

증기발생기 잠복 불순물 방출시험 데이터를 이용한 틈새 수질 상태 분석

송태호, 정일석, 홍승열
한국전력공사 전력연구원

나정원, 이은희
한국원자력연구소

요 약

발전소 정상운전 및 정지기간 중 2차측 급수를 통하여 증기발생기 안으로 불순물이 유입되며, 운전중에 과열도가 높은 증기발생기 세관과 튜브쉬트등의 틈새에는 불순물의 농축도가 심해지며 이로인해 전열관이 부식손상을 입는다. 잠복불순물은 출력감발 및 정지기간 중에 증기발생기 급수의 냉각에 따라 불순물의 용해도차로 인해 재방출된다. 본 연구에선 89년부터 94년사이에 행하여진 원전 현장의 잠복불순물 방출시험자료를 이용하여 데이터베이스를 작성하였으며, 이중의 일부를 입력자료로 사용하여 Framona 전산코드작업을 수행한 결과 틈새의 pH 변화를 년도별로 비교할 수 있었다. 비교결과 년도가 지날 수록 증기발생기의 틈새에서의 pH는 낮아짐을 볼 수 있었으며 현장의 년도별 증기발생기 세관 관막음수 증가 경향과 잘 일치하였다.

1. 서론.

발전소 정상운전 및 정지기간 중 2차측 급수를 통하여 증기발생기 안으로 불순물이 유입된다. 운전중 증기발생기 세관과 튜브쉬트의 틈새에는 과열도가 높아 불순물의 농축도가 심해지고 장기적으로 부식분위기를 형성해 전열관계료가 부식손상을 입는다. 이로 인해 생성된 틈새 부식생성물은 또다른 화학작용을 가속화해 부식분위기 및 부식반응을 가속화시킨다.

잠복불순물은 출력감발 및 정지기간 중에 증기발생기 2차측 급수의 냉각에 따라 불순물의 용해도차로 인해 틈새 밖으로 재방출된다. 이러한 방출특성을 이용하여 증기발생기 내부로 유입된 불순물의 종류 및 양을 분석하고 증기발생기 내부 수질환경을 파악하기 위한 잠복불순물 방출시험(Hideout Return Test)을 수행하고 있다.[1-4] 증기발생기 세관의 건전성 유지를 위해서는 틈새의 수질환경을 정확히 파악하여야 하며, 잠복 불순물 방출시험 데이터는 증기발생기 틈새 수질상태를 파악하는데 활용자료가 된다[5].

본 연구에선 89년부터 94년사이에 원전 현장에서 행하여진 잠복불순물 방출시험자료를 이용하여 데이터베이스를 작성하였으며 이중의 일부를 입력자료로 이용하여 년도별 틈새의 pH 변화를 Framona 전산코드를 통해 도출하였으며, 증기발생기의 년도별 관막음수와 연관시키어 보았다.

2. 국내원전 잠복불순물 방출시험 데이터베이스

2.1 잠복불순물 방출시험

잠복불순물 방출시험은 연차보수공사를 위해 원자로와 터빈을 정지하고 증기발생기 내부 검사 및 정비작업 이전에 일정한 시간주기로 2차 계통 취출수의 시료를 채취하여 2.2절의 화학원소의 함량을 분석한다. 이를 위해 증기발생기 취출수는 최소 유량으로 유지하고, 취출수중의 일부를 시료채취하고 나머지는 외부로 방출한다. 시료채취후 최단시간내에 분석을 수행하여 시료보관에 따른 오차를 최소화 한다. 이온농도등의 측정은 ion chromatograph, pH meter, 전도도계등을 이용하여 측정한다. 시료채취시의 운전변수를 배전반으로 부터 통보받아 원자로냉각재계통 T_{avg} 값등을 기록한다.

2.2 시험자료 데이터 베이스 정립

국내원전의 잠복불순물 방출시험시 시험일자별, 시간별로 측정되는 데이터를 이용하여 증기발생기 2차측 급수 보유량, B/D 질량유량, 이론전도도, 염기도, 각 화학성분 재고량, 각 화학성분의 누적방출량을 화학 방정식을 통하여 계산할 수 있다. 이러한 계산을 현장에선 수(手)계산을 하기 때문에 장시간이 소요될뿐만 아니라 계산의 오류도 발생할 수 있다. 본 연구에선 이를 해결하기 위해, DB Program으로 상용화된 Excell Spread Sheet를 이용하여 계산 프로그램을 작성하였으며 년도별 데이터 베이스를 Table 1과 같은 형태로 구축하였다.

Table 1. Hide Out Return Test Data Base

Date	time	Rx Pwr (%)	RCS Tavg (°C)	S/G level %	S/G 내보수 보유량(m ³)	S/G내부압력(kg/cm)
94-07-14	16:30	94.2	299.7	44.0	101.40	53.8
94-07-14	19:30	94.0	195.0	44.0	101.40	58.0
94-07-14	21:30	50.0	189.0	44.0	101.40	62.0
비중 ton/m ³	S/GB/D질량 유량(t/hr)	이론전도도 μ S/cm	실측전도도 μ S/cm	Na 농도 ppb	K 농도 ppb	Ca 농도 ppb
0.771	3.36	0.162	0.23	0	0	0
0.759	3.30	0.174	0.28	0	1	0
0.755	3.78	0.211	0.35	3	2	7
Mg 농도 ppb	Cl 농도 ppb	SO ₄ 농도 ppb	SiO ₂ 농도 ppb	염기도 ppb as NaOH	누적방출Na (g)	누적방출Cl (g)
0	4.0	7.0	0	-10.330	0	0.3
0	4.3	8.0	7	-10.457	0	0.4
1	4.6	12.0	11	2.079	0.2	0.4

위 표에서 빗금친 부분은 입력데이터를 읽어서 자동으로 계산되어져 나오는 부분이다. 이러한 데이터 베이스 구축의 목적은 증기발생기 건전성 평가의 기본 활용자료를 만들어 향후에 필요할 때 사용하는 것이며, 이 데이터 중 일부를 수질분석 전산코드 입력데이터로 사용하였다. 일례로 다음 Table 2의 데이터들은 다음절에 논술할 Figure 1-d의 데이터 포인트 한 개를 구성한다.

Table 2. S/G Hide Out Return Test Data in July 15, 1995.

Date	Time	Temp(°C)	ppb of each chemical species					
			Na+K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	SiO ₂
94-07-15	18:15	178.0	22.880	180	76	10.5	381.0	541

3. 틈새 관련 전산코드를 이용한 수질상태 평가기술 개발

3.1 수질의 pH 관리

발전소에서 구조물의 부식은 용존산소가 제한치 이내에서 제어될 때 pH가 주요 변수로 작용하게 된다. 그러므로 2차계통의 부식을 최소로 억제하기 위해서는 계통의 pH가 정상운전시, 기동시 및 정지기간중에도 항상 적정제어범위에서 유지될 수 있도록 수질관리를 하여야 한다.

증기발생기 튜브 재질인 Inconel 600의 부식속도는 운전온도인 300℃ 부근에서 pH가 산성범위로 낮아질수록 급격하게 증가하므로 pH가 낮아지지 않도록 운전하여야 한다. 증기발생기 튜브셔트, 튜브지지판의 재질인 탄소강의 부식속도는 pH가 증가함에 따라 떨어지나 pH 9.6 이상에서는 부식률이 다시 증가한다. 따라서 탄소강의 부식률이 최소인 경우의 pH 범위는 9.2-9.6이다[6].

상기의 자료를 종합해보면, 증기발생기 수질의 적정 pH는 약알칼리로 유지함이 건전성 유지에 효과적임을 알 수 있다. 정상운전시 S/G 취출수의 pH는 25℃로 환산했을 때 8.8~9.5가 정상범위로 알려져 있다[7].

3.2. 전산코드를 이용한 증기발생기 취출수의 pH 해석

증기발생기 잠복불순물 방출시험자료의 평가를 수행하는 전산 code로는 EPRI에서 개발한 MULTEQ code와 프랑스 Framatome사가 개발한 Framona code가 있다. 본 연구에서는 후자의 Framona code를 활용하였다.

이 코드의 입력자료로는 이미 설명한 증기발생기 잠복불순물 방출시험(Hideout Return Test, HRT) 데이터가 입력자료로 들어간다. 본 연구에서는 국내 한 원전에서 89년부터 94년 사이에 걸쳐 실시된 4회의 HRT자료를 통해 전산코드 작업을 수행한 결과 Figure 1과 같은 내보수 pH값을 얻을 수 있었다.

Figure 1의 CF는 농축도(Concentration Factor)를 의미한다. 농축도의 크기에 따라 수질분석 위치가 결정된다. 즉, 농축도가 1이면 증기발생기의 급수(bulk water)의 pH에 해당되며 농축도가 1 보다 크면 틈새(crevice)의 pH를 말하게 되는데, 틈새가 좁으면 좁을수록, 유량(flow)이 작으면 작을수록, 온도가 높으면 높을수록 이 농축도는 커지게 된다. 증기발생기의 튜브와 튜브 셔트, 튜브와 튜브 지지판 사이 등의 틈새에서는 급수(bulk water)에 비해 유량(flow)이 작고 온도도 1차측 온도와 유사한 300℃ 부근이 된다. 따라서 이러한 곳에서의 이온의 농축도는 급수(bulk water)에 비해 상대적으로 크고 부식의 진행은 바로 이곳에서 이루어지므로 세관 건전성을 평가함에 있어서 틈새에서의 pH는 매우 중요한 화학적 파라미터이다.

Figure 1의 처음 3개의 데이터 포인트들의 평균값을 내어 년도별로 pH 값의 변화를 분석해서 Figure 2에 나타냈다. 처음 3개의 데이터 포인트를 선정한 이유는 이 데이터 포인트들의 시료채취시기의 원자로냉각계통 Tavg값이 300℃ 부근이고 바로 이 시점이 증기발생기 운전시점과 비슷한 조건이기 때문이었다. Figure 2에 의하면, 급수(bulk water)의 pH는 년도에 따라 큰 변화가 없지만 틈새에서의 pH는 년도가 지날수록 산성쪽으로 낮아짐을 볼 수 있다. 특히 94년에 산성화가 심했는데 그 원인으로서는 초기에 SO₄ 이온이 상당히 나온 반면에 Na이온은 발견되지 않은 것에 기인된다고 생각된다.

Figure 3에 년도별 증기발생기 세관의 관막음수를 나타내었다. Figure 3에서 볼 수 있듯이, 틈새에서의 Pitting, Denting, SCC로 인한 세관 손상은 해마다 증가하고 있으며, 틈새의 수질은 악화되었음을 알 수 있다. Figure 2의 년도별 틈새에서의 pH 경향은 Figure 3에 나타낸 관막음수 증가의 원인이라고 추론할 수 있다. 증기발생기 틈새(crevice)에서는 농축도가

급수(Bulk Water)에 비해 훨씬 심하고 Flow는 상대적으로 작으므로, 이러한 틈새에서 산성도가 커질 경우, Cl^- , Cu^{2+} , O_2 와 같은 불순물이 튜브 지지관 틈새의 탄소강 재질에 비보호성 피막(Fe_3O_4)의 형성을 촉진시키며 Denting 현상을 유발한다. 이러한 증기발생기 세관손상은 관막음 조치에 이르게 된다고 볼 수 있다.

이 논증의 신뢰도를 검증하기 위해서는 비교대상 시료채취가 각 년도별로 이루어질 때 동일한 조건이었나를 Check해 볼 필요가 있으며, 년도별 시료 채취가 된 시점 및 그 때의 원자로냉각재계통 T_{avg} 값, 증기발생기 급수 보유량을 Figure 4, 5에 나타내었다.

증기발생기 틈새에서 방출되는 불순물들은 용액의 온도에 크게 의존한다. 온도가 낮을수록 용해도는 작아지며 방출되는 양은 많아지게 된다. 급수 보유량은 증기발생기 수위를 나타낸다. 증기발생기 수위가 낮아질 경우 지속적인 증발로 인해 방출된 불순물의 재잠입이 일어나고 Na^+ 와 Cl^- 와 같은 방출되는 이온의 농도가 감소한다. 낮은 수위를 회복하기 위해 보조급수 펌프를 가동하여 순수를 보충하므로, 이에 따라 수류의 교란 및 온도가 강하여 증기발생기 내부에서 물의 대류의 영향으로 Na^+ , Cl^- 등이 재방출된다. 따라서 각각의 비교대상 시료채취시 증기발생기 수위 및 원자로냉각재계통 T_{avg} 값이 서로 다르지 않도록 유지하는 것이 실험결과와 신뢰도를 높이는 길이다.

이번 분석결과는 년도별 시험 조건이 조금씩 다름에도 불구하고 세관손상으로 인한 관막음수의 경향을 잘 보여 주고 있다. 향후에 틈새에서의 화학종의 농도를 비교한다면 관막음수와 틈새이온농도와 상관관계를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 전산코드를 이용한 틈새에서의 화학환경분석은 증기발생기 건전성 유지를 위해 향후에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

국내 원전 잠복불순물 방출시험자료를 이용하여 증기발생기 급수 보유량, B/D 질량유량, 이론전도도, 염기도, 각성분 재고량, 각성분의 누적방출량을 계산하여 데이터 베이스를 작성하였다.

국내의 한 원전에서 89년 부터 94년사이에 걸쳐 실시된 4회의 HRT자료를 통해 Framona 전산코드 작업 수행결과 년도별 pH변화를 도출할 수 있었다. 비교결과, 년도가 지날수록 증기발생기의 틈새에서 pH는 낮아짐을 볼 수 있었으며, 현장의 년도별 증기발생기 세관 관막음수 증가 경향과 잘 일치하였다.

References

1. 고리 제1발전소, "증기발생기 잠복불순물 시험결과 보고서(고리 1호기)" 1994.
2. 고리 제1발전소, "증기발생기 잠복불순물 시험결과 보고서(고리 1호기)" 1993.
3. 고리 제1발전소, "증기발생기 잠복불순물 시험결과 보고서(고리 1호기)" 1989.
4. 고리 제1발전소, "증기발생기 잠복불순물 시험결과 보고서(고리 2호기)" 1992.
5. 고리 제2발전소 화학부 수질관리과, "고리 3,4호기 2차계통 수질관리 평가", 제7회 원전화학분야 경험사례 발표집, 1994년도.
6. 증기발생설비, 한전 원자력연수원, 1988.
7. 원전수명관리 연구 제 10 차 분기보고서, 전력연구원, 1996.

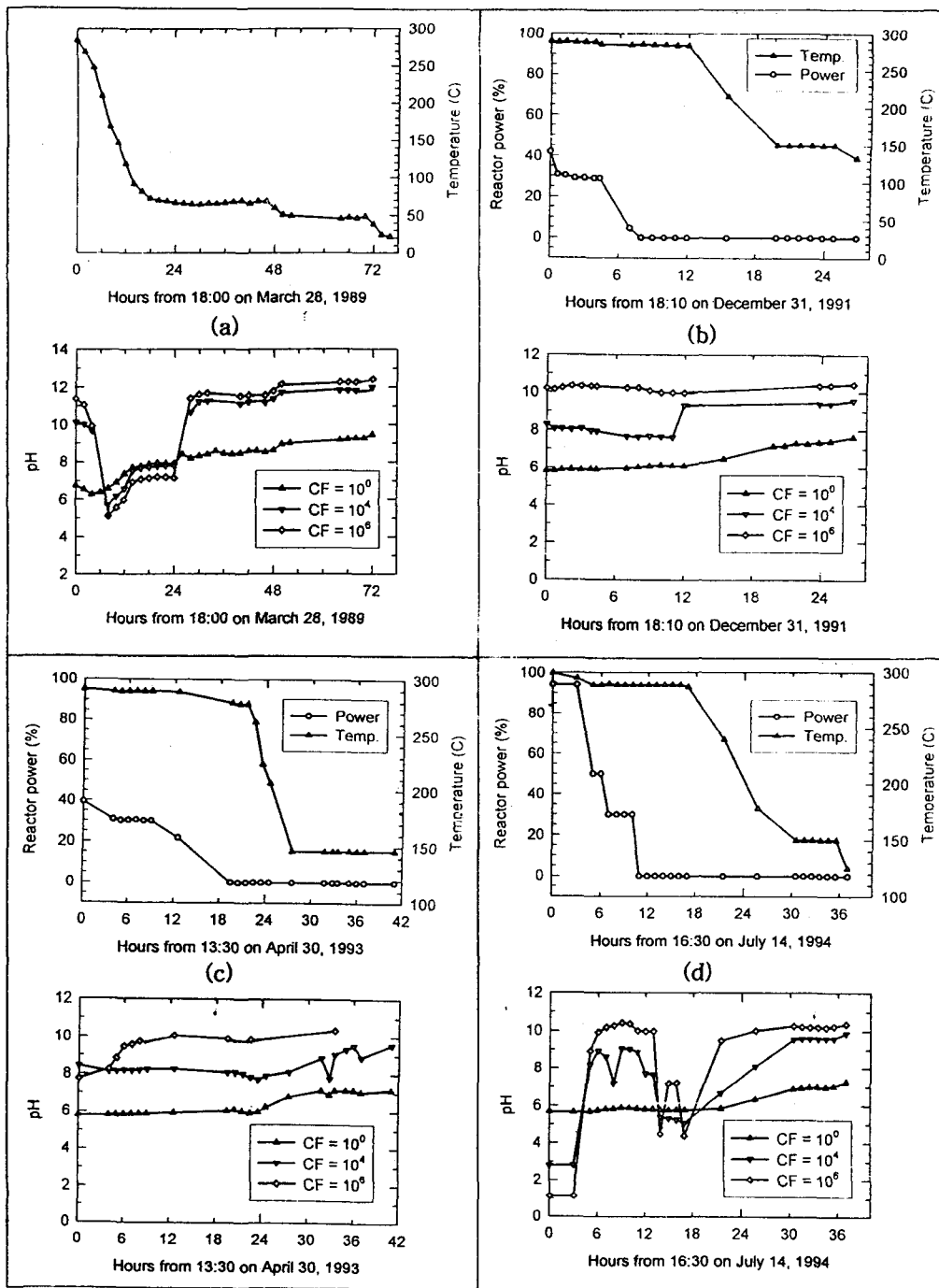


Figure 1. The pH variations calculated by FRAMONA with the use of Hide Out Return Data. (a) March 28, 1989, (b) December 31, 1991, (c) April 30, 1993, (d) July 14, 1994.

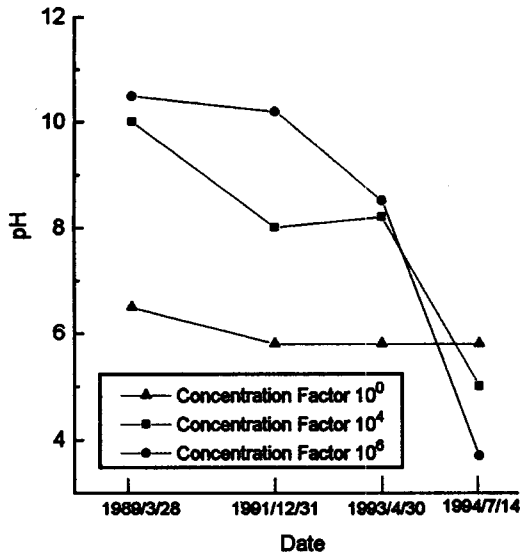


Figure 2. pH variations of steam generator secondary water with the NPP aging

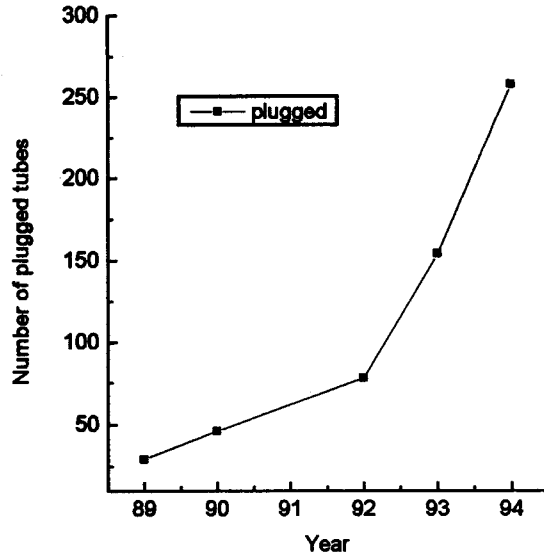


Figure 3. Increase in the number of plugged S/G tubes with the NPP aging

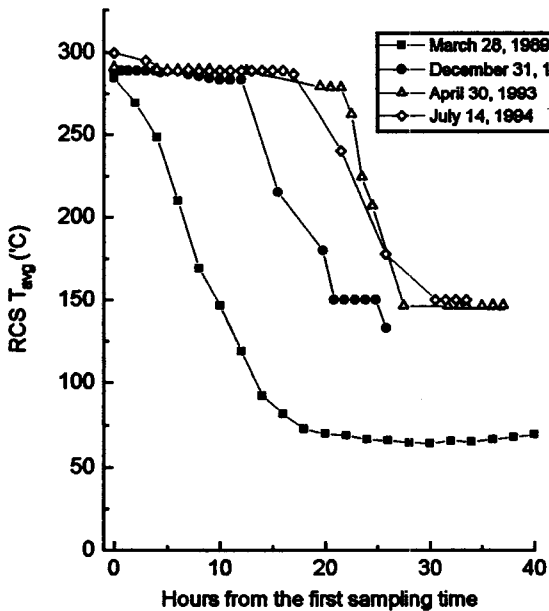


Figure 4. Comparing of RCS T_{avg} with each other.

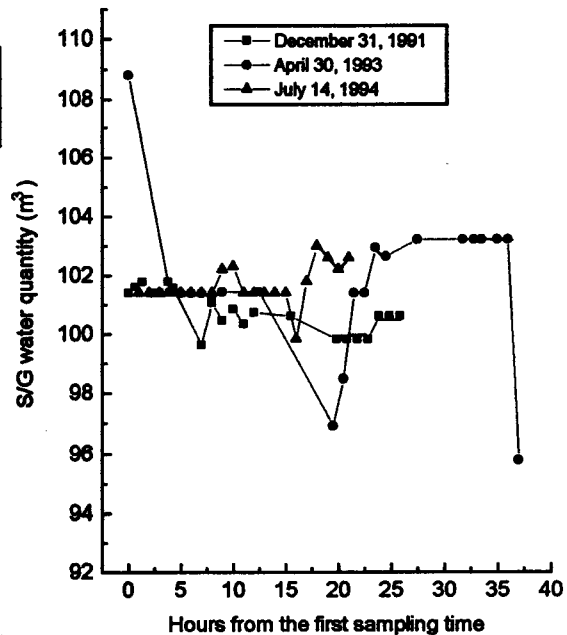


Figure 5. Comparing of S/G water quantities with each other