을 보호하고 유체 저항을 유발하여 차압 손실이 발생한다. 이러한 현상을 바이오 파울링 (biology fouling)이라 하며 이로 인해 침적 부식 (deposit corrosion)이 발생한다. .

그림 3과 같이 내경과 길이를 알고 있는 튜브 속에 냉각수를 흐르게 하면 미생물에 의해 피막이 생기며 튜브 내경이 작아지므로 차압 변동이 발생한다. 이 차압을 측정하면 식 (5)와 같이 바이오 파울링 계수를 구할 수 있으며 이 계수는 마찰 율을 나타내는 무차원 함수이다[5].

$$B_F = \frac{39.69 \times \pi^2 \times ID^5 \times \Delta P}{L \times F^2 \times \rho} \qquad (5)$$

여기서. B_F: 바이오 파울링 계수
ID: 튜브의 내경 (m)
F: 유량 ($liter/h$)
ρ: 유체의 질량 (kg/m^3)
ΔP: 압력 강하 (kgf/cm^2)

3.0 실험

3.1 실험 목적과 조건

하나로는 현재 일주 중에 4일을 운전하고 3일을 정비하므로 매주 수질을 분석하여 주요 인자들을 측정하고, 그 변화에 따라 투입약품의 양을 조절하였다. 이 수질분석은 수질관리의 장해 요소인 부식, 스케일, 슬라임 및 슬러지를 직접 관리하기 보다는 이러한 장해를 유발하는 수질 인자를 관리하여 간접적으로 장해 요소를 예측하는 방식이다. 그래서 실제적으로 냉각계통에 미치는 영향을 직접 확인하기 위해 6개월 간격으로 장해 요소를 측정하였다.

수질 감시장치의 실험 조건은 아래와 같다. 냉각수 온도를 60 ºC도로 제한한 것은 이 온도가 되면 부식의 진행 속도는 둔화되고, 반대로 스케일의 부착 속도는 급격히 증가하기 때문이다. 이 장치는 유체가 정지된 상태에서 흐름이 없으므로 유속과 차압을 유발할 수 없으므로 최소한의 유속으로 제한하고 있다. 유체의 압력은 보일러 용수를 제외하고는 대기 상태의 공기로 냉각하고 최

소한의 수두가 발생하므로 최대 5 kgf/cm^{2}로 제한하고 있다. 그리고 공급전원은 220V AC 이고, 50 이나 60 Hz 겸용으로 사용할 수 있다.

-. 냉각수 온도: 60 ºC 이하
-. 유량: 300 liter/h 이하
-. 냉각수 압력: 5 kgf/cm^2 이하
-. 공급전원: 220V AC, 50/60Hz

3.3 실험 장치 및 방법

본 실험을 위해 시료를 채취한 곳은 냉각계통과 유사한 온도와 유속을 가지고, 열교환기가 탄소강으로 제작된 공기압축기의 열교환기 배관으로 정하였으며 여기에 감지장치를 설치하였다. 장치의 구성은 그림 4와 같이 바이오 파울링을 측정하기 위한 시험용 튜브와 전압 측정계와 부식 측정기, 스케일을 측정하기 위한 가열 튜브 및 자료 수집기가 각각 1대 씩 내장되어 있어 현장에서 시료 채취를 위한 입구만 연결하고, 채취 후 배수구로 흐르도록 하였다. 이 장치[4]의 주요 사양을 표 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of monitoring equipment

Description	Specification
Physical spec.	Size: 600 x 415 x H1012 mm Pipe: 1/2 ”
Power	220V AC, 50/60Hz, max. 1A
Sample requirements	Cooling water temp. : max. 60 ^{o}C Flow rate: min. 300 liter/h Pressure: max. 5 kgf/cm^2
Data logger	Communication port: RS -232C/RS -422 Communication speed: 19200bps Analog input: 4 -20 mA DC, 8 -channels Data capacity: above 1200 cycles

실험 방법은 장치의 입구 밸브를 열면 냉각수가 내부 튜브를 거쳐 배수구로 통수된다. 냉각수가 가열튜브를 지날 때 튜브의 벽면과 냉각수 온도가 측정되고, 부식 측정기를 지날 때 전압과 전류를 측정한다. 그리고 냉각수가 유량계를 지난 다음 차압 측정 튜브를 지나면 유량과 차압이 측정된다. 30분 간격으로 측정하여 측정된 자료가 자료 수집기에 입력되면 앞서 설명한 식 (1)에

서 (6)을 이용한 실 시간으로 계산할 수 있는 연산 프로그램에 의해 부식도, 파울링 계수 및 바이오 파울링 계수가 계산되고 그 결과가 그래프로 출력된다. 한편, 장해 요소를 정확하게 분석하기 위해 측정기간 중에 수질을 채취하여 분석하고, 세균수를 측정하였다.

4.0 결과 및 고찰

4.1 장해요인

하나로 2차 냉각수의 부식도는 그림 5에 나타내었다. 부식도는 최대와 최저치가 각각 4.2 mmd와 0.1 mmd를 나타내었고, 평균치는 2 mmd를 유지하였다. 평균치가 관리 기준치[5] 20 mmd의 약 10 % 수준이므로 부식도는 상당히 낮은 수준을 보여 하나로 2차 냉각수는 부식억제 기능이 유지되고 있는 것으로 판단하였다.

스케일은 파울링 계수를 측정하여 그림 6에 나타내었다. 파울링 계수의 최대와 최소치는 각각 $7.4x10^{-5}$ 와 $1.5x10^{-5}$ $m^2h^oC/kcal$를 나타내었으며 평균적으로 $3.5x10^{-5}$ $m^2h^oC/kcal$를 나타내어 관리 기준치[5] $5x10^{-4}$ $m^2h^oC/kcal$의 7 % 수준으로 상당히 낮은 수준을 보여 하나로 2차 냉각수는 스케일이 잘 관리 되고 있는 것으로 판단하였다.

고경도 수질관리의 가장 어려운 점은 경도값이 높을수록 탄산 칼슘 피막 형성이 용이하여 금속의 보호막을 형성하므로 내부식은 좋지만 스케일이 되기 때문에 최적한 상태의 수질관리가 요구된다. 금번 시험 결과 하나로의 2차 냉각수는 부식도와 파울링 팩터가 모두 낮게 유지되는 것은 수질관리 방식이 적절한 것으로 판단된다.

슬라임과 슬러지의 장해는 바이오 파울링 계수로 표시하여 그림 7에 나타내었다. 바이오 파울링은 0에서 0.027까지 변하였으며 평균 0.0075를 나타내어 관리 기준치[5] $1x10^{-2}$의 약 75% 수준으로 적절히 관리되고 있다. 그러나 최대값은 유속이 0.3m/s일 때 관리 기준값을 상회하였다.

이는 관련 자료[6]에 의하면 유속이 0.3m/s이하에서는 침적이 생기기 쉬운 것으로 보고되고 있는 것과도 잘 일치한다. 이러한 현상은 하나로가 장기간 정지되는 경우에는 주기적으로 2차 냉각펌프를 가동하는 경우 이물질의 침적효과를 억제할 수 있어 슬라임 및 슬러지를 효과적으로 억제할 수 있다.

4.2 세균수

수질 관리에 있어 미생물이 생존해 있는 경우 슬라임 방생의 주요 원인이 되므로 살균제를 투여하고 있다. 금번 실험기간 중에 일주간 세균수를 검사하였으며 검사 표본을 그림 8에 나타내었다. 세균은 빨간색으로 표시되며 제작자의 검사 방법[7]에 따라 판단하면 세균수는 10^3개 이하를 유지하여 관리 기준치인 10^4개 이하로 유지되고 있다. 세균은 살균제를 투여하면 박멸되지만 그 이후에는 점차 증가하였으며 이는 냉각수의 따뜻한 온도가 미생물이 서식할 수 있는 좋은 조건을 제공하기 때문이다.

4.3 냉각수 수질 분석

실험기간 중에 냉각수 수질을 24 시간 간격으로 분석하여 표 2에 수질 관리 인자별로 수치를 기술하였다. 전반적으로 수질관리 인자는 관리 기준치 아래에서 유지되고 있어 안정적으로 수질이 관리되고 있다.

고경도 수질 관리에서 우려되는 점은 탁도이다. 하나로의 2차 냉각수는 증발에 의해 이물질이 농축되며 취출을 하지 않으면 탁도가 42도까지 상승하는 것이 예측[2]된 바 있다. 슬라임과 슬러지의 발생을 억제하기 위해 여과장치를 설치하고, 탁도를 5도 이하[6]로 관리하고 있으며 실제 측정치는 2.2도를 나타내어 관리 기준을 만족하고 있다. 그리고 부식 상태를 나타내는 전철 (Total-Fe)이 기준치의 약 10% 수준이므로 냉각계통 내에서 부식은 무시할 수준이다.

금번 실험에는 시수를 사용한 상태이므로 농축도가 약 5.5 정도를 나타내지만 비용절감을 위해 하나로 주변에 있는 소류지로부터 용수를 공급 받을 경우에는 소류지 물의 칼슘 경도가 시수의 것 보다 낮아 소류지물을 사용하는 경우에는 농축도 12를 상회한다.

Table 2 Water Quality

Description	1	2	3	4	5	6	7	AVG	Control Limit
Turbidity (deg.)	2	2.6	1.1	1.7	3.3	2.4	2.5	2.2	20>
PH @25 ^{O}C	8.59	8.19	8.2	8.5	8.19	8.25	71	8.3	8.3 -9.0
Conductivity (μS/cm)	659	723	693	677	688	709	682	695	3000>
M -Alkari (ppm)	168	158	160	158	158	160	154	159	125 - 400
Ca -Hardness (ppm)	195	190	188	184	184	188	190	189	150 - 400
Cl^- (ppm)	71	72	74	71	72	75	66	71	300>
Total Fe (ppm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	2>

4.4 장애요인의 변화 추이

금번 실험 외에도 6개월 전에 수질 감지장치에 의해 동일한 방식으로 수질 관리의 장해 요인을

측정하였으며 금번 실험과 비교하여 표 3에 나타내었다. 지난 실험과 비교해 볼 때 부식도와 탁도가 약 10% 증가하였으나 기준치 보다 훨씬 낮은 값이므로 큰 의미를 부여하지 않았다. 세균수는 지난 검사와 마찬가지로 관리 기준치 이하를 나타내었다. 제작자의 미생물 균수에 대한 판정기준[7]에 의하면 10^3개 이하에서는 슬라임의 장애가 거의 없는 것으로 판정하고 있다. 금번 실험에서 나타난 바와 같이 살균제를 투여하는 경우에는 균수가 격감하지만 시간이 경과할수록 증가함을 보이고 있다. 특히, 하절기에는 미생물의 번식이 왕성하므로 지난해 여름에는 주간 단위로 미생물의 수를 측정하여 살균제의 농도를 80 ppm에서 100 ppm으로 늘려 관리하였다.

실험 결과, 모든 장해 요소가 관리 기준치 이하에서 관리되고 있어 하나로의 2차 냉각수는 안정적으로 수질이 관리되고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 3 Results of examinations

Description	Control Limit	1st Test	2nd Test
Corrosion Rate (mmd)	20 >	1.83	2.18
Fouling Factor ($kcal/m^2h$)	5×10^{-4}>	4.9216×10^{-5}	3.5×10^{-5}
Bio -fouling	0.01>	9.68×10^{-3}	7.54×10^{-3}
No. of Microbe (EA/ml)	10^4>	10^4>	10^4>
Turbidity (deg)	20>	2	2.2

5. 결론

하나로의 2차 냉각수는 고경도 수질관리 방법으로 관리하고 있으며 장해 요소인 부식, 스케일, 슬라임 및 슬러지에 대해 수질 감시장치에 의해 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 부식율은 평균적으로 관리 기준치의 약 10% 수준이므로 부식 억제 기능이 유지되는 것으로 판단된다.

2) 스케일은 바울링 팩터로 계산하였으며 평균적으로 관리 기준치의 약 7% 수준으로 잘 관리되고 있다.

3) 슬라임 및 슬러지는 바이오 파울링 계수로 표시하였으며 관리 기준치의 약 75% 범위에서 잘 관리되고 있다.

4) 하나로가 장기간 정지되는 경우에는 주기적으로 2차 냉각펌프를 가동하는 경우 이물질의 침

적효과를 억제할 수 있어 슬라임 및 슬러지를 효과적으로 억제할 수 있다.

5) 냉각수 내의 세균수는 관리 기준치 이하로 관리되고 있으나 계절에 따라 번식율이 다르므로 하절기에는 주기적인 살균이 필요하다.

6) 실험 결과, 모든 장해 요소가 관리 기준치 이하에서 관리되고 있어 하나로의 2차 냉각수는 안정적으로 수질이 관리되고 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

[1] Chul Gyo Seo, et., al.,"Pin Power Reconstruction of HANARO Fuel Assembly via Gamma Scanning and Tomography Method", Reactor", J. of KNS, Vol. 33, No. 1, p. 25, 2001.

[2] Y. C. Park, et. al., "Minimizing Secondary Coolant Blow down in HANARO", 원자력학회, 2000년 추계학술발표논문집, 2000. 10.

[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] Prime Tech. International, "Real-time Cooling Water Diagnosis Equipment", Realtech, GM-1000, MCE-003, 1999.11.

[5] Iwata, Osamu, et. al., "Kurita Handbook of Water Treatment", Kurita Water Industrials Ltd., 1985.

[6] KURITA Ind. Co., "冷却水에 發生하는 障害의 原因", 1996. 3.

[7] Orion Diagnostic Inc., "EASICULT-TTC Manual".

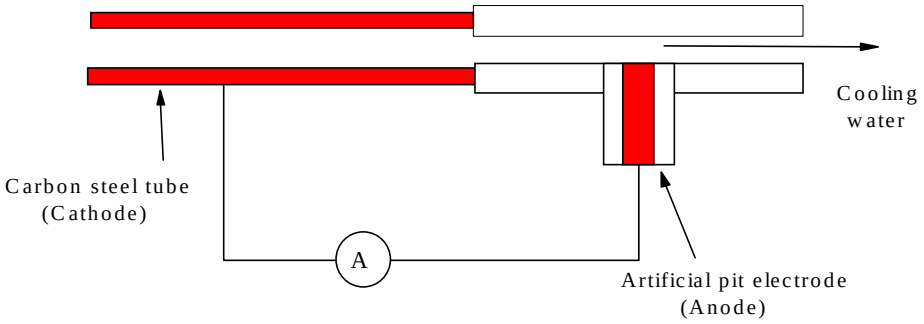

Fig. 1 Artificial anode and cathode

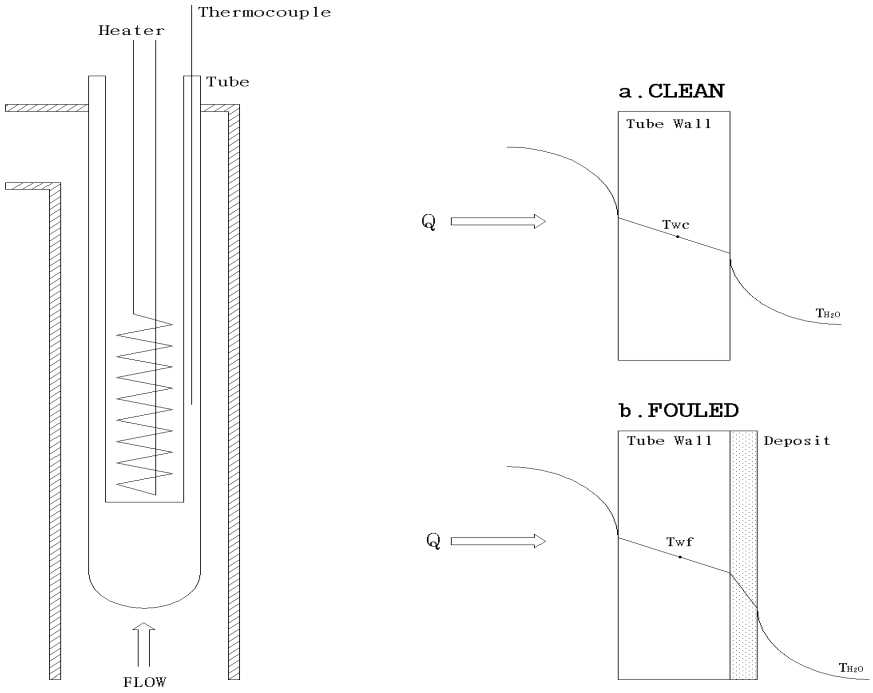

Fig. 2 Schematic diagram of fouling factor

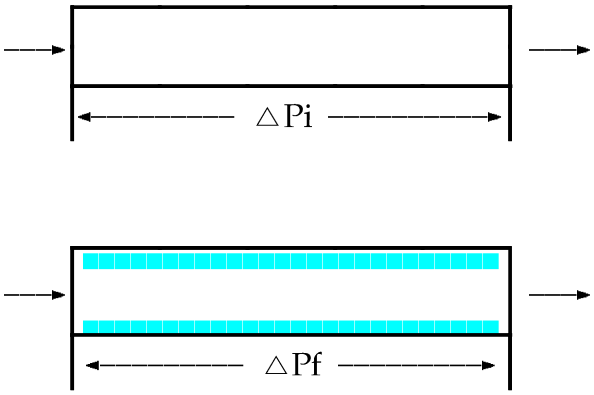

Fig. 3 Bio-fouling test tube

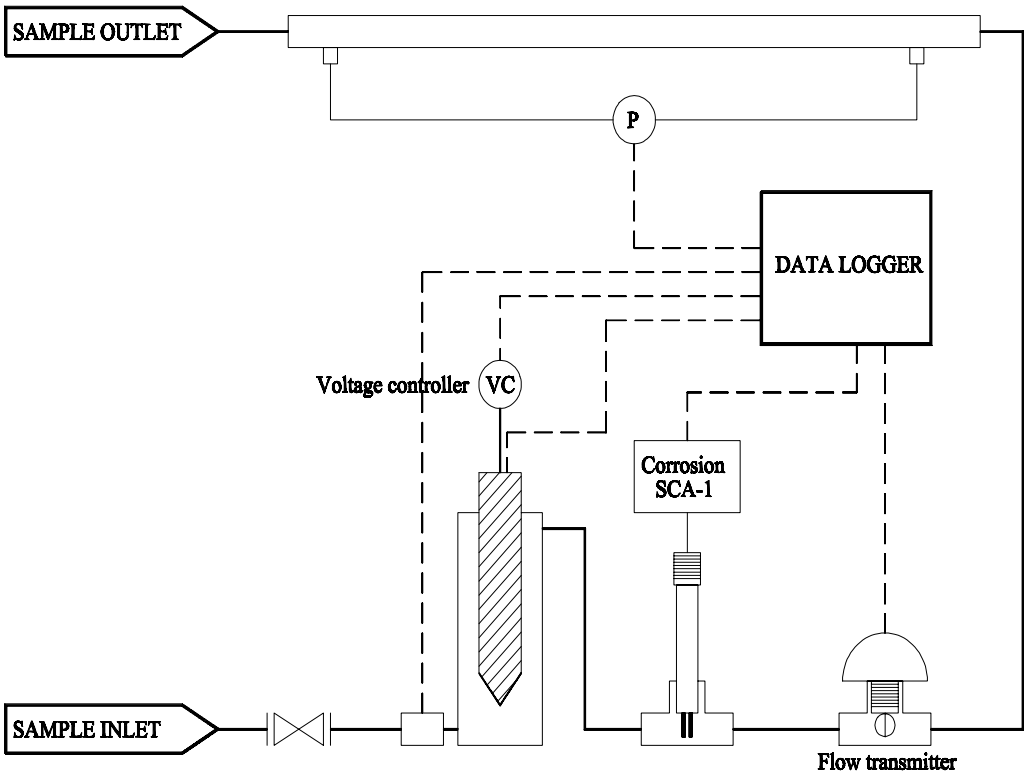

Fig. 4 Schematic diagram of monitoring equipment

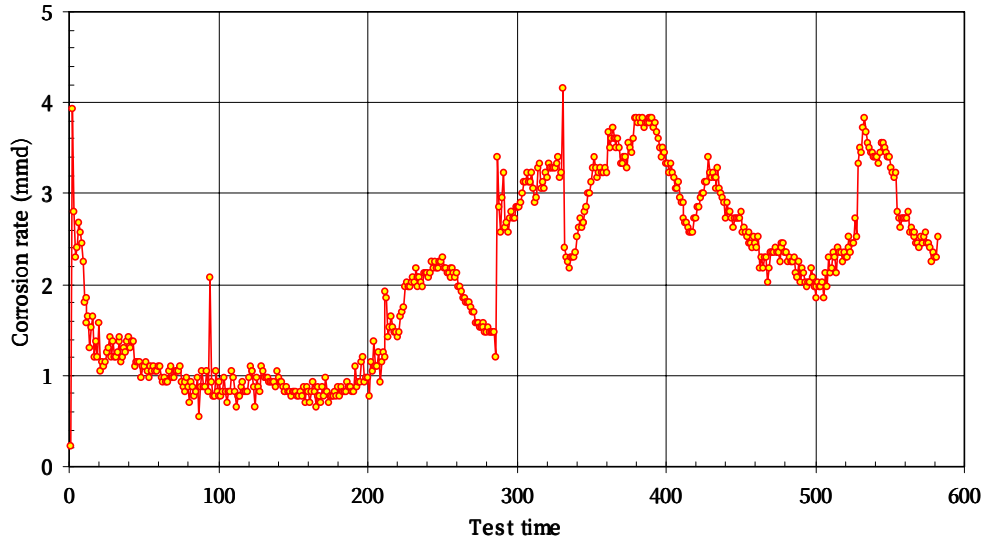

Fig. 5 Corrosion Rate

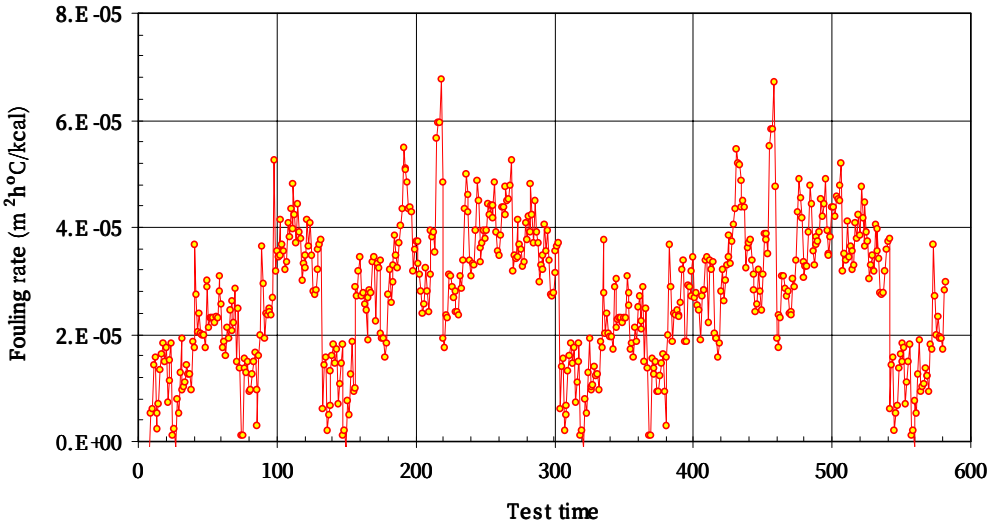

Fig. 6 Fouling factor

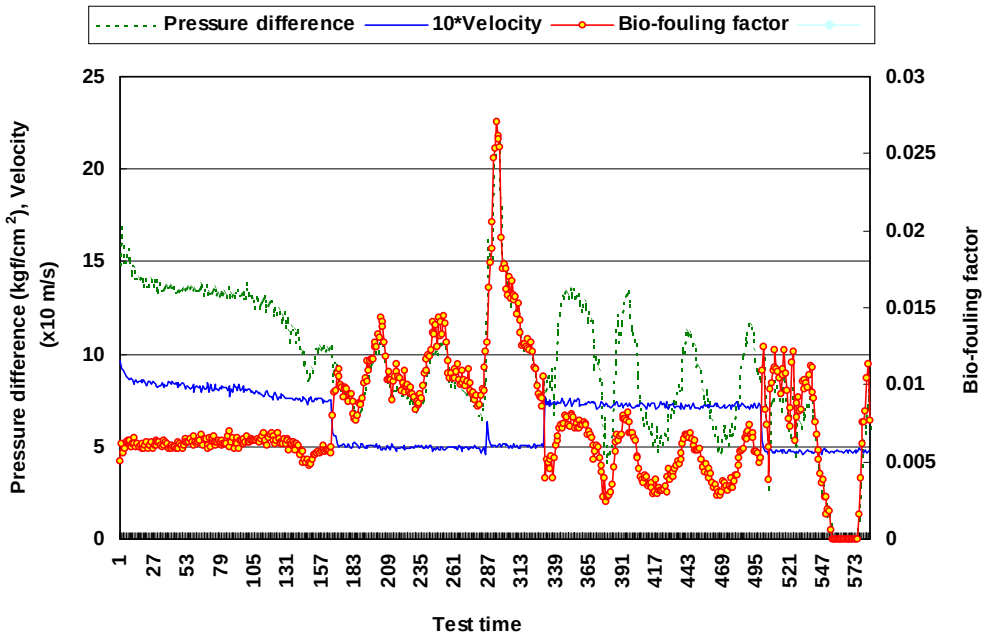

Fig. 7 Bio-fouling Factor

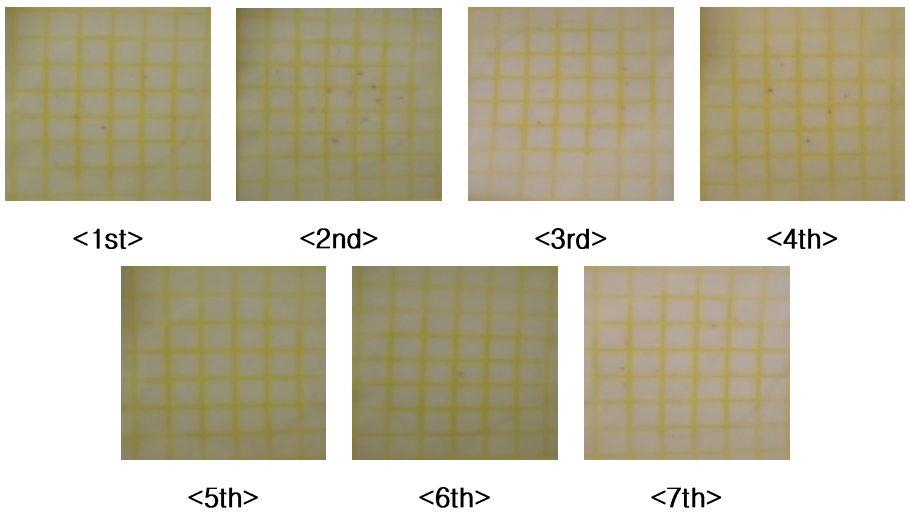

Fig. 8 Number of microbe