

2003 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

하나로 2차 냉각수의 고경도 수질관리 효과

The effects of High-Ca Hardness Water Treatment for Secondary Cooling Water in HANARO

강태진, 박용철, 황승렬, 임인철, 최호영

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

2001년 3월부터 하나로 2차 냉각수의 수질관리는 저경도에서 고경도 관리 방식으로 변경하였다. 하나로 고경도 수질관리는 2차 냉각수의 취출수를 최소화하여 냉각수의 칼슘 경도를 12로 유지하는 방식이다. 본 논문에서는 수질관리 방식을 변경 한 후의 경비 절감 효과를 분석하였다. 그 결과, 보급수를 시수 대신에 연구소 소류지 물로 대체하여 용수의 사용량과 경비는 25% 절감하였고, 화공약품의 사용량과 비용은 각각 40%와 10% 절감할 수 있었다.

Abstract

Water-quality control of the second cooling system in HANARO has been altered from low Ca-hardness treatment to high Ca-hardness treatment since March, 2001. High Ca-hardness water treatment in HANARO is to maintain the calcium hardness around 12 by minimizing the blowdown of secondary cooling water. This paper describes the effect of cost reduction after change of water-quality treatment method. The result shows that the cost of the water could be reduced by 25% using the pond water in KAERI. The amount and cost for the chemical agent could be reduced by 40% and 10% respectively.

1. 서론

30MW 연구용 원자로인 하나로가 운전되는 동안 약 80 m³/h의 2차 냉각수가 증발, 비산 및 취출 등으로 손실된다[1]. 2001년 3월부터 2차 냉각계의 수질관리 비용을 절감하기 위해 순환수 여과 장치를 추가하고 수질관리 방식을 저경도 수질관리에서 고경도 수질 관리 방식으로 변경하였다. 또한, 2차 냉각 계통의 보급수는 시수에서 하나로 주변에 있는 빗물 등이 집수되는 소류지 물을 사용하여 용수를 절감하였다. 본 논문에서는 고경도 수질관리 방식을 적용한 이후의 수질과, 수처리 비용 및 용수절감 효과에 대하여 기술하였다.

2. 수질관리 방법

개방순환 냉각수계는 열교환 이후에 온도가 상승한다. 따라서 증발잠열을 방출 시켜 냉각시킨 후 용수를 보충하여 다시 사용하므로 농축현상에 의해 보급수에 비하여 수배의 용존 염류를 함유하고 있다. 또한 계통 내에서의 체류 시간도 길어 부식(corrosion)장해, 스케일(scale)장해, 미생물(slime/sludge)장해 등이 발생한다. 이와 같은 장해는 냉각수계통의 각종 기기의 성능 저하 및 손상을 가져온다. 따라서 이런 장해를 미연에 방지하여 최소한의 경비로 기기의 성능 저하 및 손상을 최소화 하는 것이 냉각수 처리의 근본 목적이다. 2차 냉각수의 온도 변화와 함유된 이물질에 의한 부식, 스케일, 슬라임 및 슬러지 등의 장해는 필연적이다. 외기에 개방된 2차 냉각수는 송풍기로 강제 냉각시키므로 계절의 변화에 따라 각종 이물질이 유입될 수 있고, 미생물이 번식하기에 적절한 온도를 유지하기 때문이다. 그리고 용존 이온의 농도가 포화 상태가 되면 각종 장해가 활발하게 진행된다. 수처리 방식은 용존이온의 농도를 과포화 상태나 불포화 상태를 유지하여 장해를 억제한다[2].

저경도 수질관리 방식은 용존 이온 농도를 불포화 상태에서 수질을 관리하며, 수처리된 일정량의 순환수를 배출 시켜 용존 이온을 배출하고 새 용수를 받아 희석시켜 농축도를 5 이하에서 관리하므로 수처리 약품과 용수 손실이 크다.

고경도 수질관리 방식은 용존 이온 농도를 과포화 상태에서 관리하며, 순환수의 강제 취출을 최소화하여 용존 이온을 10 이상으로 관리하므로 용수 손실이 저감된다. 그러나 지나치게 농축되면 탄산칼슘이 흡착피막을 형성하여 부식은 억제하지만 스케일을 유발할 수 있다. 각각의 수질 관리 방식에 따른 주요 수질관리 인자의 관리 기준은 표 1과 같으

며 수질관리 방식에 따라 용존 이온의 농도가 다르기 때문에 관리 기준값이 다를 수 있다.

표 1. 수질관리 기준

항목	관리 기준값		
	저경도	중경도	고경도
pH	7.0 ~ 8.0	7.0 ~ 8.5	8.0 ~ 9.0
칼슘-경도 (ppm)	30 ~ 100	50 ~ 200	100 ~ 400
전도도 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2000 이하	3000 이하	4000 이하
탁도 (NTU)	20 이하	20 이하	20 이하
실리카(SiO_4) (ppm)	130 이하	130 이하	300 이하
전철이온(ppm)	2 이하	2 이하	2 이하

3. 하나로의 수질관리 현황 및 분석

3.1 고경도 수질관리 방식으로 변경한 후의 순환수 수질

수질분석은 주 1회 실시[3]하여(저경도 운전은 1999년 8월~2001년 2월, 고경도 운전은 2001년 3월~2003년 8월) 측정된 수질인자 값[4]을 관리방식별로 월별 평균값을 산출하여 분석하였다. 그림 1과 같이 고경도 및 저경도 수질관리 방식에서의 수질인자를 비교하고 그 변화율을 표시하였다.

1) 탁도: 수중의 현탁 물질의 양을 나타내는 지표로 계통내에 현탁물질이 퇴적되면 퇴적물의 하부는 부식이 발생되므로 가능한 낮게 유지해야 한다. 하나로 순환수는 고농축 시 탁도가 상승하게 되므로 이를 조절하기 위해 그림 2와 같이 여과 장치[2]를 설치하였다. 그 결과 탁도는 1.93 NTU를 유지하여 관리기준 값 20 NTU 보다 낮게 유지 할 수 있었다.

2) pH: 적정 수준을 유지하여 부식 및 스케일을 방지하나, 강재는 산성에서, 동재는 산성 및 알칼리성에서 부식이 쉽게 발생된다. 소류지 물을 보급수로 사용하면 시수 보다 순환수의 pH가 높게 유지되지만 관리 기준값 8.0~9.0 이내로 유지되고 있다.

3) 전도도: 전도도가 높은 물을 냉각수로 사용하면 계통내 부식성이 증가한다. 고경도 운전에서는 저경도 운전 보다 1.5배 상승한 평균 1009 μ S/cm 이지만, 관리기준 값 4000 μ S/cm 이하에서 유지되고 있다.

4) M 알카리도: 탄산 칼슘의 스케일 생성 경향이나 방식제의 방식 피막 형성에 중요한 인자이다. 고경도 운전에서는 저경도 보다 1.9배 상승한 평균 229 ppm이지만, 기준값 125~400 ppm 범위에서 유지되고 있다.

5) 칼슘 경도: 농도가 낮으면 부식성이 높으면 탄산칼슘의 스케일성이 강해진다. 다른 수질 인자와 연관하여 집중적으로 관리하는 인자로 농축도의 지표로 이용되며, 수중에 방식제와 결합하여 방식 피막 형성에 중요한 인자가 된다. 저경도 관리 때 보다 1.8 배 높은 평균 266 ppm 이지만 관리 기준값 125~400 ppm 이하에서 유지되고 있다.

6) 염소이온: 냉각수계에서 강한 부식성을 나타내며 스테인레스 강에서 응력, 부식 및 균열의 원인이 된다. 저경도 관리 때 보다 1.5 배 높은 101 ppm 이지만 하나로는 300 ppm 이하에서 유지되고 있다.

7) 농축도: 순환수의 계통내 체류 시간을 나타내는데, 농축도가 높으면 높은 만큼 순환수의 강제취출을 최소화 할 수가 있다. 고경도 관리 때에는 강제 취출을 최소화 하였기 때문에 저경도 관리에 비하여 1.74 배 높은 10.87로 유지되고 있다.

결론적으로 농축도, 칼슘 경도, 전도도, M 알카리도는 저경도 관리 때와 비교하여 높게 유지되어 관리기준 값 이내에서 적절히 관리되고 있으며, 현재의 농축도는 12를 기준으로 관리하고 있다. 그 이상으로 농축하는 경우에는 칼슘경도가 상승하여 스케일을 유발할 수 있으므로 이를 방지하기 위해서는 여과기의 역세 주기를 조절하여 배출시키고 있다.

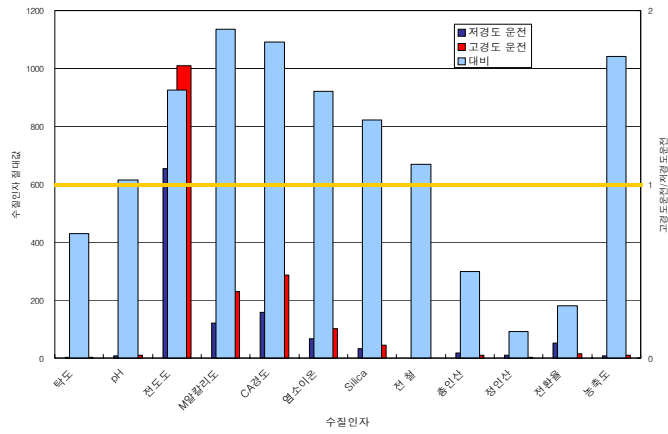


그림 1 . 고경도 및 저경도 방식의 수질 특성

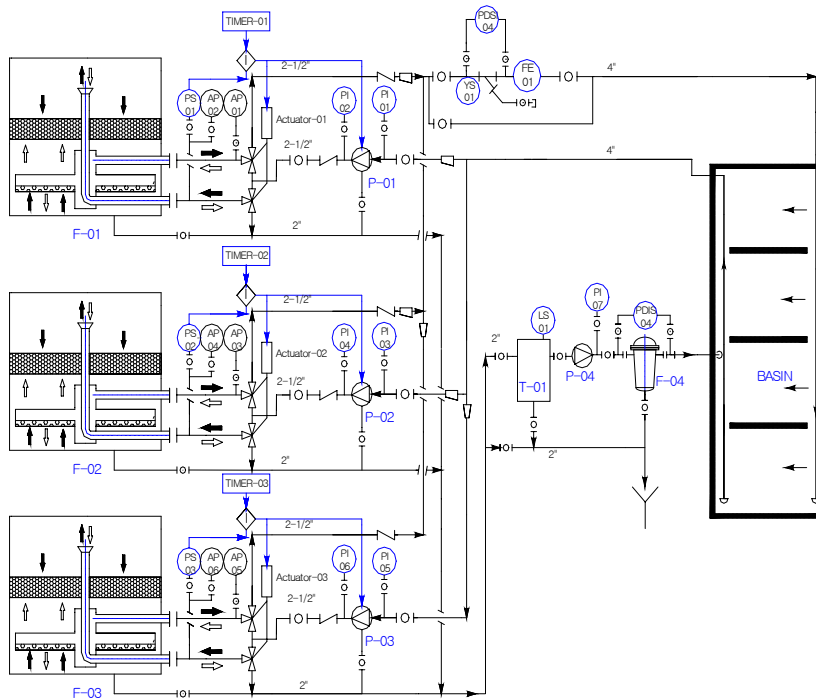


그림 2. 2차 냉각수 여과 장치 계통도

3.2 수처리약품저감효과

표 2는 수질관리 방식의 특성을 비교한 것이다. 표와 같이 저경도일 때는 부식경향이 높고, 고경도 일때는 스케일 경향이 높다. 냉각수의 부식 방지는 인산과 칼슘 경도를 이용하여 아주 얇은 방식 피막을 형성하므로 모재(탄소강)와 냉각수 중의 산소와의 접촉을 차단하여 부식을 방지한다. 따라서 저경도 일때는 부식방지에 주안점을 두지만 고경도 일때는 스케일 방지에 중점을 둔다. 또한 약품은 칼슘 경도와 상호 보완 관계를 가지므로 칼슘 경도를 이용하여 피막을 형성한다. 즉, 피막형성은 흡착 피막으로 인산으로 전량 피막을 형성하기보다는 수중의 칼슘과 인산을 이용하여 피막을 형성하므로 경제적이다.

표 3은 수질관리방식에 따라 적용한 약품의 특성[2]을 표시하고 있다. 표에서와 같이 탄산칼슘의 방식피막을 조성하기 위해 인산의 함량을 줄이고, 스케일 방지를 위해 분산제의 양을 증가 시켰다. 그리고 슬라임 방지제에서도 분산제를 증가시켜 스케일 형성을 억제하도록 하였다.

표 4는 수질관리 방식 전, 후의 약품별 사용량 및 금액이다. 저경도 관리방식으로 60개월, 고경도 관리방식으로 33개월 동안의 약품 사용량 및 비용을 월 평균으로 환산하였을 때, 고경도 관리방식의 약품 사용량은 40%, 약품비는 10% 절감되었다.

표 5에는 연도별 출력 당 약품비용을, 그림 3에는 연도별 출력량, 약품 사용량을 나타내었다. 2000년도 약품 사용량이 적은 이유는 고경도로 전환하기 위해 재고 약품을 소진하고 구입을 하지 않았기 때문이다. 약품 사용량은 매년 감소하고 있으며, 약품 사용량 절감율에 비해서 약품비 절감율이 작은 것은 고경도 약품값이 저경도보다 비싸고 또한 매년 약품비가 상승하기 때문인 것 같다. 또한 출력당 약품비는 저경도 운전에서 약 16,000원, 고경도 운전에서 약 4,000원으로 저경도 운전시 보다 73% 감소되었다. 이것은 저경도 운전 시보다 고경도 운전 시에는 원자로 출력을 24MW로 높였을 뿐만 아니라 운전 형태도 바뀌어 운전 일수 및 출력량이 증가하였기 때문이다.

표 2. 수질관리 방식의 특성 비교

항목 관리방식	농축도	칼슘 경도	부식성	스케일성	배출량
저경도	소	소	대	소	대
고경도	대	대	소	대	소

표 3. 수질관리 약품명

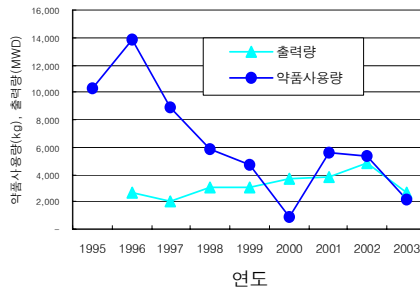
항목	저경도	고경도
부식 및 스케일 방지	KURIZET S-307C	PLUSCLEAN HI-311
주성분	PO ₄ :17.3, Polymer:33, 동방식제:소량	PO ₄ :7, Polymer:50, 동방식제:소량
특징	저/중 경도에 적합	중/고 경도에 적합
살균제	POLYCRIN A-411	PLUSCLEAN ST-332
주성분	R-Cl ₂ > 65	CMIT/Br mixture
특징	- 산화성 - 지속성이 낮으며, 저/중경도에 적합	- 비산화성 - 지속성이 있고, 고경도에 적합
슬라임 분산제	POLYCRIN A-496	PLUSCLEAN ST-331
주성분	N ₂ H ₄ :45, Dispersant:17	CMIT:1.5, Polymer:20
특징	환원성	- 비산화성 - 슬러지 분산제가 포함되어 퇴적형 슬라임 문제에 효과적임

표 4. 약품별 사용량 및 비용

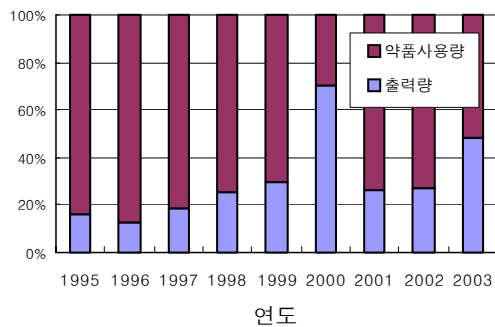
	약품명	사용량(kg)	금액(원)
저경도	KURIZET S-306	33,305	142,810,450
	POLYCRIN A-411	2,290	11,385,900
	POLYCRIN A-496	5,980	52,373,100
	계	45,375	206,569,450
	기간	60개월	
	월 평균	756	3,442,824
고경도	PLUSCLEAN HI-311	5,100	26,938,440
	PLUSCLEAN ST-331	5,000	39,577,790
	PLUSCLEAN ST-332	3,860	35,923,480
	계	13,960	102,439,620
	기간	33개월	
	월 평균 사용량	423kg	
	월 저감율(고경도/저경도)	40 %	10 %

표 5. 연도별 출력당 약품 비용

수질관리	연도	출력량 (MWD)	약품사용량 (kg)	약품비 (천원)	약품비/출력량 (천원/MWD)
저경도	1995		10,260	40,364	
	1996	2,688	13,810	54,850	20
	1997	2,036	8,865	43,551	21
	1998	3,062	5,900	38,170	12
	1999	3,042	4,740	29,634	9
	2000	3,699	840	5,578	2
고경도	2001	3,771	5,560	37,001	10
	2002	4,853	5,380	40,877	8
	2003	2,638	2,180	18,983	7



1. 약품 사용량 및 출력량



2. 구성비

그림 3. 연도별 출력량 사용량 및 구성비

3.3 보급수의 수질 비교

용수 비용을 절감하기 위해 하나로 인근에 있는 소류지 물을 냉각수의 보급수로 사용하였다. 그림 4는 시수와 소류지 물의 화학적 특성을 나타낸 것으로 전도도, M 알칼리도, 칼슘 정도는 소류지 물이 낮고 탁도, 실리카, 전철은 시수가 낮다. 전도도, M 알칼리도, 칼슘 정도는 스케일을 유발하는 요인이므로 낮을수록 유리하다. 즉, 고경도의 수질관리는 용존이온의 농도를 과포화 상태로 유지하는 방식이므로 수질인자가 낮을 수록 농축도를 높일 수 있다. 칼슘 정도의 비교에서 소류지 물의 평균은 약 18 PPM 시수 평균은 약 35 PPM으로 약 2배의 차이가 있으며, 이는 농축에서 관리기준 값(최대 400 PPM)에 도달하는데 시수가 빠르다는 뜻이다. 칼슘 정도가 높은 시수는 농도가 낮아도 쉽게 관리기준 값에 도달하지만 칼슘경도가 낮은 소류지 물은 농도를 더 높일 수 있고 환경으로 방출되는 양도 감소시킬 수 있으므로 물을 절약 할 수 있었다. 전도도는 소류지 물이 약 87 ppm 인데 비해 시수는 약 147 이므로 농도를 높일 수 있다. 탁도는 소류지 물이 높지만 약품으로 조정이 안되므로 그림 2와 같이 물리적 방식인 여과기로 제거하였다. 또한 slime의 원인이 되는 유기물이 많으므로 살균 약품을 사용하여 방지하였다. M 알칼리도는 농축되면 pH를 상승시키므로 낮을수록 중성에 가깝다.

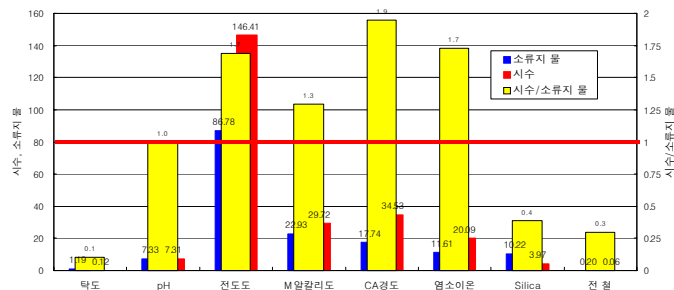


그림 4. 시수와 소류지 물의 수질관리 인자 비교

3.4 보급수 대체 효과

그림 4에서 소류지 물을 시수와 비교하여 탁도가 높기 때문에 이를 조절하기 위해 그림 5와 같이 소류지에서 2차 냉각탑 저주소까지 배관과 여과장치[5]를 설치하였다. 2001년 3월부터 2003년 6월까지 소류지 물 사용량은 약 13만톤으로 시수 대비 25% 절감하였다. 표 6과 그림 6에 연도별 보급수 사용량 및 시수 대비 소류지 물 비용을 나타냈

가

3-4

2

1

가

22MW

24MW

2001

22%, 2002

40%

2003

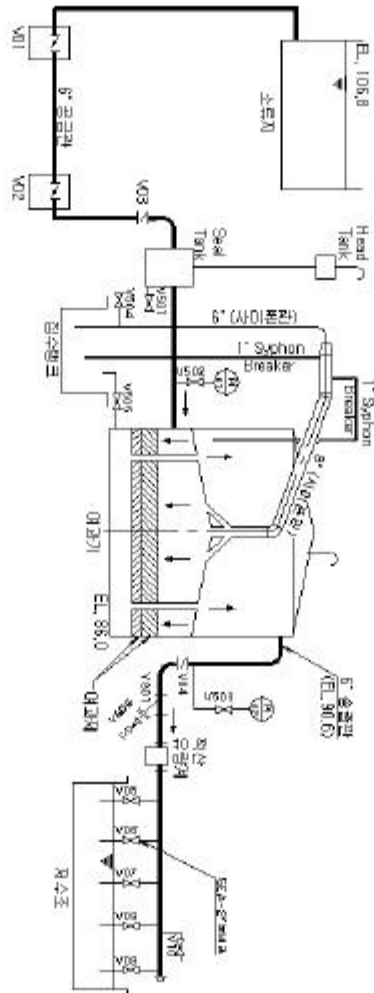
7

44%

가

가

가



5.

표 6. 연도별 시수 및 소류지 물 사용량

연도(년)	시수(톤)	시수(원)	소류지 물(톤)	시수대비 소류지 요금
2000	132,087	138,691,350	0	0
2001	114,325	123,890,850	32,941	35,156,770
2002	94,945	107,287,850	62,187	70,271,310
2003	46,795	58,493,750	36,604	45,755,000

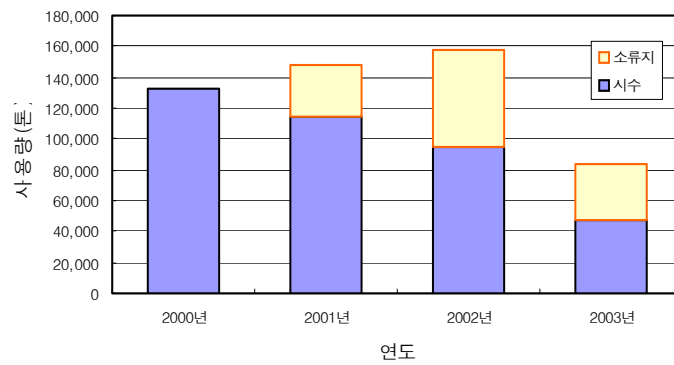


그림 6. 소류지 물 사용량

4. 결 론

하나로 2차 냉각수의 수질관리를 저경도에서 고경도 관리 방식으로 변경하고 소류지 물을 2차 냉각수의 보급수로 사용하였을 때 그 효과를 고찰하였으며 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 저경도로 관리 할 때와 비교하여 수질관리 인자의 각각의 농도는 상승하였으나 관리기준값 이내에서 안전하게 유지되고 있음을 확인하였다.

2. 저경도 관리 때와 비교하여 강제 취출을 최소화 하였기 때문에 수질관리를 위해 투입되는 약품의 사용량은 월 평균 40%, 약품 비용은 10%로 각각 저감되었다.

3. 보급수를 시수 대신에 소류지 물로 대체하여 사용하였을 때, 보급수는 시수와 비교하여 탁도가 높지만 그 외의 수질관리 인자는 농도가 낮다. 현재와 같이 탁도가 관리기준 값 이하로 관리되고 있는 상태에서는 보급수를 고 농축하여 사용할 수 있으므로 용수를 절감할 수 있었다.

4. 소류지 물의 시수 대체율은 약 25%이며 해마다 증가 추세이다. 소류지 물은 자연 조건의 영향을 받으므로 최대한 활용하는 것이 용수 비용을 절감할 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] KOPEC, "Design Manual of Secondary Cooling System", KM-711-DM-P01, KAERI, 1992. 7.
- [2] 박용철 외, "하나로 2차냉각수의 탁도 조절을 위한 여과장치의 성능시험", 한국원자력학회 2002년 춘계학술발표논문집, PP. 129. 1999. 2001. 5
- [3] 하나로운영절차서, HANTAP-05-OD-ROP-OP-04, 한국원자력연구소
- [4] "2002년 하나로 운영", 한국원자력연구소, KAERI/MR-395/2002
- [5] 한국공업표준협회, "공업용수의 시험 방식", KS M 0100, 1988. 8.
- [6] 박용철 외, " 소류지 물을 2차 냉각계통의 보급수로 사용하는 경우 2차 냉각수 수질 평가," 한국원자력학회 2002 추계학술발표회 논문집 PP. 113. 2002. 10