

고리 1호기 붕산수저장탱크의 농도 조정 및 안전주입 기능제거
Reduction of Boron Concentration and
Elimination of SI Function on BAT for Kori Unit 1

송동수

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

김영구, 이재일

한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493

이순민, 김태운

한국전력기술주식회사
경기도 용인시 구성면 마북리 360-9

요 약

고리 1호기의 붕산수저장탱크(BAT : Boric Acid Tank)는 20,000 ppm의 고농도 붕산수를 저장하고 있어 계통내 밸브의 손상, 붕소석출로 인한 배관/필터의 막힘 및 보온설비계통의 운전 등과 같은 붕산수 관련계통의 유지·보수에 상당한 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 BAT의 붕산수 농도를 운전 및 안전에 적합한 낮은 붕소농도(고리 1호기 경우 최적 붕소 농도는 14,000ppm)를 유지하여 정상 운전 중에 쉽게 이용하도록 하고자 한다. 그리고 BAT 기능변경 사항으로 안전주입신호 발생시 주입되는 붕산수도 기존 BAT 20,000ppm의 고농축 붕산수가 주입되던 것을 RWST 2,400ppm의 낮은 농도의 붕산수가 직접 주입되도록 변경하였으며, 이에 따른 계통분석 및 안전해석을 수행하였다.

Abstract

The Boric Acid Tank(BAT) of Kori Unit 1 stores 20000ppm boric acid. The BAT is used in the boration of reactor coolant for the change of operation mode in normal operation and also used as a boron source for Emergency Core Cooling System(ECCS). Since the concentration of BAT is relatively high, it causes much difficulty in operation and maintenance to prevent the boron precipitation. Therefore, the reduction of BAT boron concentration is demanded. Safety Analyses were performed in order to design change relating to above two items.

1. 서 론

고리 1호기의 붕산수저장탱크(BAT : Boric Acid Tank)는 20,000 ppm의 고농도 붕산수를 저장하고 있으면서 정상운전 중 운전모드 변경에 따른 노심의 붕산 농도 조정 시 이를

이용하고 있으며, 사고 발생 시에는 비상노심냉각계통(ECCS: Emergency Core Cooling System)의 안전주입을 위한 붕산수 탱크로도 사용되고 있다. 일반적인 국내 웨스팅하우스(WH)형 발전소의 경우 정상운전 중일 경우에는 약 7,000 ppm의 붕산수가 저장되어 있는 BAST(Boric Acid Storage Tank)가 사용되고, 사고 시에는 약 20,000 ppm의 BIT(Boron Injection Tank)를 이용하고 있다. 반면, 고리 1호기는 BAST와 BIT 기능을 1개의 기능으로 통합된 BAT가 사용되고 있는 특별한 경우의 발전소이다. 이로 인해 매주기 운전중 고농도의 붕산수저장탱크 운전으로 계통내 밸브의 손상, 붕소석출로 인한 배관/필터의 막힘 및 보온설비계통의 운전 등과 같은 붕산수 관련계통의 유지·보수에 상당한 어려움이 있어 설계 개선이 절실히 요구되고 있다. 그리고 붕소 석출을 방지하기 위하여 Heat Tracing으로 탱크 및 배관을 약 68°C로 가열하고 있다.

이러한 문제점을 완화하기 위하여 BAT의 붕소 농도를 낮추어 BAT를 정상 운전 중에만 사용토록 하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 BAT의 붕산수 농도를 국내 다른 WH형 발전소처럼 운전 및 안전에 적합한 낮은 붕소농도(고리 1호기 경우 최적 붕소 농도는 14,000ppm)를 유지하여 정상 운전 중에 쉽게 이용하도록 하고자 한다. 사고 시에 주입되는 붕산수도 기존 BAT 20,000ppm의 고농축 붕산수가 주입되던 것을 RWST 2,400ppm의 낮은 농도의 붕산수가 직접 주입되도록 변경하였는 바, 이로 인해 안전해석에 영향을 미치게 되므로 관련 설계 기준사고에 대한 안전성 분석이 수행되었다.

본 연구 개발 업무는 고리 1호기 FSAR의 설계 기준 사고를 기준으로 하여 핵설계, 안전해석, 열수력설계, 붕소계통 설계, 격납용기 건전성 등이 수행되었다.

2. 붕소계통 설계변경 및 성능평가

가. BAT 붕소 요구량

붕소 주입 계통은 원자력발전소의 정상운전중 상온정지 및 재장전시 발전소 운영기술지침서의 정지여유도(Shutdown Margin)를 만족시키는 충분한 붕산수를 저장하고 있어야 한다. 이를 확인하기 위하여 붕소요구량 분석을 수행하였으며 고리 1호기의 붕산수원으로 사용되고 있는 재장전수 저장탱크(Refueling Water Storage Tank: RWST)와 BAT의 붕산수 체적이 발전소 운영기술지침서의 운전모드별 요구값을 만족하는지를 확인하였다. 그 결과 발전소 정상 운전을 위한 BAT의 요구 체적 및 농도 제한치는 운전 모드 1, 2, 3, 4에서는 14,000 ppm, 2,700 gal, 운전 모드 5, 6에서는 191 gal이 최소 필요한 양으로 평가되었다.

나. RWST 붕소 요구량

고리 1호기는 안전주입시 BAT에서 20,000ppm의 붕산수가 주입되다가 BAT의 저수위 신호가 발생하면 RWST(2,000 ppm)으로 전환되도록 되어있다. 그러나 BAT의 안전주입기능을 제거할 경우 주증기관 파단사고에 따른 안전주입시 RWST의 붕산수가 직접 주입되므로 RWST의 붕소 농도가 기존의 2,000 ppm~2,500 ppm 에서 2,400 ppm~2,600 ppm으로 상향 조정되었다.

다. 저장 수조 pH 평가

RWST의 붕소 농도가 증가됨에 따라 Post-LOCA시 원자로냉각재 계통의 건전성을 보존하기 위해 요구되는 pH 유효범위 만족여부를 평가하였다. 발전소에서 pH를 조절하는 주요 기기로서 Spray Additive Tank(SAT- NaOH 26.6 wt%, 2,000 gal)가 있으며 SAT내의 NaOH 용액이 Post-LOCA시 pH 조정 기능을 담당하고 있다. 발전소 운전 기술지침서에는 pH 8.5 이상이 되도록 요구하고 있으므로 이를 기준하여 RWST 붕소 농도가 증가에 따른 pH 분석을 수행한 결과에 따라, NaOH를 기존의 2,000 gal에서 2,200 gal 으로 상향 조정하였다.

라. Post-LOCA 장기노심 냉각능력 평가

Safety Injection 시 BAT의 20,000 ppm 붕산수가 주입되던 방식에서 RWST의 2,400 ppm의 붕산수가 주입됨에 따라 Post-LOCA의 장기 노심 냉각 능력을 평가하였다. 장기 노심 냉각 능력 평가에는 냉각재, RWST, Accumulator등의 붕산수가 격납건물의 집수조에 혼합되어 있으므로 집수조의 평균 붕소 농도를 계산하여 노심의 미입계 유지여부를 평가하였다. 평가 결과 보수적인 가정으로 계산된 Post-LOCA Critical 붕소 농도는 1,547 ppm이며 이는 Post-LOCA 집수조 붕소 농도 1,746 ppm을 충분히 만족되었다.

노심 붕소 석출 또한 장기 노심 냉각과 관련되어 검토되어야 될 사항이나 고리 1호기의 경우 원자로 상부 공간으로부터는 저압 안전 주입수가, 저온관으로는 고압 안전 주입수가 주입되므로 노심 석출에 의한 장기 노심 냉각에 방해가 되는 현상은 발생되지 않으므로 고온관 안전 주입의 전환은 불필요하다.

마. 안전주입 관련 연동 및 밸브작동 설계변경

기존의 BAT의 안전주입(SI)계통 설계개념은 안전주입 신호 발생시 BAT로부터 고농도의 붕산수를 흡입받아서 안전주입펌프를 통해 원자로계통으로 주입되다가 BAT가 저-저수위(3%)가 되면 밸브가 차단되고, 흡입원이 RWST로 전환되면서 붕산수를 계속 주입하도록 설계되어있다. 그런데 안전주입시 BAT 대신 RWST로부터 붕산수를 흡입받도록 배관회로를 영구적으로 변경하게 됨에 따라 SI 발생시 밸브 8819A/B가 자동으로 열리는 연동 및 BAT 저-저 수위시 연동(밸브 8995A 닫히고 8807A/B 열림)도 제거한다. 이러한 변경에 따라 다음과 같이 BAT의 SI 계통의 line-up을 변경한다.

표 1. BAT 기능변경에 따른 밸브 작동 설계변경 표

밸브번호	변경전	변경후	비 고
8995 A	정상열림	정상단힘	Lock Close
8995 B	정상단힘	정상단힘	Lock Close
8819 A/B	정상단힘	정상단힘	전원차단, Lock Close
8818	정상열림	정상단힘	전원차단, Lock Close
8807 A/B	정상단힘	정상열림	전원 제거

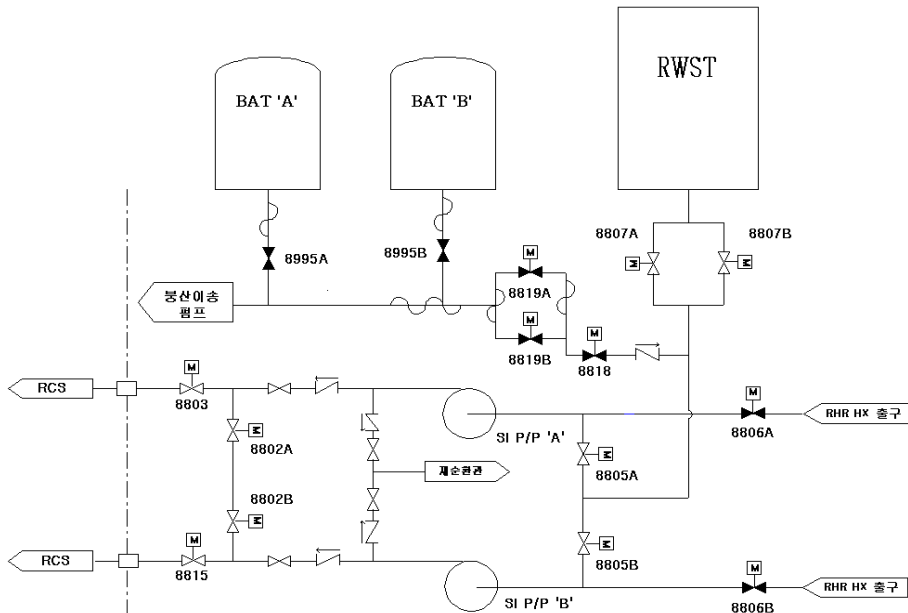


그림 1. BAT 관련 SI 계통 개략도(변경후)

바. BAT 수위제어기 수량변경

기존에 고리 1호기 BAT 당 4개의 수위전송기(Level Transmitter)가 설치되어 있으나 안전기능 및 안전주입신호에 의한 연동 제거시 2개로 줄여도 운전 및 수위제어기능에 문제가 없는 것으로 평가되어 수량을 변경하였다.

아. Heat Tracing 온도설정치 변경

기존의 BAT 농도가 20,000ppm이던 것을 14,000 ppm으로 감소시킴에 따라 Heat Tracing 온도 설정치를 결정하기 위해 온도에 따른 봉산석출온도를 검토하였다. 그리고 석출 여유를 고려하여 다음과 같이 새로운 온도 설정치를 계산하였다.

붕소농도 (%)에 1751을 곱하면 농도(ppm)가 되므로 7.5% = 13133 ppm, 8.0% = 14008 ppm, 8.5% = 14884 ppm 인데 BAT 농도를 보수적으로 8.5%라 가정하면 붕산농도에 대한 일반적인 온도변수는 다음과 같다.

석출(Crystallization)온도 : 105°F (40.5°C) [참고문헌 2]
운전범위 : 130 - 140°F (54.4~60°C)
최소 허용온도 : 125°F (51.7°C)

상기에서 보는바와 같이 최소 허용온도(51.7°C)는 석출온도(40.5°C)에 비해 11°C정도의 여유도를 두고 설정하였다.

3. 주증기관 파단 사고시 질량/에너지 방출량 분석

1) 초기출력 및 파단면적

주증기관 파열사고는 고온대기 상태에서 102 % 출력까지의 출력, 즉 102%, 70%, 30% 및 0 %의 출력 준위에 대하여 사고해석을 수행하였다. 파단유형은 양단파단 (double-ended rupture)과 홈 파단(slot breaks/split breaks)의 경우로 나누어 수행하였다. 홈 파단의 경우는 파단면적에 대한 스펙트럼 해석을 수행하여 증기발생기 저압 및 증기 고-고 유량 신호에 의한 안전주입 및 주증기격리 신호가 발생하지 않는 파단면적 중 가장 큰 경우를 각각의 출력조건에서 선택하여 사고해석을 수행하였다.

2) 액체 유입(entrainment)

대형 파단면적을 갖는 주증기관 파단사고의 경우 액체유입이 발생할 수 있으며 이는 격납용기로 방출되는 에너지양을 감소시키는 효과가 있으나 보수적으로 모든 파단 면적에 대해 액체유입을 고려하지 않고 포화상태에 대한 Moody 모델로 방출률을 계산하였다.

3) 주급수 및 보조급수 유량

완전 파단의 경우 파단이 발생한 증기발생기는 주급수 조절밸브의 완전개방을 가정하여 증기발생기 압력 감소에 따른 최대 주급수 유량을 사용하고, 건전한 증기발생기는 주급수 격리신호 발생 전까지 초기 유량을 유지한다고 가정하였다. 보조급수는 파단이 발생한 증기발생기로 공급되는 관의 보조급수 유량제한 설비의 작동을 가정하지 않고 증기발생기의 압력 변화에 따라 유입될 수 있는 최대 유량을 사용하였다.

4) 공학적 안전설비의 작동

BAT의 안전주입기능을 제거하고 RWST의 최소농도를 2,400 ppm으로 설정할 경우, 안전주입에 의해 재장전수 저장탱크로부터 2,400 ppm의 농도를 갖는 붕산수가 2대(소외전원상 실시 디젤발전기 단일고장의 경우 1대)의 고압안전주입 펌프에 의해 노심에 공급되어 노심의 출력상승을 막고 반응도를 미임계로 유지한다. 주증기격리밸브 및 주급수격리 밸브는 신호발생 후 전기적 지연을 고려하여 7초의 지연시간을 가정하였다. 보조급수는 안전주입신호에 의해 2대의 모터구동 보조급수펌프가 자동으로 기동되며 보수적으로 지연시간을 고려하지 않았다.

5) 운전원조치 시간

운전원의 조치시간은 30분(1800초)을 가정하여 그 때까지 보조급수의 차단 등 운전원 조치가 없는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

6) 반응도계수 및 노심 동특성인자

원자로 감속재온도계수 및 핵연료온도계수 등의 반응도계수와 노심 동특성인자들은 주기말 조건에 해당하는 값들로 가정하였다. 대부분의 사고진행이 원자로 정지 후 조건에서 계산되므로 냉각재 반응도계수는 1개 제어봉을 제외한 모든 제어봉의 삽입조건에서의 값을 사용하고 전체적인 반응도 계산의 보수성은 상세 노심설계 코드를 사용한 계산으로 확인하였다.

7) 주증기관 및 주급수관의 비격리 체적

주증기격리밸브에 의해 격리되지 않을 수 있는 증기관의 최대 체적을 가정하였다. 그리고 주급수조절밸브에 의해 격리되지 않는 주급수관 체적을 가정하여 급수관 내의 유체가 증기 발생기 내부로 급팽창되고 순간기화(flashing)하여 격납건물로 방출되는 현상을 고려하였다.

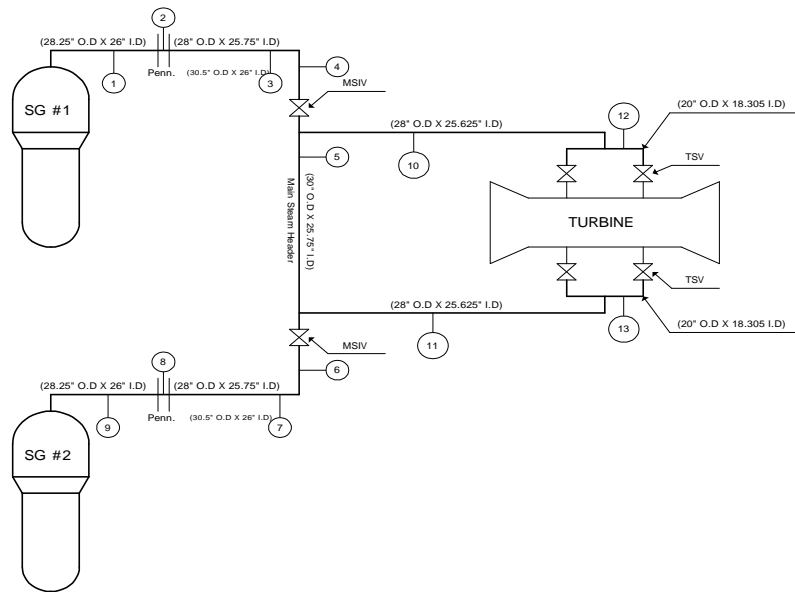


그림 2 고리 1호기 주증기계통 구조

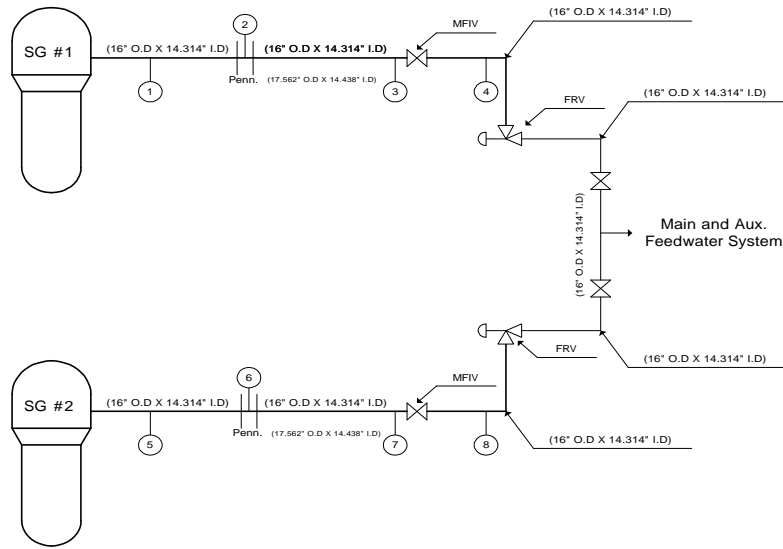


그림 3 고리 1호기 주급수계통 구조

8) 단일고장 및 소외전원

가상적인 2차계통 배관과열에 대한 격납건물의 응답 분석은 격납건물 열제거계통이나 2차계통 격리설비에서 발생하는 가장 심각한 단일 능동 고장에 근거해야 한다.

- 격납건물 열제거계통의 단일고장
- 주증기 격리밸브 고장
- 주급수 조절밸브 고장
- 보조급수 유량제한 설비 고장
- 소외전원 상실을 동반한 비상 디젤발전기의 고장

그림 4는 LOFTRAN code에 의해 계산된 질량/에너지 계산 결과이다.

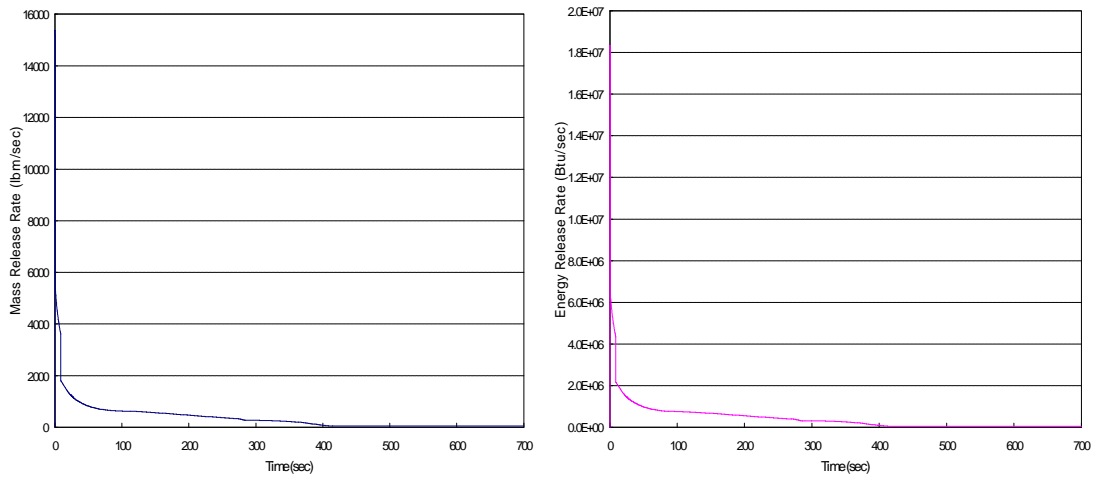


그림 4. Mass/ Energy Release vs. time

4. 격납건물 압력/온도 분석

2차계통 배관과단사고시 붕소농도가 격납건물 압력에 미치는 영향을 판단하기 위하여 붕소농도 20,000 ppm, 12,000 ppm, 2,400 ppm 및 2,000 ppm에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 분석결과 붕소농도가 낮아질수록 격납건물 압력이 증가하는 것으로 검토되었고, 현 고리 1호기 격납건물 설계압력 내에서 수용 가능한 최소 붕소농도는 2,400 ppm으로 결정되었다.

안전주입 붕소농도 24,00 ppm을 고려하여 표 2와 그림 5와 같이 여러 Case에 대한 격납건물 최대 압력/온도 분석을 수행하였으며, 가장 제한적인 경우는 2,400 ppm의 안전주입 붕소농도 경우에 1.4 ft² 양단과단, 30% 출력준위, CSS 상실의 MSLB Case로 평가되었으며, 최대 침투 압력 및 온도는 각각 56.4 psia로 계산되었다. 붕소농도 2,400 ppm의 안전주입을 가정하는 경우 어떠한 2차계통 배관과단에 대해서도 계산된 최대압력은 고리 1호기 격납건물 설계압력(57.7 psia) 이하임이 확인되었다.

표 2. 격납건물 P/T 분석결과

Case No.	Break Case Description	P _{PEAK}		T _{PEAK}		P _{DESIGN-P_{PEAK}} (psi)
		psia	second	°F	second	
1	1.4ft ² Double Ended Break, 102% Power Level, 2400ppm, CSS Failure	54.67	206	339.8	119	+3.03
2	1.4ft ² Double Ended Break, 70% Power Level, 2400ppm, CSS Failure	55.94	248	338.8	123	+1.76
3	1.4ft ² Double Ended Break, 30% Power Level, 2400ppm, CSS Failure	56.36	362	336.7	124	+1.34
4	1.4ft ² Double Ended Break, 0% Power Level, 2400ppm, CSS Failure	53.30	488	331.4	127	+4.40
5	1.4ft ² Double Ended Break, 102% Power Level, 2400ppm, MSIV Failure	54.12	202	338.1	118	+3.58
6	1.4ft ² Double Ended Break, 102% Power Level, 2400ppm, D/G Failure w/ LOOP	46.56	121	312.7	110	+11.14
7	0.98ft ² Split Break, 102% Power Level, 2400ppm, CSS Failure	53.75	374	353.4	138	+3.95
8	0.95ft ² Split Break, 70% Power Level, 2400ppm, CSS Failure	52.54	504	351.8	145	+5.16
9	0.92ft ² Split Break, 30% Power Level, 2400ppm, CSS Failure	50.10	492	347.3	142	+7.60
10	0.80ft ² Split Break, 0% Power Level, 2400ppm, CSS Failure	45.28	208	344.1	202	+12.42
11	1.4ft ² Double Ended Break, 30% Power Level, 2400ppm, MSIV Failure	54.52	338	335.1	122	+3.18
12	1.4ft ² Double Ended Break, 30% Power Level, 2400ppm, AF Control Failure	54.15	372	334.8	123	+3.55
13	1.4ft ² Double Ended Break, 102% Power Level, 2400ppm, AF Control Failure	55.58	254	339.6	122	+2.12

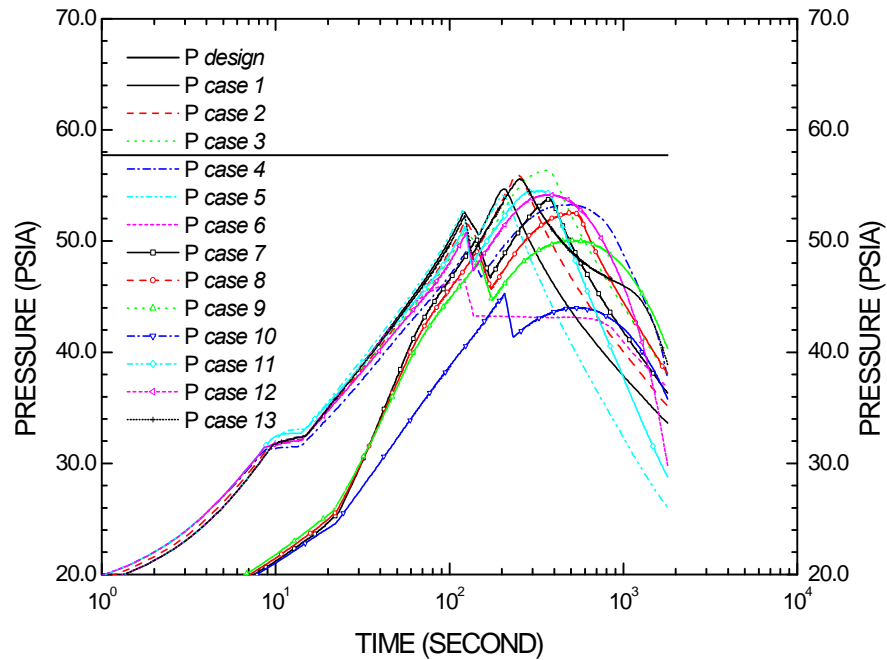


그림 5. 격납건물 압력 분석 결과

5. 결 론

고리 1호기의 BAT 붕소 농도를 기존의 20,000 ppm에서 14,000 ppm으로, RWST 농도를 2,000 ppm ~ 2,500 ppm을 2,400 ppm ~ 2,600 ppm으로 조정하였으며, Safety Injection 시 주입되는 붕산수원도 기존의 BAT에서 RWST로 변경하였다.

또한, 격납용기건전성 평가에서는 1) 격납건물 설계와 관련된 규제요건을 검토하여 고리 1호기 SLB 분석에 적용될 설계기준을 도출하였고, 2) CONTEMPT-LT/028의 분석모델을 구축하고, 3) SLB 질량/에너지를 계산하는 등, WH형 발전소에 대한 국내 최초의 질량/에너지 설계 방법론을 정립하였다.

주증기관 파단사고에 의한 Safety Injection시에 BAT 대신 RWST에서 붕산수가 직접 주입되더라도 주증기관 파단 사고의 노심 안전기준을 만족하였으며, 격납용기의 건전성도 유지됨이 확인되었다.

참고 문헌

- [1] Burnett, T. W., et al., LOFTRAN Code Description, WCAP-7907- P-A(Proprietary), and WCAP-7907-A, April 1984.
- [2] IEEE Std 622-1987 Appendix A "Typical parameters for Boric Acid"