



KR9700087

KAERI/TR-785/96

국내 웨스팅하우스 3-루프형 원전의
냉각재상실사고후 장기간냉각중
붕소석출방지를 위한 운전절차 확립

**Establishment of the Operating Procedure to Prevent Boron
Precipitation during Post-LOCA Long Term Cooling
for Korean Westinghouse 3-Loop NPPs.**

한국원자력연구소

국내 웨스팅하우스 3-루프형 원전의
냉각재상실사고후 장기간냉각중
붕소석출방지를 위한 운전절차 확립

**Establishment of the Operating Procedure to Prevent Boron
Precipitation during Post-LOCA Long Term Cooling
for Korean Westinghouse 3-Loop NPPs.**

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 "국내 웨스팅하우스 3-루프형 원전의 냉각재상실사고후 장기간 냉각중 붕소석출방지를 위한 운전절차 확립"의 기술보고서로 제출합니다.

1996년 11월 30일

주저자: 최 한 립(노심안전해석분야)
공동저자: 권 태 순(노심안전해석분야)
반 창 환(노심안전해석분야)
정 재 훈(노심안전해석분야)
이 영 진(동력로개발팀)

감수위원: 이 원 재
책임감수위원: 김 동 훈

요 약

교체노심의 장주기운전을 함에 따라 노심 잉여반응도 (excess reactivity)의 증가는 냉각재상실사고후(post-LOCA)의 정지여유도 확보를 위하여 재장전저장수탱크의 붕산농도증가를 요구하게 된다. 이의 정량화를 위하여 post-LOCA시 재장전저장수탱크(RWST)의 붕산농도에 따른 post-LOCA 원자로냉각계통/격납용기저수조(RCS/Sump) 혼합평균붕산농도 산출방법이 개발되었으며, 이는 국내 웨스팅하우스 3-Loop형 발전소인 고리3&4 호기와 울진1&2 호기에 적용하였다. 또한 적용결과의 post-LOCA시 재장전저장수탱크의 붕산농도에 따른 post-LOCA RCS/Sump 혼합평균붕산농도를 핵 설계분야의 안전성분석사고인 붕소희석사고(Boron Dilution Accident)시 충분한 정지여유도가 확보되는 재장전저장수탱크와 축압기(Accumulator)의 증가된 최소 붕산농도를 정하게된다. 그러나 이러한 붕산농도의 증가는 post-LOCA시 노심의 기하학적 형상유지를 위하여 방지되어야하는 노심내 붕소석출에 의하여 제한되며, 더구나 재장전저장수탱크와 축압기의 최소붕산농도값에 재장전시 원전운전의 편리성을 갖기 위하여 약 200 ppm정도의 영역값을 더하여 증가된 최대 붕산농도값이 결정된다.

결과적으로 국내 원전에서 12개월 핵연료주기에서 18개월로 장주기 운전시 냉각재상실사고후 장기간 냉각능력을 유지할 목적으로, 증가한 붕산농도로써 노심에서의 붕소석출을 막기위해 Boron코드를 사용하여 고온관 재순환 전환시간을 계산하였다. 해석결과에 의하면, 고온관 재순환 전환시간이 고리3&4 호기는 냉각재상실사고후 24시간에서 7.5 시간으로, 울진1&2호기는 18시간에서 8시간으로 각각 단축되었다. 그리고 고리3&4 호기 모드J의 유로는 울진1&2 호기와 같이 저온관 재순환 모드에서 고온관과 저온관의 동시 재순환모드로 정렬토록하는 것이 바람직하다고 사료된다.

목 차

제출문	1
요 약	2
목 차	3
제 1 장 서 론	4
제 2 장 RWST의 봉산농도에 따른 Post-LOCA시 RCS/Sump의 혼합평균 봉산농도 계산방법개발	6
제 1 절 Post-LOCA시 RCS/Sump 혼합평균 봉산농도 산출방법	6
제 2 절 발전소적용	8
제 3 장 봉소석출을 막기위한 운전절차	10
제 1 절 비상노심냉각계통 설명	10
제 2 절 LOCA 및 Post-LOCA의 ECCS 운전절차	12
제 3 절 LTC 해석방법론	14
제 4 절 해석결과 및 논의	15
제 4 장 결 론	19
참고문헌	20
부 록 [가]	36
부 록 [나]	41
부 록 [다]	46
부 록 [라]	54

제 1 장 서 론

냉각재상실사고후 장기간냉각(long-term cooling:LTC)시 핵설계 안전성분석사고인 붕소희석사고의 정지여유도 확보를 위하여 요구되는 post-LOCA RCS/Sump 혼합평균 붕산농도를 계산하는 방법을 개발하여, 이를 국내 원전 웨스팅하우스 3-loop형인 고리 3&4 호기와 울진1&2 호기 post-LOCA LTC 붕산농도 분석에 적용하였다. 분석은 정지여유도에 큰 영향을 미치는 재장전저장수탱크의 붕산농도를 변수로하여 현 기술 지침서의 최소 붕산농도값과 pre-LOCA시 500 ppm에서 1700 ppm의 RCS 초기붕산농도 범위에 대해 분석되었다. 산출된 post-LOCA시 붕산 농도는 핵설계시 post-LOCA 정지여유도 확보를 위한 주요핵안전상수로서 사용되며, 기술지침서 사항인 재장전 저장수탱크및 축압기등의 붕산농도 결정의 기술적 배경을 제공한다.

장주기 핵연료도입에 따른 노심잉여반응도의 증가는 post-LOCA시 노심의 정지여유도 유지를 위한 재장전저장수탱크와/또는 축압기 붕산농도의 증가를 요구하게 된다. 그러나 이러한 붕산농도의 증가는 post-LOCA시 노심의 기하학적 형상유지를 위하여 방지되어야하는 노심내 붕소석출에 의하여 제한된다.

국내 웨스팅하우스 3-루프형 원전[1][2]의 18개월의 핵연료 장주기운전을 위하여 재장전저장수탱크의 붕산농도는 고리3&4 호기에서는 2000-2250 ppm에서 2400-2600 ppm[3]으로, 울진1&2 호기는 2000 ppm이상에서 2300-2500 ppm[4]으로 각각 증가되어야 한다. 이러한 변화는 장주기운전의 post-LOCA시와 재장전조건시 노심이 미임계상태로 유지되도록할 것이다[5]. 한편, 재장전저장수탱크의 붕산농도 증가는 붕소석출을 야기할 수 있으며, 그 결과로 “post-LOCA의 장기간냉각상태의 노심은 냉각가능한 기하학적 형상이 유지되어야 한다”는 10CFR50.46의 LOCA승인기준[6]을 위배할 수 있다.

LOCA후 붕소석출을 막기위해 붕산농도증가전의 경우 고온관 재순환전환은 고리 3&4 호기는 사고후 약 24시간 때이며, 울진1&2 호기는 약18시간 때이나, 재장전 저장수탱크와 축압기의 붕산농도 증가로 인하여 냉각재상실사고시 최초의 고온관 재순환전환이 되어야할 때를 결정하기위해 전환시간해석을 수행하여야 한다. 이러한 분석을 통해 냉각재상실사고후 원자로용기 노심내의 붕산농도를 알아볼 수 있으며, 재장전저장수탱크와 축압기의 붕산농도 증가를 정량화시킬 수 있다. 본 연구에서는 ABBCE 장기간냉각 해석방법론[7]과 미국내 웨스팅하우스의 적용예[8][9]를 이용

하였으며, 고온관 재순환전환 시간결정을 위해서는 Boron코드를 계산에 사용하였다.

제 2 장 RWST의 붕산농도에 따른 Post-LOCA시 RCS/Sump의 혼합평균 붕산농도 계산방법개발

이 장에서는 post-LOCA LTC시 노심의 정지여유도 확인을 위하여 요구되는 노심 붕산농도를 계산하는 방법을 기술한다. 제1절에서는 post-LOCA RCS/Sump 혼합평균 붕산농도 산출방법을 기술하였으며, 발전소적용 계산과 결과논의는 제2절에 기술하였다.

제 1 절 Post-LOCA RCS/Sump 혼합평균붕산농도 산출방법[10]

1. 적용된 가정들

- 1) 노심수명에서 노심 미임계를 위하여 요구되는 정지반응도는 노심의 반응도가 최대인 연소도에서 최대가 되며, 이는 일반적으로 주기초 (BOC)가 된다. 이 경우 LOCA전(pre-LOCA) RCS 붕산농도가 낮을경우, post-LOCA의 붕산농도가 또한 낮아지게된다. 따라서 핵연료주기에서 최대노심 반응도를 갖는 시기에 대하여 최소예상 모든제어봉인출(ARO) RCS 붕산농도를 사용하는 것이 post-LOCA RCS 붕산농도관점에서 보수적이다. 그러나, 본 분석에서는 일반적인 핵주기에의 적용을 위하여 500 ppm에서 1700 ppm의 pre-LOCA RCS 붕산농도의 범위에 대하여 분석이 수행되었다.
- 2) 비상노심냉각계통의 주 구성요소인 재장전저장수탱크, 축압기 그리고 붕소주입 탱크(BIT)의 초기붕산농도들은 붕산농도 정상운전허용치 영역중 최소값으로 가정한다 (부록[가][나]).

2. 해석방법

- 1) 대용량의 재장전저장수탱크의 붕산농도는 post-LOCA 붕산농도에 가장 큰 영향을 미치므로, 이를 변수로하여 post-LOCA시 RCS/Sump의 혼합평균붕산농도를 결정하도록하는 방법이 적용되었다.
- 2) 축압기와 붕소주입탱크의 초기붕산농도는 보수적으로 운전허용조건 영역에서

최소 붕산농도값을 사용한다.

3) pre-LOCA시 RCS 붕산농도는 500 ppm 에서 1700 ppm 의 영역에 대하여 적용한다.

4) 방법 1)~3)에 의해 각 요소의 초기온도및 체적은 운전허용조건내에서 post-LOCA시 RCS/Sump 혼합평균붕산농도를 최소화(minimize)하는 조합이 되도록 결정한다.

언급된 해석방법 1)부터 4)에 따라 적용된 기본식은 아래와 같다.

$$M_B = C_B * \rho * V / 100$$

여기서 M_B : pure boron mass of components (kg)

components = RWST, BIT, Accumulator, RCS

C_B : boric acid concentration (weight percent: w/o)

ρ : density of boric acid (kg/m³)

V : liquid volume of components (m³)

$$M_{B_t} = M_B)_{RWST} + M_B)_{BIT} + M_B)_{Accu} + M_B)_{RCS}$$

여기서 M_{B_t} : total pure boron mass of system (kg)

$$M_1 = \rho * V$$

$$M_{1_t} = M_1)_{RWST} + M_1)_{BIT} + M_1)_{Accu} + M_1)_{RCS}$$

여기서 M_1 : boric acid mass of each component (kg)

M_{1_t} : total boric acid mass of system (kg)

$$C_{B_{mix}} = \{ M_{B_t} / M_{1_t} \} * 100$$

여기서 $C_{B_{mix}}$: mixed mean boric acid concentration of system (w/o)

$$C_{B_{mix\ min.}} = f(V, \rho)$$

여기서 $C_{B_{mix\ min.}}$: minimum mixed mean boric acid concentration (w/o)

V : 체적 운전허용조건영역 (m³)

ρ : $\rho = f(T)$

T : 온도 운전허용조건영역 (°C)

w/o : weight percent boric acid (1 w/o = 1748 ppm)

이와 같이, 방사농도는 온도에 따른 밀도, 체적등의 변수에 따라 최소 방사농도를 결정하기가 복잡하므로, 해석방법에 따라 방사농도를 산출하는 프로그램이 C언어로 개발되었으며, 이는 고리3&4 호기(부록[다])와 울진1&2 호기(부록[라])에 적용한다.

제 2 절 발전소적용

1. 고리3&4 호기 적용계산

핵설계의 방사회석사고의 정지여유도 확보를 위한 기초자료를 제공하기 위해, 해석방법에 따라 고리3&4 호기에 대한 post-LOCA시 RCS/Sump의 혼합평균방사농도가 계산되었다. 재장전저장수탱크, 축압기, 방사주입탱크의 방사농도는 보수적으로 기술 지침서의 허용 운전영역값중 가장 낮은값을 사용하였다. 즉, 축압기의 방사농도는 1900 ppm이며, 방사주입탱크의 방사농도는 20000 ppm이다. pre-LOCA RCS 방사농도는 500 ppm에서 1700 ppm에 대하여 분석이 수행되었다. Post-LOCA RCS/Sump 혼합평균 방사농도에 가장 큰 영향을 미치는 재장전저장수탱크 방사농도를 2000 ppm 에서 50 ppm씩 증가시켜가면서 2700 ppm까지 계산하였다. 그 계산결과는 표1 및 그림1과 그림2에 제시되었다.

2. 울진1&2 호기 적용계산

해석방법에 따라 울진1&2 호기에 대한 post-LOCA시 RCS/Sump의 혼합평균 방사농도가 계산되었다. 고리3&4 호기 적용계산과 동일하게 적용해보면, 축압기의 방사농도는 2000 ppm이며, 방사주입탱크의 방사농도는 21000 ppm이다. pre-LOCA RCS 방사농도는 500 ppm에서 1700 ppm에 대하여 분석이 수행되었다. Post-LOCA RCS/Sump 혼합평균방사농도에 가장 큰 영향을 미치는 재장전저장수탱크 방사농도를 2000 ppm 에서 50 ppm씩 증가시켜가면서 2700 ppm까지 계산하였다. 그 계산결과는 표2 및 그림3 과 그림4에 제시되었다.

3. 계산결과 논의

장주기운전에 따른 post-LOCA 장기간냉각시 노심의 미임계를 유지하기위한 post-LOCA RCS/Sump 혼합평균붕산농도의 산출방법을 고리3&4 호기와 울진1&2 호기에 각각 적용하였다. 고리3&4 호기와 울진1&2 호기 post-LOCA시 재장전저장수탱크 붕산농도의 변화에 따른 혼합평균붕산농도가 산출되었으며, 이는 post-LOCA 핵설계 정지여유도 만족여부의 확인을 위한 주요핵안전상수의 제한치로서 제공된다.

제 3 장 붕소석출을 막기위한 운전절차 확립

제 1 절 비상노심냉각계통 설명

1. 고리3&4 호기

고리3&4 호기[1]의 비상노심냉각계통은 원심충진펌프(centrifugal charging pump)와 붕소주입탱크, 재장전저장수탱크, 잔열제거펌프(residual heat removal pump:RHR pump), 축압기와 관련 밸브와 계측기기들로 구성되어 있다. 사고 발생에 따라 ECCS의 주기능은 핵연료손상을 막기위해 계통재고량을 보급하므로써 원자로노심의 붕괴생성 열과 저장에너지지를 제거하는 것이다. 일차계통의 LOCA와 같은 사고조건 초기에 따라 더해지는 정지능력을 제공할 뿐만아니라 원자로노심을 냉각시키도록 ECCS는 설계되어있다.

ECCS 구성기기는 최소 2개의 축압기, 1개의 충전펌프와 잔열제거펌프, 기타 관련된 밸브 및 piping으로 설계되어 있다. 이는 설계기준사고의 사건에 있어 충분한 노심냉각을 가능하도록할 것이다. 다중 소내 비상디젤은 비상전력계통의 단일고장 가정으로 사고와 동시에 발생하는 소외 전원상실사건의 모든 전기적인 작동기기에 충분한 비상전력을 공급가능토록 한다. ECCS의 주요기기들은 축압기, 붕소주입탱크와 surge탱크, 잔열제거펌프, 원심충진펌프, 붕소주입재순환펌프, 잔열교환기, 밸브와 재장전저장수탱크등이다.

축압기는 압력용기에 부분적으로 채워져 있는 붕산수와 질소가스로 가압되어 있다. 정상운전시 각각의 축압기는 직렬로서 2개의 check밸브로 원자로냉각재계통과 격리되어 있다. 원자로냉각재 계통압력이 축압기 설정압력이하로 떨어질 때, check 밸브는 열리고, 붕산수는 원자로냉각재계통으로 주입된다. 축압기는 원자로 냉각재 계통의 각각의 저온관에 부착되어있다. 정상운전시 축압기의 붕산수의 액체체적은 28.31 m³이며 농도는 1950 ppm이다.

붕소주입탱크는 21000 ppm의 붕산수용액을 갖고있으며, 충전펌프의 토출부분에 연결되어있다. 안전주입신호의 작동으로 고압안전주입펌프는 붕소주입탱크와의 격리 밸브가 자동적으로 열려 원자로냉각재계통으로 붕산수용액을 주입되게 압력을 공급한다. 붕소주입탱크의 작동조건에서의 가용체적은 3.4 m³이다.

잔열제거펌프는 저압안전주입펌프(LHSI pump)로서 기능을 한다. 잔열제거펌프는 사고시 안전주입신호를 받아 자동적으로 작동되어지며, 주입단계에서는 재장전저장수 탱크에서, 재순환단계에서는 격납용기sump에서 취수한다.

고압안전주입펌프(HHSI pump)로서의 충전펌프는 사고시 안전주입신호를 받아 자동적으로 작동되어지며, 주입단계에서는 재장전저장수 탱크에서 취수되게 자동적으로 연결이 되며, 재순환단계에서는 격납용기sump에서 잔열제거펌프를 거쳐 취수되게 한다. 이 펌프는 원자로냉각재 계통압력에 따른 유량을 원자로냉각재계통으로 전한다.

잔열제거열교환기는 전형적인 shell과 u-tube형이다. 잔열제거펌프는 tube측으로 비상노심냉각수를 공급하고, shell측으로 기기냉각수를 공급하며, 비상노심냉각 재순환 작동시 격납용기sump 냉각수를 tube쪽으로 흘려보낸다.

재장전저장수계통은 봉산수원을 공급하며, LOCA사고에 따라 주입단계시 ECCS 으로 뿐만아니라 격납용기분무계통(Containment Spray System)으로 공급한다. 정상 재장전저장수 탱크용량은 최소가용체적으로 2044m³이며, 봉산농도는 2000 ppm이다.

원자로냉각재계통의 액체체적은 가압기를 포함해서 246.4 m³이며, 계통의 봉산 농도는 발전소의 핵주기 연소도와 관련이 있으며, 핵연료 주기초의 1700 ppm으로 가정한다.

2. 울진1&2 호기

울진1&2 호기[2]의 비상노심냉각계통은 고압안전주입/원심충진펌프와 봉소주입 탱크, 재장전저장수 탱크, 저압안전주입펌프, 축압기와 관련 밸브와 계측기기들로 구성되어 있으며, 사고에 따른 비상노심냉각계통의 주기능은 고리3&4 호기와 같다.

ECCS 구성기기는 최소 2개의 축압기, 1개의 고압안전주입/충진펌프와 저압안전 주입펌프, 기타 관련된 밸브 및 piping으로 설계되어 있다. 이는 설계기준사고의 사건에 있어 충분한 노심냉각을 가능하도록 할 것이다.

축압기와 봉소주입탱크는 고리3&4 호기의 기능과 작동원리는 같으며, 정상 운전시의 축압기의 봉산수 체적은 28.6 m³이고, 농도는 2000 ppm이상이며, 봉소주입 탱크의 가용봉산수체적은 3.4 m³이다.

저압안전주입펌프는 LOCA시 안전주입신호를 받아 자동적으로 작동되어지며, 주입단계에서는 재장전저장수 탱크에서 고압안전주입펌프와 원자로냉각계통으로 안전

주입수를 공급하며, 재순환단계에서는 격납용기 sump에서 취수한다.

고압안전주입펌프로서의 충전펌프는 사고시 안전주입신호를 받아 자동적으로 작동되어지며, 저압안전주입펌프를 통해 재장전저장수탱크에서 취수되게 자동적으로 연결이되며, 재순환단계에서는 격납용기 sump에서 취수되게한다.

재장전저장수계통은 고리3&4 호기와 동일하다. 정상 재장전저장수탱크용량과 봉산농도는 최소가용체적으로 1692 m³이며 2000 ppm이상이다. 원자로냉각재계통의 액체 체적은 가압기를 포함해서 272 m³이며, 계통의 봉산농도는 고리3&4 호기와 같이 핵연료 주기초의 1700 ppm으로 가정한다.

제 2 절 LOCA 및 Post-LOCA의 ECCS 운전절차

냉각재상실사고는 정상적으로 냉각재보충계통의 유량능력을 초과하는 원자로 냉각재 계통재고량의 감소를 야기시키는 원자로냉각재계통 유로관과 그 지관의 파단을 일컫는다. 원자로냉각재계통의 유로관 가상사고의 분류는 대형냉각재상실 사고와 소형냉각재상실 사고로 나눌 수 있다.

1. 고리3&4 호기

사고시 비상노심냉각계통은 안전주입신호를 받아 작동하며, 계통은 LOCA의 과도 상태를 완화시킬 것이나 기능수행은 LOCA상태에 따라 다양하게 변할 것이다. 봉소 주입펌프의 고봉산농도를 즉시 주입하는 고압안전주입펌프 기능은 재장전저장수 탱크에서 저봉산수용액의 주입을 이르게한다. 원자로냉각재계통이 41.4 bar와 13.8 bar 까지 떨어질 경우, 축압기는 가압되어 있는 질소가스에 의해 봉산수를 무조건 주입하게 되며, 저압안전주입펌프 기능은 재장전저장수탱크로 부터 봉산수용액을 공급하도록 되어있다. LOCA 과도상태 동안 안전주입유량은 원자로냉각계통 압력상태에 따라 달라진다. 원자로냉각계통으로 주입되는 비상노심냉각수는 노심에서 열전달을 위해 과도한 핵연료피복재온도를 막고, 결국 대형냉각재상실사고시의 노심재관수와 소형 냉각재상실사고의 노심수위 회복을 이루도록 한다. LOCA해석에서는 안전주입수의 봉산농도에 대한 별도의 항목을 고려하지 않는다.

비상노심냉각계통은 노심재관수 또는 노심수위 회복의 완료에 이어 장기간냉각을

위한 원자로냉각계통에 안전주입수 공급을 계속한다. 재장전저장수탱크 수위가 저-저 설정수위에 도달 후, 저온관 재순환으로 자동으로 전환되고, 운전원의 수동작동으로 완료된다. 이는 격납용기sump의 냉각수를 재순환에 의해 노심을 계속식히도록 되어 있다. LOCA 개시후 약 24시간쯤, ECCS는 원자로용기의 붕산농도를 제어하기위해 고온관 재순환모드로 수동으로 재정렬토록 한다. 이러한 ECCS의 모드별 유량 흐름도가 그림5에 나타나 있다.

최소안전설비(minimum safeguard) (train A 또는 train B)에서 작동은 크게 3가지로 나뉜다. 저온관 주입/최소안전설비(cold leg injection/minimum safeguards)의 모드C는 재장전저장수탱크에서 취수한 각각의 LHSI 펌프1과 HHSI 펌프1의 최소안전설비 경우의 3개 저온관을 통해 원자로노심으로 공급됨을 나타낸다 (그림5의 실선). 저온관 재순환/최소안전설비(cold leg recirculation/minimum safeguards)의 모드F는 LHSI 펌프1만으로 격납용기sump 에서 취수하여 재순환 냉각수를 직접 또는 HHSI 펌프1로 보내 3개의 저온관을 통해 공급하게 된다 (그림5의 긴점선). 고온관 재순환/최소안전 설비(hot leg recirculation/minimum safeguards)의 모드J는 LHSI 펌프1만으로 격납용기 sump에서 취수하여 재순환 냉각수를 2개의 고온관으로 직접 또는 HHSI 펌프1로 보내 3개의 고온관을 통해 공급하게 된다 (그림5의 짧은점선).

2. 울진1&2 호기

LOCA시 ECCS는 고리3&4 호기와 유사하게 작동한다. LOCA개시후 약 18시간경, ECCS는 원자로용기의 붕산농도를 제어하기 위하여 고온관 재순환모드로써 수동으로 재정렬한다. ECCS의 모드별 유량흐름도가 그림6에 나타나 있다.

최소안전설비(minimum safeguard) (train A 또는 train B)에서 작동은 크게 3가지로 나뉜다. 저온관 주입/최소안전설비(cold leg injection/minimum safeguards)의 모드C는 재장전저장수탱크에서 취수한 LHSI 펌프1을 통해 3개 저온관을 통해 직접으로 또는 HHSI 펌프1로 보내져(boot) 3개 저온관을 통해 원자로로 공급됨을 나타낸다 (그림6의 실선). 저온관 재순환/최소안전설비(cold leg recirculation/minimum safeguards)의 모드F는 LHSI 펌프1만으로 격납용기sump에서 취수 하여 재순환 냉각수를 직접으로 또는 HHSI 펌프1로 보내 3개의 저온관을 통해 공급하게 된다 (그림6의 긴점선). 고온관과 저온관 동시 재순환/최소안전설비(hot leg & cold leg simultaneous recirculation/minimum safeguards)

의 모드J는 LHSI 펌프I만으로 격납용기sump에서 취수한 재순환 냉각수를 2개의 고온관으로 직접 또는 HHSI 펌프I로 보내 3개의 저온관을 통해 공급하게 된다 (그림6의 짧은점선).

제 3 절 LTC 해석방법론

LTC해석방법론은 LOCA에 연이어 노심의 장기간냉각능력이 유지됨을 보여주는 것이며, 또한 해석에 있어서는 ABBCE LTC방법론[7]과 참고문헌에 있는 실제 적용에의 초기 및 경계조건[8][9]을 참고하였다.

Boron코드는 붕소석출시간을 계산하는 데 적용되며, 코드의 기본방정식은 제어체적내에 초기액체, 붕산분포와 안전주입유량등으로부터 시간에 따른 계통의 붕산농도를 계산한다. 노심의 boiloff량과 고온관 entrainment량은 코드에서 계산되고, 그 결과의 붕소석출은 붕산용해도곡선을 이용하여 계산한다. Boron코드는 원래 ABBCE형 원전설계에 적용하기위해 개발된 코드이나 기본모델과 관계식은 매우 일반적인 가압경수로설계에 적용할 수 있다. 결국 코드는 미국 웨스팅하우스형인 고리3&4 호기와 프랑스 프라마툼형인 울진1&2 호기에 적용할 수 있다.

노심은 안전주입수로서 노심수위가 회복되고 냉각되어질 수 있을 때, LTC해석은 LBLOCA에 이은 시간에 따라 수행한다. 또한 파단위치의 영향은 붕소석출의 장기간 냉각에서 고려되어야 한다.

저온관 대형파단에 대해, 재관수에 따른 저온관측 안전주입수는 저온관파단 수위까지 축적될 것이며 계속 더해지는 냉각수는 파단을 통해 격납용기로 배출되어버린다. 그리고 노심에서 생성되는 증기는 upper plenum에서 채여, 노심압력을 증가시킨다. 그리하여 노심을 세척할 능력(driving force to flush)은 약화되고 노심잔열을 제거하기 위해 노심은 과포화상태가 되고 붕산은 원자로용기내에 남게되며 농도는 증가할 것이다. 그러므로 노심내의 증가된 붕산농도로 인해 용해도곡선에 도달되기 전에 저온관 안전주입수에서 고온관 안전주입수로 전환되어야 한다. Sump에서 취수한 고온관 안전주입수는 upper plenum으로 직접 주입되어 노심을 세척할 능력이 다시 증가하고 결국 노심은 과냉각상태로 될 것이다.

고온관 대형파단에 대해, 재관수에 따른 저온관측 안전주입수는 원자로용기를 통해 파단면으로 liquid flush를 공급하기에 충분한 수두를 유발하며, 이는 증기

발생기의 저온측으로 liquid backup에 의해 증대된다. 결과적으로 노심유량은 상방향 유량으로 크게 발전하여 봉산은 제거되고 원자로내의 봉산농도는 저온관과단에서처럼 만큼 증가되지는 않는다. 그러나 저온관 안전주입수는 비상운전절차에 따라 고온관으로의 전환이 이루어지게 될 것이며, 이러한 비과단 고온관 안전주입수는 upper plenum으로 직접 주입되어 일부는 노심영역으로 자연순환을 이루며, 일부는 고온관과단면을 통해 격납용기로 안전주입유량이 우회되어 버린다. 그리하여 이러한 과도상태 거동은 어떠한 조작도 없이 장기간 방치하면 봉산수는 원자로용기내에 남게되고 봉산농도는 다시 증가될 수 있다.

결론적으로, 저온관과단이나 고온관과단에서 봉산석출을 배제시키기 위해서는 노심세척유량(core flushing flow)이 충분하고 효과적이 됨을 보여주면된다.

LTC해석방법론은 아래의 절차에 따라 기술하고 있으며 그림7에 보여주고 있다.

- 1) 원자로냉각재계통의 최소 포화온도는 과도상태의 격납용기압력해석에 의해 결정된다. 원자로냉각재 계통온도는 관심기간인 장기간냉각동안 격납용기에서 도달되는 최소 포화압력과 연관된다.
- 2) 최소 원자로냉각재 계통온도에 따른 봉산석출농도는 봉산용해도곡선에서 결정된다 (그림8).
- 3) 세척유량없이 봉산용해도에 도달하는 원자로냉각재계통 봉산농도의 최소시간은 코드에 의해 결정된다. 이 시간은 $t_{precipitation}$ 이다.
- 4) 효과적인 고온관 flushing이될 최대시간은 고온관 증기유량이 Wallis Criteria[11]에 의한 주입수를 entrainment시킬 유량이하로 떨어질 때의 시간으로 결정된다. 이 시간을 t_{flush} 이다.
- 5) t_{flush} 와 $t_{precipitation}$ 를 비교하여 $t_{flush} < t_{precipitation}$ 이 되는지를 확인한다.
- 6) t_{flush} 에서 고온관 과/또는 저온관 주입유량 및 노심boiloff량을 계산한다. 즉 $W_{injection}$ 와 $W_{boiloff}$ 이다.
- 7) 봉산축적을 방지하기위해 t_{flush} 에서 요구되는 최소 순flushing유량은 Boron코드에 의해 계산된다. 이를 W_{flush} 이라한다.
- 8) 이러한 여러 유량을 비교하여 $W_{injection} - W_{boiloff} > W_{flush}$ 임을 확인한다.

제 4 절 해석결과 및 논의

Post-LOCA LTC해석은 계통성능을 가장 보수적인 상황이 되게하는 가정을 사용한다. 그리하여 이러한 결과들은 post-LOCA를 위한 가장 극한의 LTC plan을 보이게 되고, 10CFR50.46에서 주어진 LTC에 대해 인허가기준을 확인하게 된다. 해석에서 사용한 주된 가정들은 아래에 기술한다.

- 1) 초기출력수준은 전출력의 102%이다.
- 2) 한 train만 작동한다 (HHSI pump 1과 LHSI pump 1).
- 3) 격납용기배압에 대한 보수적인 ECCS모델을 근거로 하는 1.0 bar와 100℃의 포화조건에서 원자로냉각재계통은 유지된다고 가정한다. 이러한 포화조건은 붕소석출을 피하기위해 27.53 w/o의 최대 붕산농도제한값을 제공한다.
- 4) 고온관 증기유량이 더 이상 entrain되지 않을 때의 시간을 결정하는데 Wallis Criteria을 사용한다.
- 5) 최대 붕산원수농도값을 사용한다. 이러한 붕산은 원자로냉각재계통, 재장전저장수 탱크, 축압기 그리고 붕소주입탱크에 있다.
- 6) LOCA에 이어, 노심에서의 증기 boiloff유량은 어떠한 붕소를 갖고 증발한다고 생각하지 않는다. 원자로용기의 액체체적은 재관수후 일정하며, 증기가 발생되어 붕소는 남고 원자로용기의 붕산농도는 증가한다.
- 7) 작은 유효 원자로용기 제어체적은 노심영역과 고온관노즐 바닥수위 이하의 upper plenum영역으로 한다.

이러한 가정들로써 고리3&4 호기와 울진1&2 호기에 Boron코드를 적용한다.

1. 고리3&4 호기

고리3&4 호기 재장전전이노심안전성분석보고서(RTSR)[12]에 의하면 LOCA에 이어 LTC에서는 약 1.36 bar로 근접하나, 이를 보수적으로 1.0 bar로 가정한다. 노심 flush유량이 없을때 노심의 붕산농도가 용해도곡선에 도달되는 최초시점을 결정할 필요가 있다. 해석에 적용한 용해도곡선은 23.53 w/o인데, 이는 100℃의 용해도값에서 불확실성 4w/o를 뺀 값이다. 고온관 재순환전환은 원자로용기에서 붕소석출을 막기 위해 개시되어야할 때, 석출시간을 정하도록 해석은 수행된다. 석출시간($t_{precipitation}$)은 약 8시간이 된다.

Wallis Criteria에 의하면, LOCA후 주입수의 고온관 증기entrainment을 끝낼 수 있는 시간은 2.5시간이며, 이는 flush가능한 최초시간(t_{flush})이다. 그리하여 고온관증기 entrainment의 어떠한 잠재력도 배제시킬 수 있는 시간이며 발전소 운전원의 비상대응 조치를 위한 시간여유를 고려하여, LOCA후 약 7.5시간에서 고온관 재순환이 이루어져야 한다.

그림9는 고온관 재순환의 유량이 없을 때와 20 gpm의 유량이 있다고 가정했을 때의 원자로용기내의 계산된 붕산농도를 나타내었다. 20 gpm의 유량은 주입과 재순환 모드의 ECCS 설계유량보다도 훨씬 작은 양으로써도 붕산농도가 급격히 감소한다. 이러한 결과로 보면, 저온관 주입(모드C)와 재순환(모드F) 상태인 LOCA후 7.5시간 동안은 노심 flush유량이 없어도 붕소석출은 발생되지않으나, 운전원은 그 시간 이전에 원자로노심의 붕소석출을 막기위해 고온관 재순환(모드J)으로 전환하여야한다.

저온관 파단사고의 경우, 해석에 사용한 20 gpm의 가정된 유량보다 매우 높은 약 3100 gpm의 ECCS의 설계된 순수 노심flush유량으로 볼때, 고온관 재순환 전환후의 노심 붕산농도는 매우 빠르게 감소되어 질 것이다. 한편, 고온관 파단사고의 경우는 저온관파단 경우의 반정도 되는 약 1600 gpm의 노심flush유량이 되며, 해석에 사용한 20 gpm 유량보다도 여전히 매우 많다. 고리3&4 호기의 고온관과 저온관파단에 대한 순수 노심flush유량은 그림10에 보여준다.

고리3&4 호기에서는 그림5에서 볼 수 있는 LHSI펌프의 하단부에 HV-18의 밸브가 원자로 격납용기 바깥에 위치한다. 이 밸브는 고온관 재순환을 위해 모드C와 F에서는 항상 닫혀 있다. 만일 고온관 재순환의 모드J 사건때에 이 밸브가 고장이 나면 LHSI 유량은 붕소석출방지에 기여하지 못하게된다. 하지만 저온관과 고온관 파단시의 고온관 재순환 HHSI유량은 612 gpm과 408 gpm이 되며, 이는 밸브의 정상작동시의 유량보다는 훨씬 적으나 20 gpm보다는 여전히 많은 양이 주입되고 있다.

결과적으로 그림9에서 처럼 고온관 재순환의 적은 양으로도 붕소석출은 발생하지 않지만, 고온관 재순환 모든유량의 우회로 붕산농도증가 가능성을 근원적으로 갖지 않고 밸브고장에 따른 재순환유로를 보장하기위해 밸브와 piping정렬절차를 알맞게 확립할 필요가 있다. 즉, 만약 밸브가 정상작동시는 문제가 없으나, 밸브 고장시는 LHSI의 고온관 재순환유량은 원자로냉각재계통 저온관으로 순환되는 반면, HHSI 유량은 모드J 에서 여전히 고온관으로 순환된다. 여러 밸브와 piping으로 재순환유량 확보를 위해 이러한 복잡한 전환운전조작은 파단위치 및 밸브와 piping의 오동작등의

파악과 인지를 위해 운전원에게 상당한 부담으로 작용될 수 있다. 그리하여 파단위치 및 밸브 오동작에 무관하게 모드J의 저온관과 고온관의 동시 재순환 (simultaneous recirculation)전환이 되게 하는것이 바람직하다.

2. 울진1&2 호기

울진1&2 호기의 RTSR[13]은 LTC동안 격납용기가 1.36bar로 접근하지만, 보수적인 원자로계통압력을 1.0bar으로 가정하였다. 울진1&2 호기의 해석절차는 고리3&4호기와 같이 수행되며, 그 결과 석출시간($t_{precipitation}$)과 노심세척(flush)시간(t_{flush})은 8.5시간과 2.5시간이 된다.

그림11은 원자로용기내의 붕산농도를 계산한 그림이다. 저온관 주입(모드C)와 재순환(모드F) 상태인 LOCA후 8시간 동안은 노심 flush유량이 없어도 붕소석출은 발생되지않으나, 운전원은 그 시간이전에 원자로노심의 붕소석출을 막기위해 저온관 재순환모드에서 고온관과 저온관의 동시재순환(모드J)으로 전환하여야한다.

해석에 사용한 20 gpm의 가정된 유량보다 매우 높은 (저온관 파단사고의 경우는 약 3250 gpm과 고온관 파단사고의 경우는 약 1900 gpm) ECCS의 설계된 순수 노심 flush유량으로 볼때, 고온관 재순환 전환후의 노심 붕산농도는 매우 빠르게 감소되어 질 것이다. 울진1&2 호기의 고온관과 저온관파단에 대한 순수 노심 flush유량은 그림12에 보여준다.

울진1&2 호기는 고리3&4 호기의 ECCS와는 약간 다르다. 울진1&2 호기 원자로 냉각재계통의 고온관으로 주입되는 연결관인 LHSI펌프 하단부에 있는 잔열교환기와 밸브(HV-18)는 없으며, LHSI와 HHSI펌프의 용량은 고리3&4 호기의 값보다 크다. 또한 모드J는 고온관과 저온관의 동시 재순환으로인해, 파단위치에 관련하여 flush유량을 확보하기위하여 밸브와 piping의 정렬을 고려할 필요가 없다.

결론적으로, LOCA후 약 8시간에 동시 재순환모드로의 전환이 이루어지면 붕소석출은 배제될 수 있으며, 노심은 냉각가능한 기하학적 형상이 유지된다.

제 4 장 결 론

웨스팅하우스 3-루프형 원전인 고리3&4 호기와 울진1&2 호기의 핵연료 장주기 운전으로 post-LOCA의 정지반응도를 유지하기위하여 재장전저장수탱크와 축압기의 봉산농도는 증가되어야한다. 이로인해 LOCA후 장기간냉각 기간동안 봉소석출 가능성을 Boron코드를 이용하여 해석되었다. 이러한 해석결과에 따라 다음과 같은 결론을 갖는다.

첫째로, 고리3&4 호기의 경우, 고온관 재순환으로의 전환시간은 LOCA개시후 약 24시간에서 약 7.5시간으로 단축되어야한다.

둘째로, 고리3&4 호기의 모드J에서는 고온관 재순환전환에서 고온관과 저온관의 동시 재순환전환으로 바꾸는 것이 바람직하다.

셋째로, 울진1&2 호기의 경우, 고온관과 저온관 동시 재순환으로의 전환시간은 LOCA개시후 약 18시간에서 약 8시간으로 단축되어야한다.

참고문헌

- [1] KEPCO, Final Safety Analysis Report for Kori 3&4 Nuclear Power Plants.
- [2] KEPCO, Final Safety Analysis Report for Ulchin 1&2 Nuclear Power Plants.
- [3] 송재웅, 900MWe급 노심에서 대형냉각재상실사고시 노심의 장기냉각을 위한 붕소농도평가, TR-ND-GEN-93002 Rev.0, 1993.4.12.
- [4] 김재학, 울진2 호기 7주기 장주기 노심에 대한 대형냉각재상실사고시 노심의 장기냉각을 위한 붕소농도 평가, TR-ND-UC207-95001 Rev.0, 1995.9.13.
- [5] 최한림, 재장전저장수탱크의 붕소 농도에 따른 Post-LOCA시 RCS/Sump의 혼합평균붕산농도 계산방법개발, CA-AA-UC207-95032 Rev.0, 1995.9.7.
- [6] USNRC, 10CFR50.46, Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling System for Light Water Nuclear Power Reactor.
- [7] ABBCE Power Systems, Post-LOCA Long Term Cooling Evaluation Model, CENPD-254-P-A.
- [8] Letter to Mr. Harold R. Denton/USNRC, Serial No.86-690, Virginia Electric and Power Company - North Anna Power Station Units No.1&2 - Proposed Technical Specification Change Boron Concentration Increase, December 22, 1986.
- [9] Letter to USNRC, Serial No.86-690, Virginia Electric and Power Company - Surry Power Station Units No.1&2 - Proposed Technical Specification Change Boron Concentration Increase, December 21, 1990.
- [10] Westinghouse, Core Design Methodology for Computing Post-LOCA Long Term Cooling Critical Boron, CDD-86-119, CO-86-102, April 22, 1986.

[11] G.B.Wallis. *One-Dimensional Two-Phase Flow*, McGraw-Hill, 1969, p.393.

[12] Siemens AG, KWU-Group, KAERI, *Reload Transition Safety Report for Kori Nuclear Power Plant Unit 3&4*, June 1988.

[13] Siemens AG, KWU-Group, KAERI, *Reload Transition Safety Report for ULCHIN Nuclear Power Plant Unit 1&2*, June 1988.

표 1 그리3&4 호기에 대한 pre-trip의 원자로냉각계통 방사능도에 따른 post-LOCA시 sump와 원자로냉각계통의 혼합평균방사능도

RCS CR. I (rpm)	Minimum RWST Boron Concentrations (ppm)															
	2000.0	2050.0	2100.0	2150.0	2200.0	2250.0	2300.0	2350.0	2400.0	2450.0	2500.0	2550.0	2600.0	2650.0	2700.0	
500	1912.0	1957.4	2002.8	2048.2	2093.6	2139.0	2184.4	2229.9	2275.3	2320.7	2366.1	2411.5	2456.9	2502.3	2547.7	
600	1919.6	1965.0	2010.4	2055.8	2101.3	2146.7	2192.1	2237.5	2282.9	2328.3	2373.7	2419.1	2464.5	2510.0	2555.4	
700	1927.2	1972.6	2018.1	2063.5	2108.9	2154.3	2199.7	2245.1	2290.5	2335.9	2381.4	2426.8	2472.2	2517.6	2563.0	
800	1934.9	1980.3	2025.7	2071.1	2116.5	2161.9	2207.3	2252.8	2298.2	2343.6	2389.0	2434.4	2479.8	2525.2	2570.6	
900	1942.5	1987.9	2033.3	2078.7	2124.2	2169.6	2215.0	2260.4	2305.8	2351.2	2396.6	2442.0	2487.4	2532.9	2578.3	
1000	1950.1	1995.5	2041.0	2086.4	2131.8	2177.2	2222.6	2268.0	2313.4	2358.8	2404.3	2449.7	2495.1	2540.5	2585.9	
1100	1957.8	2003.2	2048.6	2094.0	2139.4	2184.8	2230.2	2275.7	2321.1	2366.5	2411.9	2457.3	2502.7	2548.1	2593.5	
1200	1965.4	2010.8	2056.2	2101.6	2147.1	2192.5	2237.9	2283.3	2328.7	2374.1	2419.5	2464.9	2510.3	2555.8	2601.2	
1300	1973.0	2018.5	2063.9	2109.3	2154.7	2200.1	2245.5	2290.9	2336.3	2381.7	2427.2	2472.6	2518.0	2563.4	2608.8	
1400	1980.7	2026.1	2071.5	2116.9	2162.3	2207.7	2253.1	2298.6	2344.0	2389.4	2434.8	2480.2	2525.6	2571.0	2616.4	
1500	1988.3	2033.7	2079.1	2124.5	2170.0	2215.4	2260.8	2306.2	2351.6	2397.0	2442.4	2487.8	2533.2	2578.7	2624.1	
1600	1995.9	2041.4	2086.8	2132.2	2177.6	2223.0	2268.4	2313.8	2359.2	2404.6	2450.1	2495.5	2540.9	2586.3	2631.7	
1700	2003.6	2049.0	2094.4	2139.8	2185.2	2230.6	2276.0	2321.5	2366.9	2412.3	2457.7	2503.1	2548.5	2593.9	2639.3	

* Accumulator Cb. = 1900 ppm, BIT Cb. = 20000 ppm.

표2 운전1&2 호기에 대한 pre-trip의 원자로냉각계통 봉산농도에 따른 post-LOCA시 sump와 원자로냉각계통의 혼합평균봉산농도

RCS Cb (ppm)	Minimum RWST Boron Concentration (ppm)														
	2000.0	2050.0	2100.0	2150.0	2200.0	2250.0	2300.0	2350.0	2400.0	2450.0	2500.0	2550.0	2600.0	2650.0	2700.0
500.0	1880.5	1924.6	1968.7	2012.8	2056.9	2101.0	2145.1	2189.1	2233.2	2277.3	2321.4	2365.5	2409.6	2453.7	2497.8
600.0	1890.7	1934.8	1978.9	2022.9	2067.0	2111.1	2155.2	2199.3	2243.4	2287.5	2331.6	2375.7	2419.8	2463.9	2507.9
700.0	1900.8	1944.9	1989.0	2033.1	2077.2	2121.3	2165.4	2209.5	2253.6	2297.7	2341.7	2385.8	2429.9	2474.0	2518.1
800.0	1911.0	1955.1	1999.2	2043.3	2087.4	2131.5	2175.5	2219.6	2263.7	2307.8	2351.9	2396.0	2440.1	2484.2	2528.3
900.0	1921.2	1965.3	2009.3	2053.4	2097.5	2141.6	2185.7	2229.8	2273.9	2318.0	2362.1	2406.2	2450.3	2494.3	2538.4
1000.0	1931.3	1975.4	2019.5	2063.6	2107.7	2151.8	2195.9	2240.0	2284.1	2328.1	2372.2	2416.3	2460.4	2504.5	2548.6
1100.0	1941.5	1985.6	2029.7	2073.8	2117.9	2161.9	2206.0	2250.1	2294.2	2338.3	2382.4	2426.5	2470.6	2514.7	2558.8
1200.0	1951.7	1995.7	2039.8	2083.9	2128.0	2172.1	2216.2	2260.3	2304.4	2348.5	2392.6	2436.6	2480.7	2524.8	2568.9
1300.0	1961.8	2005.9	2050.0	2094.1	2138.2	2182.3	2226.4	2270.4	2314.5	2358.6	2402.7	2446.8	2490.9	2535.0	2579.1
1400.0	1972.0	2016.1	2060.2	2104.2	2148.3	2192.4	2236.5	2280.6	2324.7	2368.8	2412.9	2457.0	2501.1	2545.2	2589.2
1500.0	1982.1	2026.2	2070.3	2114.4	2158.5	2202.6	2246.7	2290.8	2334.9	2379.0	2423.0	2467.1	2511.2	2555.3	2599.4
1600.0	1992.3	2036.4	2080.5	2124.6	2168.7	2212.8	2256.8	2300.9	2345.0	2389.1	2433.2	2477.3	2521.4	2565.5	2609.6
1700.0	2002.5	2046.6	2090.6	2134.7	2178.8	2222.9	2267.0	2311.1	2355.2	2399.3	2443.4	2487.5	2531.6	2575.6	2619.7

* Accumulator Cb = 2000 ppm, Boron Injection Tank (BIT) Cb = 21000 ppm

POST-LOCA SUMP/RCS MIXED MEAN BORON CONCENTRATION
VS. PRE-TRIP RCS BORON CONCENTRATION

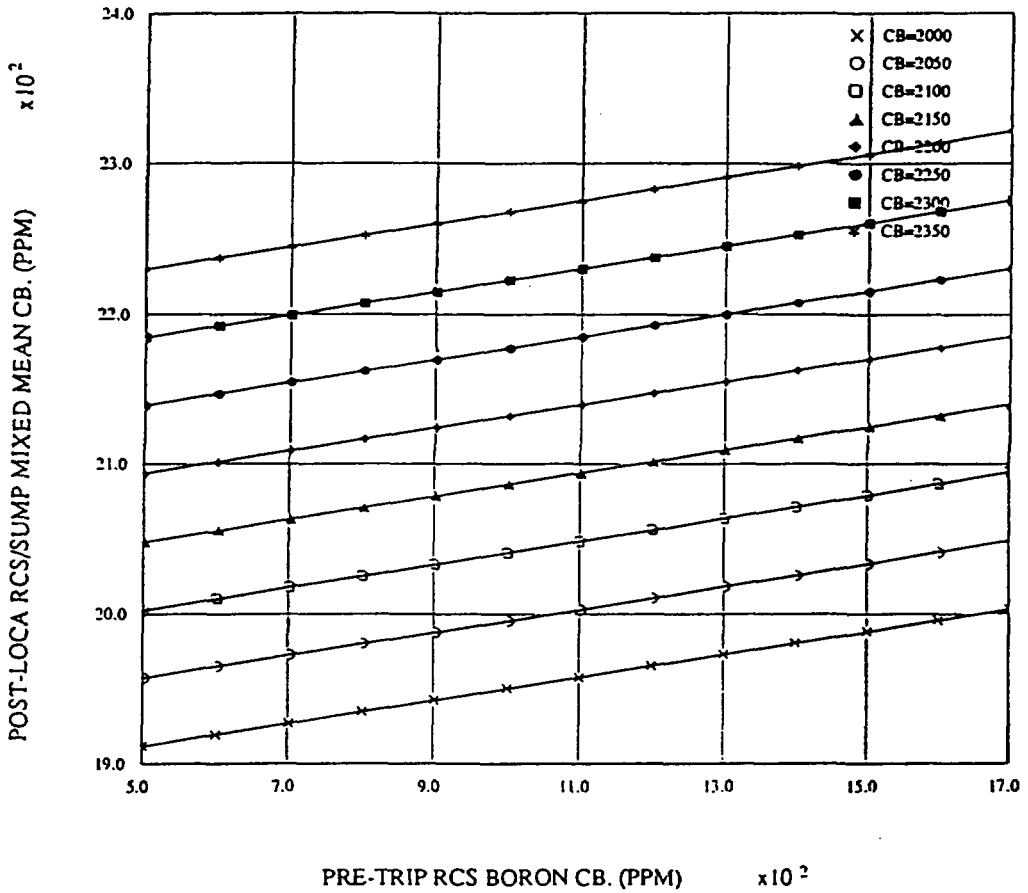


그림1. 고리3&4 호기 재장전저장수탱크의 최소붕산농도 변화량(1/2)

POST-LOCA SUMP/RCS MIXED MEAN BORON CONCENTRATION
VS. PRE-TRIP RCS BORON CONCENTRATION

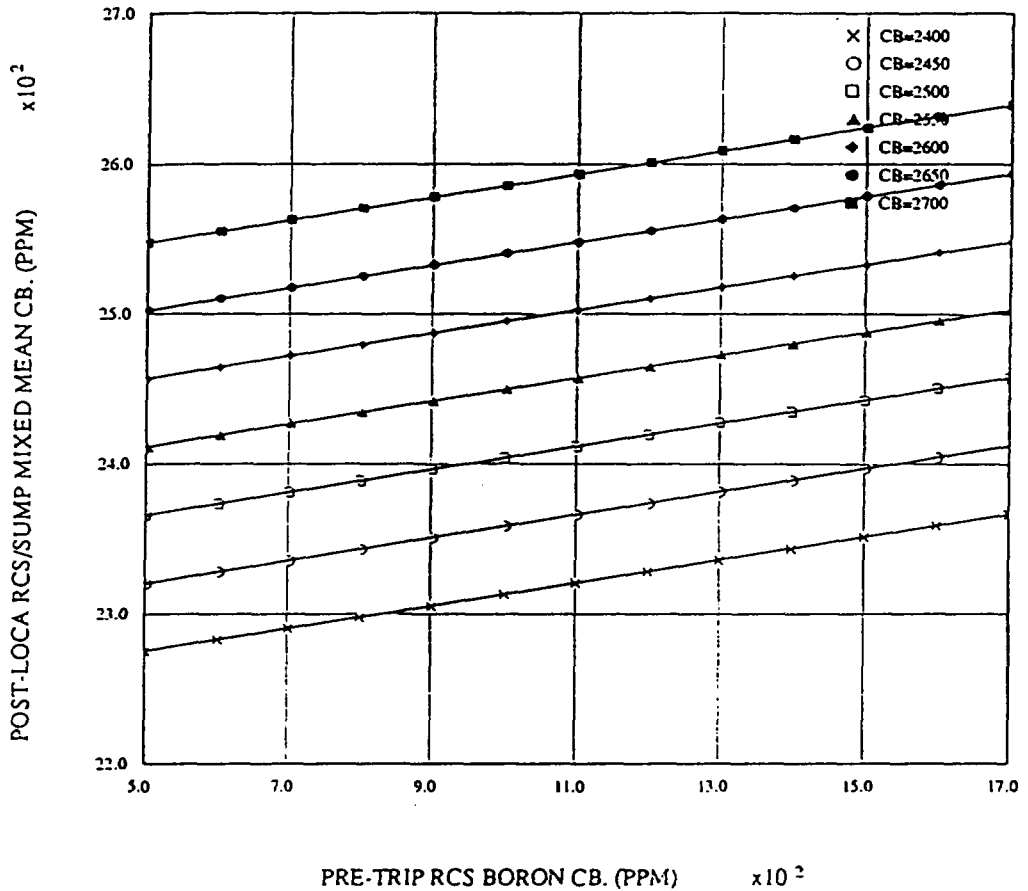


그림2. 고리3&4 호기 재장전저장수탱크의 최소붕산농도 변화량(2/2)

POST-LOCA SUMP/RCS MIXED MEAN BORON CONCENTRATION
VS. PRE-TRIP RCS BORON CONCENTRATION

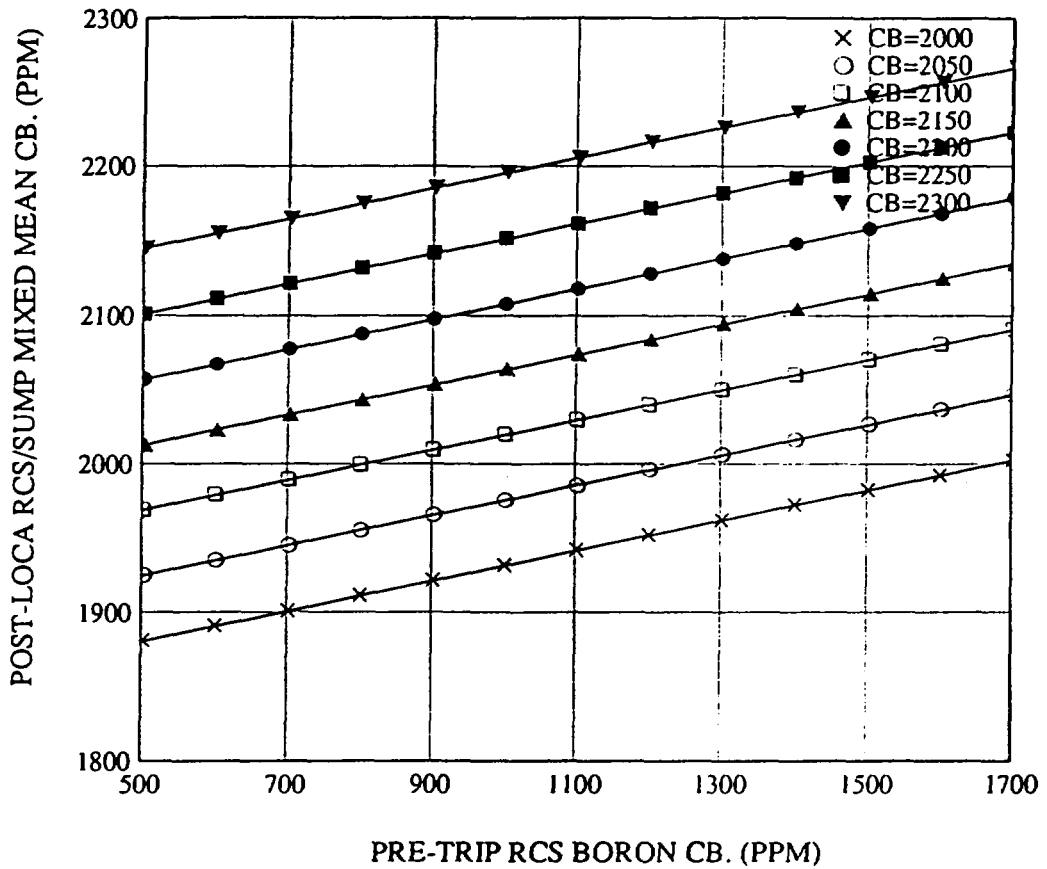


그림3. 울진1&2 호기 재장전저장수탱크의 최소붕산농도 변화량(1/2)

POST-LOCA SUMP/RCS MIXED MEAN BORON CONCENTRATION
VS. PRE-TRIP RCS BORON CONCENTRATION

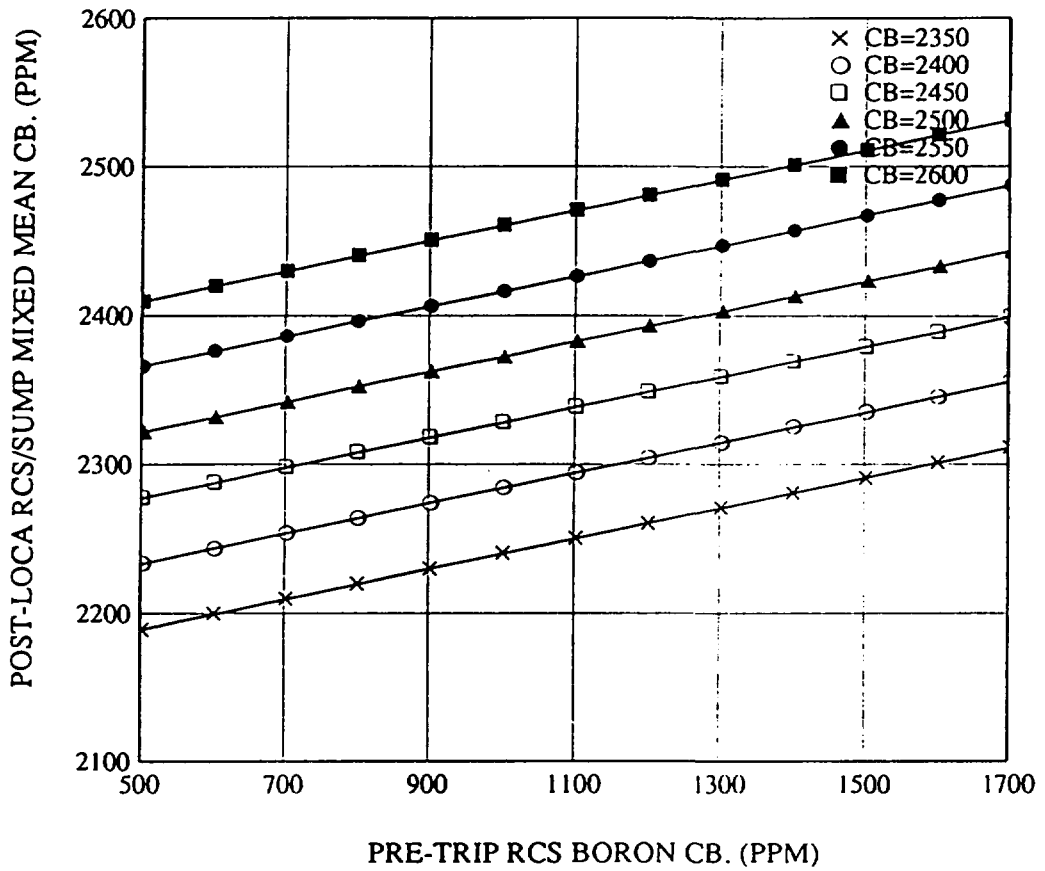


그림4. 울진1&2 호기 재장전저장수탱크의 최소붕산농도 변화량(2/2)

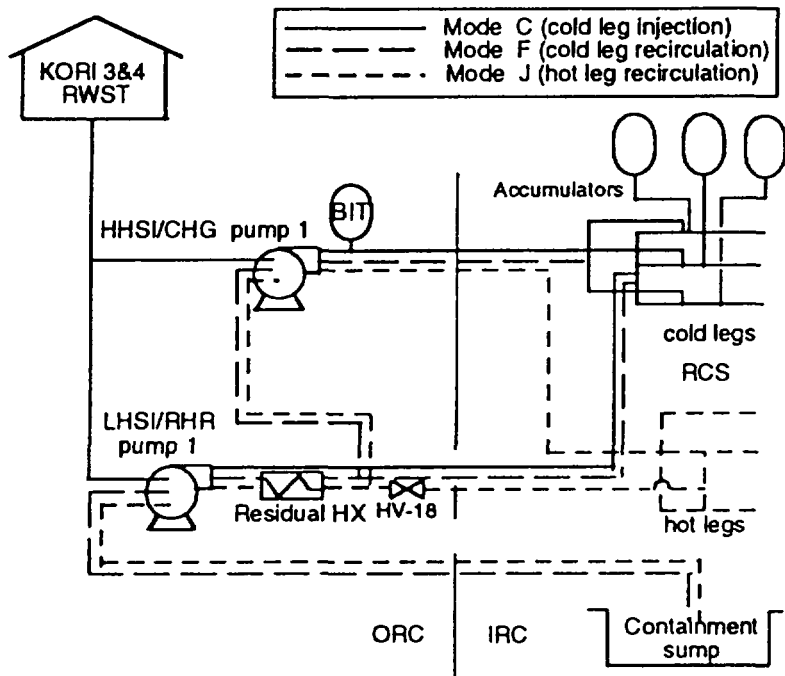


그림5. 고리3&4 호기의 비상노심냉각계통의 모드별 유량흐름도 (Train A 작동)

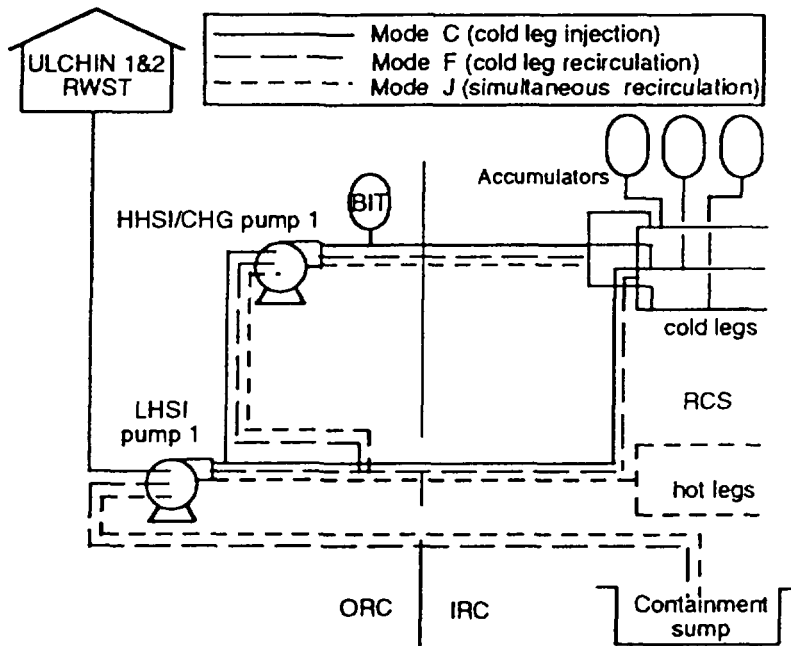


그림6. 울진1&2 호기의 비상노심냉각계통의 모드별 유량흐름도 (Train A 작동)

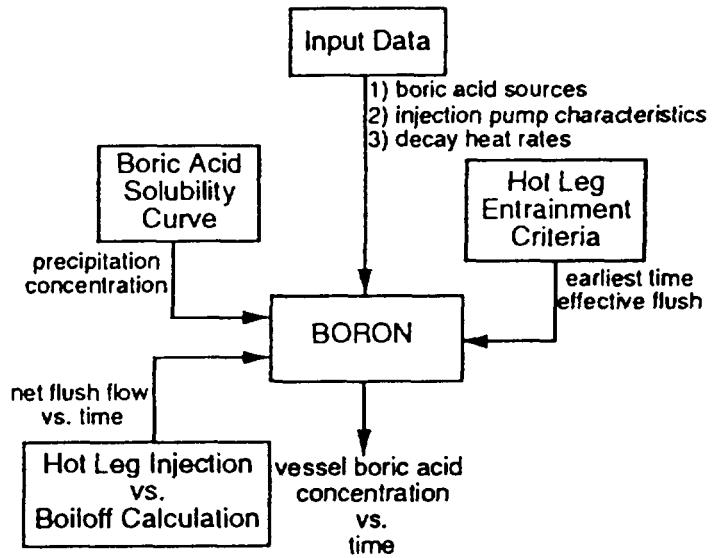


그림7. 붕소석출의 장기간냉각 해석절차

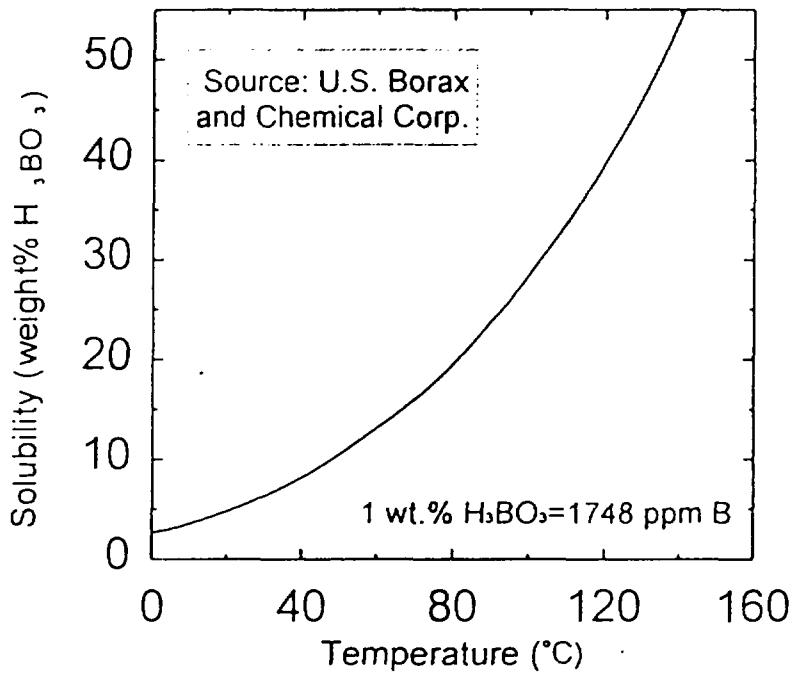


그림8. 온도에 따른 붕산수의 석출용해도곡선

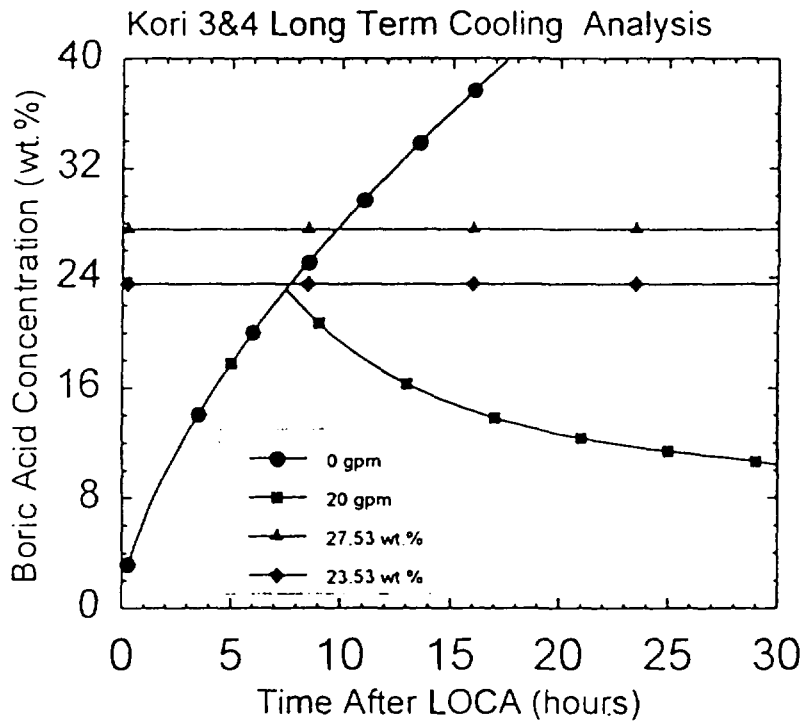


그림9. 고리3&4 호기의 시간에 따른 원자로노심의 붕산농도

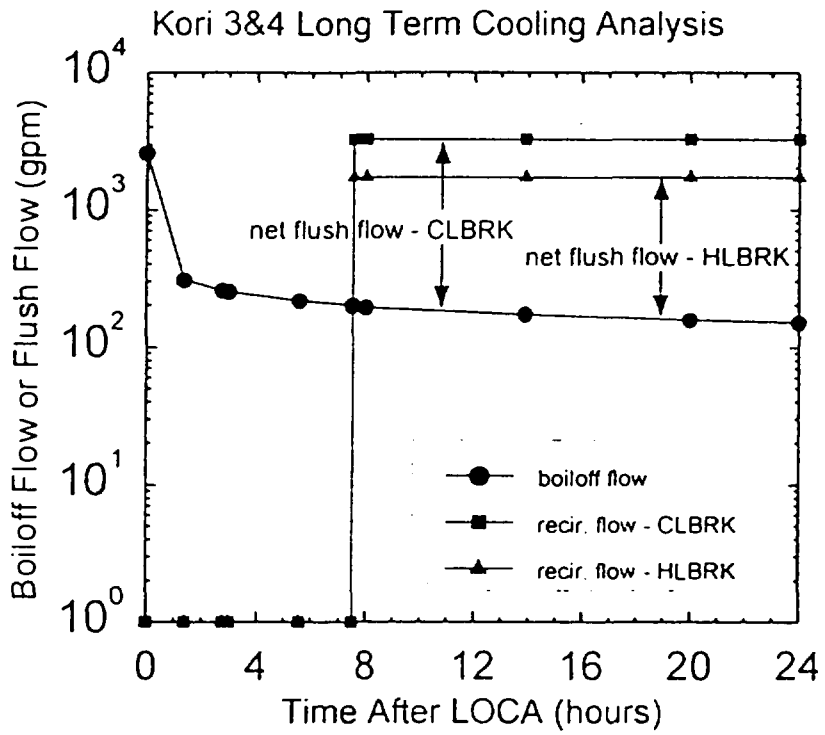


그림10. 고리3&4 호기의 저온관파단과 고온관파단에 대한 노심flush유량

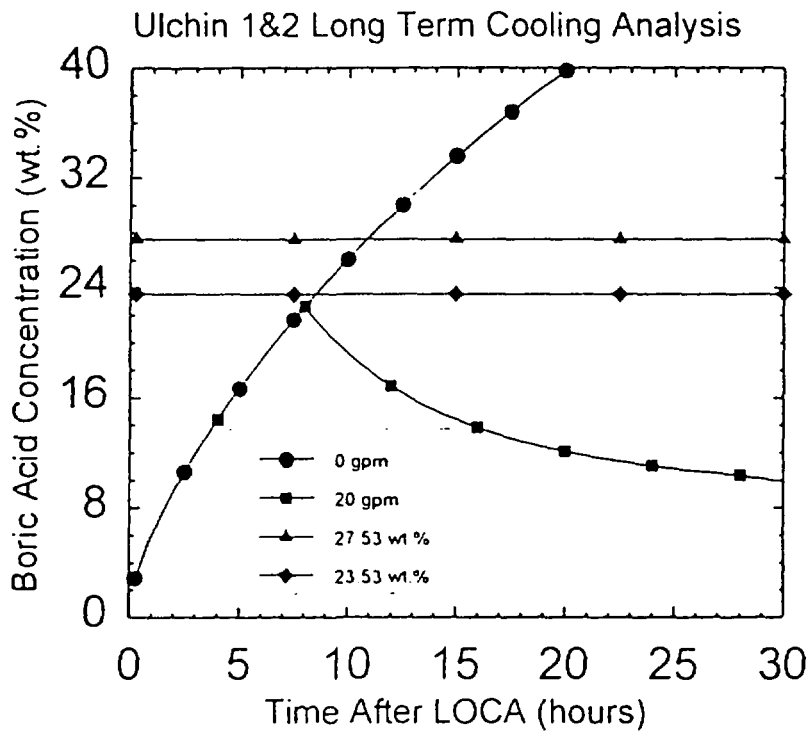


그림 11. 울진1&2 호기의 시간에 따른 원자로노심의 붕산농도

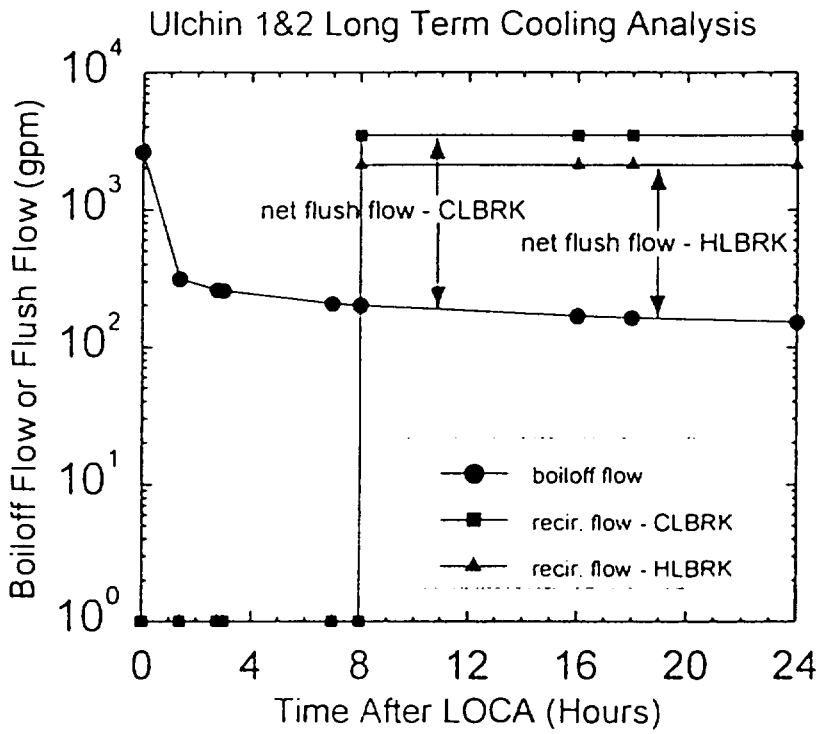


그림12. 울진3&4 호기의 저온관과단과 고온관과단에 대한 노심flush유량

부 록 [가]

**List of ECCS Components General Data
for Kori-3/4**

Kori-3/4 Westinghouse Plants Specific Data for Emergency Core Cooling System

1. Refueling Water Storage Tank

- No. of RWST = 1
- Usable vol. (min.) = 514000 gal (1945.6442 m³)
- Nominal boron concentration = 2000 ppm (2000 - 2250 ppm **)

2. Accumulator

- No. of Accumulator = 3
- Accumulator water volume = 985 ~ 1052 ft³ (27.9 - 29.8 m³)
- Nominal boron concentration = 1950 ppm (1900 - 2100 ppm)

3. Boron Injection Tank

- No. of BIT = 1
- Usable vol. at operating conditions = 900 gal (3.40677 m³)
- Nominal boron concentration = 21000 ppm (20000 - 22500 ppm)

4. Reactor coolant system

- System liquid volume = 8700 ft³ (246.356 m³)
- Nominal boron concentration = 500 ~ 1700 ppm

Summary of Source of Boric Acid

	Current CB.(ppm)	Liq. Vol. (m ³)	Oper.Temp.(°C)	Boric Acid Mass (kg)
RWST	2000 ~ 2250	1945.6 ~ 2100.7	26.7*	22189.6 ~ 25661.3
Accu	1900 ~ 2100	27.9 ~ 29.8	37.8 ~ 65.6	892.0 ~ 1066.5
BIT	20000 ~ 22500	3.4*	68.3 ~ 79.4	3311.5 ~ 3332.6
RCS	500 ~ 1700	246.4*	326.6*	457.0 ~ 1554.3

* nominal value with scarcity of references

** 1 weight percent boric acid = 1748 ppm

1. Refueling Water Storage Tank [Ref: FSAR T6.3-9, T.S.16.3/4.1-14, T.S.16.3/4.5-11]

- No. of RWST = 1
- Max. capacity = 554900 gal (2100.7 m³)
- Normal capacity = 540000 gal (2044.062 m³)
- Usable volume at nominal = 514000 gal (1945.6 m³)
- Boron concentration (nominal) = 2000 ppm (2000 - 2250 ppm) (1.144 - 1.287 w/o)
- Operating temperature = 80 F (26.7 °C)
- A Minimum water temp. = 4.4 °C (40 F)

by steam table

$$\rho = 996.8 \text{ kg/m}^3 \quad \text{at } 26.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Mass = density * volume

$$= 996.8 * 1945.6$$

$$= 1939374.08 \text{ kg (assumption: liquid mass)}$$

Boron

$$\text{Boron concentration (w/o)} = \frac{\text{Boron}}{1939374.08} \times 100 = 1.287 \text{ w/o}$$

$$\therefore \text{Mass of Boric Acid} = 22189.6 \text{ (26223.16) kg}$$

2. Accumulator [Ref: T.S.16.3/4.5-1]

- No. of accumulator = 3
- Accumulator liquid volume = 1000 ft³ (987 - 1053 ft³) (27.9 - 29.8 m³)
- Boron concentration (nominal) = 1950 ppm (1900 - 2100 ppm) (1.0869 - 1.201 w/o)
- Operating temperature = 100 - 150 F (37.8 - 65.6 °C)

by steam table

$$\rho = 980 \text{ kg/m}^3 \quad \text{at } 65.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Mass = density * (volume * no.)

$$= 980.5 * (27.9 * 3)$$

$$= 82067.85 \text{ kg (assumption: liquid mass)}$$

$$\text{Boron concentration (w/o)} = \frac{\text{Boron}}{82067.85} \times 100 = 1.087 \text{ w/o}$$

$$\therefore \text{Mass of Boric Acid} = 892.0 \text{ kg}$$

3. Boron Injection Tank [Ref: T.S. 16.3/4.5-9]

- No. of BIT = 1
- Usable volume at operating conditions = 900 gal (3.40677 m³)
- Boron concentration (nominal) = 21000 ppm (20000 - 22500 ppm) (11.44 - 12.87 w/o)
- Operating temperature = 155 - 175 F (68.3 - 79.4 °C)
- Min. solution temperature = 62.8 °C (145 F)
- Operating pressure = 30.48 mh₂o (2.93 bar)

by steam table

$$\rho = 972.03 \text{ kg/m}^3 \text{ at } 79.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Mass} = \text{density} * \text{volume}$$

$$= 972.03 * 3.40677$$

$$= 3311.47 \text{ kg (assumption: liquid mass)}$$

$$\text{Boron concentration (w/o)} = \frac{\text{Boron}}{3311.47} \times 100 = 12.8719 \text{ w/o}$$

$$\therefore \text{Mass of Boric Acid} = 378.9 \text{ kg}$$

4. Reactor Coolant System [Ref: FSAR T5.1-1]

- RCS liquid volume = 8700 ft³ (246.356 m³)
- Boron concentration (nominal) = 1025 ppm (0.5864 w/o)
(assumed) = 500 ppm ~ 1700 ppm (0.286 w/o ~ 0.973 w/o)
- Operating temperature = 619 F (326.6 °C)

by steam table

$$\rho = 648.7 \text{ kg/m}^3 \text{ at } 326.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Mass = density * volume

$$= 648.7 * 246.356$$

$$= 159813.732 \text{ kg (assumption: liquid mass)}$$

$$\text{Boron concentration (w/o)} = \frac{\text{Boron}}{159813.732} \times 100 = 0.286 \text{ w/o} \sim 0.973 \text{ w/o}$$

$$\therefore \text{Mass of Boric Acid} = 457.13 \sim 1554.25 \text{ kg}$$

부 록 [나]

**List of ECCS Components General Data
for ULCHIN 1&2**

Ulchin 1&2 Framatom Plants Specific Data for Emergency Core Cooling System

1. Refueling Water Storage Tank

- No. of RWST = 1
- Usable vol. (min.) = 1692 m³
- Nominal boron concentration = 2000 ppm 이상

2. Accumulator

- No. of Accumulator = 3
- Accumulator water volume = 26.9 ~ 28.6 m³
- Nominal boron concentration = 2000 ppm 이상

3. Boron Injection Tank

- No. of BIT = 1
- Usable vol. at operating conditions = 3.4 m³
- Nominal boron concentration = 21000 ~ 22500 ppm

4. Reactor coolant system

- System liquid volume = 272 m³
- Nominal boron concentration = 500 ~ 1700 ppm

Summary of Source of Boric Acid

	Current CB.(ppm)	Liq. Vol. (m ³)	Oper.Temp.(°C)	Boric Acid Mass (kg)
RWST	2000	1692	7 ~ 40	19355.13
Accu	2000	26.9 ~ 28.6	40	916.05 ~ 973.94
BIT	21000 ~ 22500	3.4	68	399.82 ~ 428.37
RCS	500 ~ 1700	272	304.6	546.50 ~ 1859.26

* 1 weight percent boric acid = 1748 ppm

1. Refueling Water Storage Tank [Ref: FSAR T6.3-1, T.S.16.4-21]

- No. of RWST = 1
- Usable volume at nominal = 1692 m³
- Boron concentration (min) = 2000 ppm 이상 (1.144 w/o -)
- Operating temperature & pressure = 7 °C - 40 °C & 1 atm
by steam table

$$\rho = 999.93 \text{ kg/m}^3 \quad @ 7 \text{ }^\circ\text{C}, 992.25 \text{ Kg/m}^3 @ 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Mass} = \text{density} * \text{volume}$$

$$= 999.93 * 1692$$

$$= 1691881.56 \text{ kg} \quad (\text{assumption: liquid mass})$$

$$\text{Boron concentration (w/o)} = \frac{\text{Boron}}{1691881.56} \times 100 = 1.144 \text{ w/o}$$

$$\therefore \text{Mass of Boric Acid} = 19355.13 \text{ kg}$$

2. Accumulator [Ref: FSAR T-6.3-1(1/3), T.S.16.4-27]

- No. of accumulator = 3
- Accumulator liquid volume = 26.9 ~ 28.6 m³
- Boron concentration (min) = 2000 ppm 이상 (1.144 w/o -)
- Operating temperature = 40 °C

by steam table

$$\rho = 992.25 \text{ kg/m}^3 \quad \text{at } 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Mass} = \text{density} * (\text{volume} * \text{no.})$$

$$= 992.25 * ((26.9 \sim 28.6) * 3)$$

$$= 80074.58 \sim 85135.05 \text{ kg} \quad (\text{assumption: liquid mass})$$

$$\text{Boron concentration (w/o)} = \frac{\text{Boron}}{(80074.58 \sim 85135.05)} \times 100 = 1.144 \text{ w/o}$$

$$\therefore \text{Mass of Boric Acid} = 916.05 \sim 973.94 \text{ kg}$$

3. Boron Injection Tank [Ref: FSAR T-6.3-1.T.S. 16.4-26]

- No. of BIT = 1
- Usable volume at operating conditions = 3.4 m³
- Boron concentration (nominal) = 21000 ppm ~ 22500 ppm (12.014 ~ 12.872 w/o)
- Operating temperature = 72 ~ 82 °C
- Min. solution temperature = 68 °C
- Operating pressure = 8 bar gauge

by steam table

$$\rho = 978.8 \text{ kg/m}^3 \text{ @ } 68 \text{ }^\circ\text{C}$$

Mass = density * volume

$$= 978.8 * 3.4$$

$$= 3327.92 \text{ kg (assumption: liquid mass)}$$

$$\text{Boron concentration (w/o)} = \frac{\text{Boron}}{3327.92} \times 100 = 12.014 \sim 12.872 \text{ w/o}$$

$$\therefore \text{Mass of Boric Acid} = 399.82 \sim 428.37 \text{ kg}$$

4. Reactor Coolant System [Ref: FSAR T5.1-1]

- RCS liquid volume = 272 m³
- Boron concentration (nominal) = 1025 ppm (0.5864 w/o)
(assumed) = 500 ppm ~ 1700 ppm (0.286 w/o ~ 0.973 w/o)
- Operating temperature = 304.6 °C (average)

by steam table

$$\rho = 702.52 \text{ kg/m}^3 \quad \text{at } 304.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Mass = density * volume

$$= 702.52 * 272$$

$$= 191085.44 \text{ kg (assumption: liquid mass)}$$

Boron

$$\text{Boron concentration (w/o)} = \frac{\text{Boron}}{191085.44} \times 100 = 0.286 \text{ w/o} \sim 0.973 \text{ w/o}$$

$$\therefore \text{Mass of Boric Acid} = 546.50 \sim 1859.26 \text{ kg}$$

부 록 [다]

List of Program for Boron Concentration Calculation for KORI 3&4

Program Boron_Conc: Filename is Boron6.pas

Uses CRT, DOS, GRAPH, Printer;

Const

```
xsiz           = 640;
ysiz           = 340;
xgraph : integer = xsiz - 160;
ygraph : integer = ysiz - 60;
xmar   : integer = 80;
ymar   : integer = 40;
MWWater = 18.00;
MWboron = 10.81;
maxy    = 2500.0;
miny    = 1800.0;
dely    = 100.0;
maxx    = 1700.0;
minx    = 500.0;
delx    = 100.0;
```

Type

```
minmax = Array [0..1] of real;
```

```
Factor = Record
```

```
    B, V, T : Byte;
```

```
    end;
```

```
Compdatt = Record
```

```
    name : string[8];
```

```
    B, V, T : minmax;
```

```
    rho, P : real;
```

```
    end;
```

```
property = Record
```

```
    rho, v, h, cp, s, surten, satP : extended;
```

```
    end;
```

var

```
comps : array [1..4] of compdatt;
```

```
f : array [1..4] of factor;
```

```
h2o, boron : array [1..4] of real;
```

```
outf : text;
```

```
filDat, filrota : string;
```

```
I, J, K, L, M, N : Integer;
```

```
props : property;
```

```
h2otot, borontot : real;
```

```
P, T, rho, ppm, B, V : real;
```

```
go : boolean;
```

```
Gdev, Gmode : integer;
```

```

B_RWST, B_Accu      : integer;
ch                  : char;
dx, dy              : real;
graphon, printOn    : Boolean;
Icase               : Integer;

```

\$I h2o.pas

\$I hrdcopy.pas

Procedure DrawFrame;

```

var I, J, K, L, M    : Integer;

```

```

    ip, jp           : Integer;

```

```

    ccc              : string;

```

begin

```

    dx := xgraph / (maxx-minx);

```

```

    dy := ygraph / (maxy-miny);

```

```

    SetTextStyle (0,1,1);

```

```

    OutTextXY (20, ysiz-(ygraph div 2)-ymar, 'Mixed Boron Concentration (ppm)');

```

```

    OutTextXY (60+xgraph+xmar, ysiz-(ygraph div 2)-ymar,

```

```

        'Post-LOCA LTC Critical Cb (ppm)');

```

```

    SetTextStyle (0,0,1);

```

```

    OutTextXY (Xmar + Xgraph div 2, ysiz-10, 'RCS Boron Concentration (ppm)');

```

```

    For I := trunc(minx/delx) to trunc(maxx/delx) do

```

begin

```

        ip := round((I-trunc(minx/delx))*dx*delx) + xmar;

```

```

        moveto (ip, ysiz-ymar); linerel (0, -ygraph);

```

```

        str ((I*delx):4:0, ccc);

```

```

        OutTextXY (ip, ysiz-ymar+8, ccc);

```

end;

```

    For J := trunc(miny/dely) to trunc(maxy/dely) do

```

begin

```

        jp := round((J-trunc(miny/dely))*dy*dely) + ymar;

```

```

        moveto (xmar, ysiz-jp); linerel (xgraph, 0);

```

```

        str ((J*dely):4:0, ccc);

```

```

        OutTextXY (xmar div 2+20, ysiz-jp, ccc);

```

```

        OutTextXY (xgraph+xmar+25, ysiz-jp, ccc);

```

end;

end;

Procedure CalcBconc;

var

```

    Bconcl      : integer;

```

```

    ip, jp      : integer;

```

```

    Bconc       : real;

```

```

ccc      : string;
rhoo     : array [1..4] of real;
P, T, B, V : real;
begin
  B := 0.0;
  For I := 1 to 4 do
    begin
      P := comps[I].P * 1.00e5;
      T := comps[I].T[f[I].T] + 273.15;
      B := comps[I].B[f[I].B];
      V := comps[I].V[f[I].V];
      h2oprop (P, T, props);
      rhoo[I] := props.rho;
    end;
  If not graphon then
    begin
      gotoXY (1,1);
      writeln (' ICASE = ', Icase);
      1234567/1234567/1234567/1234567/1234567/1234567/
      writeln ('  Comp  P(bar)  T(C)  B(ppm)  V(m3)  rho ');
    end;
  if printon then
    begin
      writeln (outf);
      writeln (outf, ' ICASE = ', Icase);
      writeln (outf, '  Comp  P(bar)  T(C)  B(ppm)  V(m3)  rho ');
    end;
  For I := 1 to 4 do
    begin
      If not graphon then
        begin
          if (I = 1) then
            writeln (comps[I].name,      comps[I].P:8:2,
                    comps[I].T[f[I].T]:8:2, ' *****',
                    comps[I].V[f[I].V]:8:1, rhoo[I]:8:1)
          else
            writeln (comps[I].name,      comps[I].P:8:2,
                    comps[I].T[f[I].T]:8:2, comps[I].B[f[I].B]:8:0,
                    comps[I].V[f[I].V]:8:1, rhoo[I]:8:1);
          end;
        if printon then
          begin
            if (I = 1) then

```

```

        writeln (ouf,
                comps[I].name,          comps[I].P:8:2,
                comps[I].T[f[I].T]:8:2, ' *****',
                comps[I].V[f[I].V]:8:1, rhoo[I]:8:1)
    else
        writeln (ouf,
                comps[I].name,          comps[I].P:8:2,
                comps[I].T[f[I].T]:8:2, comps[I].B[f[I].B]:8:0,
                comps[I].V[f[I].V]:8:1, rhoo[I]:8:1);
    end;
end;
if not graphon then begin writeln; writeln end;
if printon then begin writeln (ouf); writeln (ouf); end;
For Bconcl := trunc(minx/delx) to trunc(maxx/delx) do
begin
    Bconc    := Bconcl*delx;
    h2otot   := 0.0;
    borontot := 0.0;
    rho      := rhoo[I];
    h2o[I]   := comps[I].V[f[I].V] * rho;
    boron[I] := h2o[I] * MWBoron/MWWater * BConc/1.0e6;
    h2otot   := h2otot +h2o[I];
    borontot := borontot+boron[I];
    writeln (h2otot, borontot);
    For l := 2 to 4 do
    begin
        rho := rhoo[l];
        h2o[l] := comps[l].v[f[l].V] * rho;
        boron[l] := h2o[l] * MWBoron/MWWater * comps[l].b[f[l].B]/1.0e6;
        h2otot := h2otot +h2o[l];
        borontot := borontot+boron[l];
        writeln ('l = ', l:3, h2otot, borontot);
    end;
ppm := MWwater/MWboron * borontot/h2otot*1.0e6;
if graphon then
begin
    ip := round ((Bconc-minx)/(maxx-minx)*xgraph) + xmar;
    jp := round ((ppm -miny)/(maxy-miny)*ygraph) + ymar;
    jp := ysiz - jp;
    if (Bconcl = trunc(minx/delx)) then moveto (ip, jp)
    else
    begin
        lineto (ip, jp);
    end;
end;

```

```

    if (Bconcl = trunc((minx+maxx)/2.0/delx+4)) then
    begin
        str (comps[2].B[1]:4:0, ccc);
        lineto (ip+5, jp-10);
        OutTextXY (ip+5, jp-10, ccc);
        moveto (ip, jp);
    end;
end;
else
    writeln (' RCS ppm = ', BConc:8:1, ' =>  mixture ppm = ', ppm:12:3);
    if printon then write (outf, ppm:7:1);
end;
if printon then writeln (outf);
inc (ICase);
if not graphon then ch := readkey
end;
Procedure IntFiles;
begin
    fildat := 'boron.dat';
    writeln (' The resulting data will be in file "', fildat, '"');
    write (' -- HIT ANY KEY to START -- '); ch := readkey;
    assign (outf, fildat);
    rewrite (outf);
    clrscr;
end;
Procedure InitVar;
begin
    Component RCS
    comps[1].name := ' RCS ';
    comps[1].B[0] := 500.0; comps[1].B[1] := 1700.00;
    comps[1].V[0] := -1.0; comps[1].V[1] := 246.36;
    comps[1].T[0] := -1.0; comps[1].T[1] := 326.60;
    comps[1].P := 155.0; comps[1].P[1] := 155.00;
    Component RWST
    comps[2].name := ' RWST ';
    comps[2].B[0] := 2000.0; comps[2].B[1] := 2250.0;
    comps[2].V[0] := 1945.6; comps[2].V[1] := 1945.6;
    comps[2].T[0] := -1.0; comps[2].T[1] := 26.7;
    comps[2].P := 1.0; comps[2].P[1] := 1.5;
    Component ACCU
    comps[3].name := ' ACCU ';
    comps[3].B[0] := 1900.0; comps[3].B[1] := 1900.0;

```

```

comps[3].V[0] := 27.9;   comps[3].V[1] := 29.8;
comps[3].T[0] := 37.8;   comps[3].T[1] := 37.8;
comps[3].P := 42.2;   comps[3].P[1] := 48.0;
Component BIT
comps[4].name := ' BIT ';
comps[4].B[0] := 20000.0;   comps[4].B[1] := 22500.0;
comps[4].V[0] := 3.4;   comps[4].V[1] := -1.0;
comps[4].T[0] := 79.4;   comps[4].T[1] := 79.4;
comps[4].P := 1.0;   comps[4].P[1] := 2.93;
go := true;
ICase := 1;
end;
Procedure IntGraph;
begin
    Detectgraph (Gdev, Gmode);
    InitGraph (Gdev, Gmode, "");
    SetViewPort (0, 0, xsiz-1, ysiz-1, clipon);
    SetTextJustify (CenterText, CenterText);
    DrawFrame;
end;
Procedure Prtscr;
begin
    if xsiz > 640 then hardcopy (true, 2)
    else hardcopy (true, 6);
end;
Procedure Alls_Well_that_Ends_Well;
begin
    if printon then
        begin
            close (outf);
        end;
    if Graphon then prtscr;
end;
begin
    InitVar;
    clrscr;
    write ('Want a graph ? (y/n) - '); ch := readkey;
    writeln;
    if ((ch = 'y') or (ch = 'Y')) then graphon := true
    else begin clrscr; graphon := false; end;
    write ('Want to save data on file ? (y/n) - '); ch := readkey;
    writeln;
    if ((ch = 'y') or (ch = 'Y')) then printon := true

```

```

    else begin clrscr; printon := false; end;
if printon then IntFiles:
if Graphon then IntGraph:
f[1].V := 1; f[1].B := 1; f[1].T := 1;  RCS
f[2].V := 1; f[2].B := 1; f[2].T := 1;  RWST
f[3].V := 1; f[3].B := 1; f[3].T := 1;  Accumulator
f[4].V := 0; f[4].B := 0; f[4].T := 0;  BIT
for B_RWST := 19*2 to 25*2 do
begin
    comps[2].B[1] := B_RWST * 50.0;
    for B_Accu := 23*2 to 25*2 do
    begin
        comps[3].B[1] := B_Accu * 50.0;
        comps[3].B[0] := B_Accu * 50.0;
        calcBconc;
        if keypressed then
        begin
            ch := readkey;
            if (((ch='h') or (ch='H')) and graphon)
            then prtscr;
        end;
    end;
end;
end;
Alls_Well_that_Ends_Well:

```

부 록 [라]

**List of Program for Boron Concentration Calculation
for ULCHIN 1&2**

Program Boron_Conc; Filename is Boron8.pas

Uses CRT, DOS, GRAPH, Printer;

Const

```
xsiz          = 640;
ysiz          = 340;
xgraph : integer = xsiz - 160;
ygraph : integer = ysiz - 60;
xmar  : integer = 80;
ymar  : integer = 40;
MWWater = 18.00;
MWboron = 10.81;
maxy    = 2700.0;
miny    = 1900.0;
dely    = 100.0;
maxx    = 1700.0;
minx    = 500.0;
delx    = 100.0;
```

Type

```
minmax = Array [0..1] of real;
```

```
Factor = Record
```

```
    B, V, T : Byte;
```

```
end;
```

```
Compdat = Record
```

```
    name : string[8];
```

```
    B, V, T : minmax;
```

```
    rho, P : real;
```

```
end;
```

```
property = Record
```

```
    rho, v, h, cp, s, surten, satP : extended;
```

```
end;
```

var

```
comps : array [1..4] of compdat;
```

```
f : array [1..4] of factor;
```

```
h2o, boron : array [1..4] of real;
```

```
outf : text;
```

```
filDat, filota : string;
```

```
l, J, K, L, M, N : Integer;
```

```
props : property;
```

```
h2otot, borontot : real;
```

```
P, T, rho, ppm, B, V : real;
```

```
go : boolean;
```

```
Gdev, Gmode : integer;
```

```

B_RWST, B_Accu      : integer;
ch                  : char;
dx, dy              : real;
graphon, printOn    : Boolean;
lcase               : Integer;

```

\$I h2o.pas

\$I hrdcopy.pas

Procedure DrawFrame;

```
var I, J, K, L, M    : Integer;
```

```
    ip, jp           : Integer;
```

```
    ccc              : string;
```

begin

```
    dx := xgraph / (maxx-minx);
```

```
    dy := ygraph / (maxy-miny);
```

```
    SetTextStyle (0,1,1);
```

```
    OutTextXY (20, ysiz-(ygraph div 2)-ymar, 'Mixed Boron Concentration (ppm)');
```

```
    OutTextXY (60+xgraph+xmar, ysiz-(ygraph div 2)-ymar,
```

```
                'Post-LOCA LTC Critical Cb (ppm)');
```

```
    SetTextStyle (0,0,1);
```

```
    OutTextXY (Xmar + Xgraph div 2, ysiz-10, 'RCS Boron Concentration (ppm)');
```

```
    For I := trunc(minx/delx) to trunc(maxx/delx) do
```

begin

```
        ip := round((1-trunc(minx/delx))*dx*delx) + xmar;
```

```
        moveto (ip, ysiz-ymar); linerel (0, -ygraph);
```

```
        str ((I*delx):4:0, ccc);
```

```
        OutTextXY (ip, ysiz-ymar+8, ccc);
```

end;

```
    For J := trunc(miny/dely) to trunc(maxy/dely) do
```

begin

```
        jp := round((J-trunc(miny/dely))*dy*dely) + ymar;
```

```
        moveto (xmar, ysiz-jp); linerel (xgraph, 0);
```

```
        str ((J*dely):4:0, ccc);
```

```
        OutTextXY (xmar div 2+20, ysiz-jp, ccc);
```

```
        OutTextXY (xgraph+xmar+25, ysiz-jp, ccc);
```

end;

end;

Procedure CalcBconc;

var

```
    Bconcl    : integer;
```

```
    ip, jp    : integer;
```

```
    Bconc     : real;
```

```

ccc      : string;
rhoo     : array [1..4] of real;
P, T, B, V : real;
begin
  B := 0.0;
  For I := 1 to 4 do
    begin
      P := comps[I].P * 1.00e5;
      T := comps[I].T[f[I].T] + 273.15;
      B := comps[I].B[f[I].B];
      V := comps[I].V[f[I].V];
      h2oprop (P, T, props);
      rhoo[I] := props.rho;
    end;
  If not graphon then
    begin
      gotoXY (1,1);
      writeln (' ICASE = ', Icase);
      1234567/1234567/1234567/1234567/1234567/1234567/
      writeln (' Comp P(bar) T(C) B(ppm) V(m3) rho ');
    end;
  if printon then
    begin
      writeln (outf);
      writeln (outf, ' ICASE = ', Icase);
      writeln (outf, ' Comp P(bar) T(C) B(ppm) V(m3) rho ');
    end;
  For J := 1 to 4 do
    begin
      If not graphon then
        begin
          if (I = 1) then
            writeln (comps[I].name, comps[I].P:8:2,
                    comps[I].T[f[I].T]:8:2, ' *****',
                    comps[I].V[f[I].V]:8:1, rhoo[I]:8:1)
          else
            writeln (comps[I].name, comps[I].P:8:2,
                    comps[I].T[f[I].T]:8:2, comps[I].B[f[I].B]:8:0,
                    comps[I].V[f[I].V]:8:1, rhoo[I]:8:1);
        end;
      if printon then
        begin
          if (I = 1) then

```

```

writeln (outf,
        comps[I].name,          comps[I].P:8:2.
        comps[I].T[f[I].T]:8:2. ' *****',
        comps[I].V[f[I].V]:8:1. rhoo[I]:8:1)
else
writeln (outf,
        comps[I].name,          comps[I].P:8:2.
        comps[I].T[f[I].T]:8:2. comps[I].B[f[I].B]:8:0.
        comps[I].V[f[I].V]:8:1. rhoo[I]:8:1);
end;
end;
if not graphon then begin writeln; writeln end;
if printon then begin writeln (outf); writeln (outf); end;
For BConcl := trunc(minx/delx) to trunc(maxx/delx) do
begin
  Bconc := Bconcl*delx;
  h2otot := 0.0;
  borontot := 0.0;
  rho := rhoo[1];
  h2o[1] := comps[1].V[f[1].V] * rho;
  boron[1] := h2o[1] * MWBoron/MWWater * BConc/1.0c6;
  h2otot := h2otot +h2o[1];
  borontot := borontot+boron[1];
  writeln (h2otot, borontot);
  For I := 2 to 4 do
  begin
    rho := rhoo[I];
    h2o[I] := comps[I].v[f[I].V] * rho;
    boron[I] := h2o[I] * MWBoron/MWWater * comps[I].b[f[I].B]/1.0c6;
    h2otot := h2otot +h2o[I];
    borontot := borontot+boron[I];
    writeln ('I = ', I:3, h2otot, borontot);
  end;
  ppm := MW\water/MWboron * borontot/h2otot*1.0c6;
  if graphon then
  begin
    ip := round ((Bconc-minx)/(maxx-minx)*xgraph) + xmar;
    jp := round ((ppm -miny)/(maxy-miny)*ygraph) + ymar;
    jp := ysiz - jp;
    if (Bconcl = trunc(minx/delx)) then moveto (ip, jp)
    else
    begin
      lineto (ip, jp);
    end;
  end;
end;

```

```

    if (Bconcl = trunc((minx+maxx)/2.0/delx+4)) then
    begin
        str (comps[2].B[1]:4:0, ccc);
        lineto (ip+5, jp-10);
        OutTextXY (ip+5, jp-10, ccc);
        moveto (ip, jp);
    end;
end;
end
else
    writeln (' RCS ppm = ', BConc:8:1, ' =>  mixture ppm = ', ppm:12:3);
if printon then write (outf, ppm:7:1);
end;
if printon then writeln (outf);
inc (ICase);
if not graphon then ch := readkey

```

end;

Procedure IntFiles;

begin

```

    fildat := 'boron.dat';
    writeln (' The resulting data will be in file "', fildat, '"');
    write (' -- HIT ANY KEY to START -- '); ch := readkey;
    assign (outf, fildat);
    rewrite (outf);
    clrscr;

```

end;

Procedure InitVar;

begin

Component RCS

```

comps[1].name := ' RCS ';
comps[1].B[0] := 500.0;   comps[1].B[1] := 1700.0;
comps[1].V[0] := -1.0;   comps[1].V[1] := 272.0;
comps[1].T[0] := -1.0;   comps[1].T[1] := 304.6;
comps[1].P := 155.0;   comps[1].P[1] := 155.0;

```

Component RWST

```

comps[2].name := ' RWST ';
comps[2].B[0] := 2000.0;   comps[2].B[1] := 2300.0;
comps[2].V[0] := 1692.0;   comps[2].V[1] := 1692.0;
comps[2].T[0] := -1.0;   comps[2].T[1] := 7.0;
comps[2].P := 1.0;   comps[2].P[1] := 1.5;

```

Component ACCU

```

comps[3].name := ' ACCU ';
comps[3].B[0] := 2000.0;   comps[3].B[1] := 2000.0;

```

```

comps[3].V[0] := 26.9;   comps[3].V[1] := 28.6;
comps[3].T[0] := 40.0;   comps[3].T[1] := 40.0;
comps[3].P   := 41.4;   comps[3].P[1] := 43.8;
  Component BIT
comps[4].name := ' BIT ';
comps[4].B[0] := 21000.0;   comps[4].B[1] := 22500.0;
comps[4].V[0] := 3.4;   comps[4].V[1] := -1.0;
comps[4].T[0] := 68.0;   comps[4].T[1] := 68.0;
comps[4].P   := 1.0;   comps[4].P[1] := 2.93;
go := true;
Icase := 1;
end;
Procedure IntGraph;
begin
  Detectgraph (Gdev, Gmode);
  InitGraph (Gdev, Gmode, "");
  SetViewport (0, 0, xsiz-1, ysiz-1, clipon);
  SetTextJustify (CenterText, CenterText);
  DrawFrame;
end;
Procedure Prtscr;
begin
  if xsiz > 640 then hardcopy (true, 2)
  else hardcopy (true, 6);
end;
Procedure Alls_Well_that_Ends_Well;
begin
  if printon then
  begin
    close (outf);
  end;
  if Graphon then prtscr;
end;
begin
  InitVar;
  clrscr;
  write ('Want a graph ? (y/n) - '); ch := readkey;
  writeln;
  if ((ch = 'y') or (ch = 'Y')) then graphon := true
  else begin clrscr; graphon := false; end;
  write ('Want to save data on file ? (y/n) - '); ch := readkey;
  writeln;
  if ((ch = 'y') or (ch = 'Y')) then printon := true

```

```

    else begin clrscr; printon := false; end;
if printon then IntFiles;
if Graphon then IntGraph;
f[1].V := 1; f[1].B := 1; f[1].T := 1: RCS
f[2].V := 1; f[2].B := 1; f[2].T := 1: RWST
f[3].V := 1; f[3].B := 1; f[3].T := 1: Accumulator
f[4].V := 0; f[4].B := 0; f[4].T := 0: BIT
for B_RWST := 20*2 to 27*2 do
begin
    comps[2].B[1]:= B_RWST * 50.0;
    for B_Accu := 23*2 to 25*2 do
    begin
        comps[3].B[1] := B_Accu * 50.0;
        comps[3].B[0] := B_Accu * 50.0;
        calcBconc;
        if keypressed then
        begin
            ch := readkey;
            if (((ch='h') or (ch='H')) and graphon)
            then prtscr;
        end;
    end;
end;
end;
Alls_Well_that_Ends_Well;
end.

```

서 지 정 보 양 식

수행기관 보고서번호	위탁기관 보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-785/96					
제 목/부 제	국내 웨스팅하우스 3-루프형 원전의 냉각재상실사고후 장기간냉각중 붕소석출방지를 위한 운전절차 확립				
주저자 및 부서명	최 한 립 (노심안전해석분야)				
공동저자 및 부서명	권 태 순 (노심안전해석분야), 반 창 환 (노심안전해석분야), 정 재 훈 (노심안전해석분야), 이 영 진 (동력로개발팀)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1996.11.30
페이지	61 p.	도 표	있음(○), 없음()	크 기	30 cm
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비(), ___급비밀			보고서 종류	기술보고서
연구위탁기관				계 약 번 호	
초록 (15-20줄 내외)	<p>교체노심의 장주기운전을 함에 따라 노심 잉여반응도의 증가는 post-LOCA의 정지여유도 확보를 위하여 RWST의 붕산 농도증가를 요구하게된다. 이의 정량화를 위하여 post-LOCA시 RWST의 붕산농도에 따른 post-LOCA RCS/Sump 혼합평균붕산농도 산출방법이 개발되었으며, 이는 국내 웨스팅하우스 3-Loop형 원전인 고리3&4 호기와 울진1&2 호기에 적용하였다. 또한 적용결과의 post-LOCA시 RWST의 붕산농도에 따른 post-LOCA RCS/Sump 혼합평균붕산농도를 핵설계분야의 안전성분석사고인 붕산회석 사고시 충분한 정지여유도가 확보되는 RWST와 Accumulator의 증가된 최소붕산농도를 정하게된다. 그러나 이러한 붕산농도의 증가는 post-LOCA시 노심의 기하학적 형상 유지를 위하여 방지되어야하는 노심내 붕소석출에 의하여 제한되며, 재장전시 원전 운전의 편리성을 반영하여 최대 붕산농도값이 결정된다</p> <p>결과적으로 국내 웨스팅하우스 3루프형 원전에서 12개월 핵연료주기에서 18개월로 장주기 운전시 냉각재상실사고후 장기간 냉각능력을 유지할 목적으로, 증가한 붕산농도로써 노심에서의 붕소석출을 막기위해 Boron코드를 사용하여 고온관 재순환 전환시간을 계산하였다. 해석결과에 의하면, 고온관 재순환전환시간이 고리3&4 호기는 냉각재상실사고후 24시간에서 7.5 시간으로, 울진1&2호기는 18시간에서 8시간으로 각각 단축되었다. 그리고 고리3&4 호기 모드J의 유로는 울진1&2 호기와 같이 저온관 재순환모드에서 고온관과 저온관의 동시 재순환 모드로 정렬토록 하는 것이 바람직하다고 사료된다.</p>				
주제명 키워드(10 단어내외)	<p>장주기운전, post-LOCA, LTC, 붕산농도, 붕소회석사고, 잉여반응도, 고온관재순환, 전환시간, 붕소석출, 고리3&4호기, 울진1&2호기</p>				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.	Sponsoring Org. Report No.	Standard Report No.	INIS Subject Code		
KAERI/TR-785/96					
Title/Subtitle	Establishment of the Operating Procedure to Prevent Boron Precipitation during Post-LOCA Long Term Cooling for Korean Westinghouse 3-Loop NPPs.				
Principal Author and Department	Choi, Han Rim (Reactor Core Safety Analysis Department)				
Co-worker and Department	Kwon, Tae Soon, Ban, Chang Hwan, Jeong, Jae Hoon (Reactor Core Safety Analysis Department). Lee, Young Jin (Advanced Reactor Development Team)				
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	1996.11.30
Page	61 p.	Ill. & Tab.	Yes (o), No ()	Size	30 cm
Note	LWR Fuel Project				
Classified	Open (o), Restricted (), ___ Class Document		Report Type	Technical Report	
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)	<p>During post-LOCA LTC the increase of the excess reactivity for the extended fuel cycle should require increasing the RWST boron concentration in order to ensure core subcritical state. To quantify the concentration increment, the calculation method was developed for the post-LOCA RCS/Sump mixed mean boron concentration, which applied for Kori3&4 and Ulchin1&2 of the Westinghouse 3-loop nuclear power plants in Korean. From the calculation results, the minimum boric acid concentrations increased of the RWST and accumulator were determined to sufficiently shutdown in the boron dilution accident. However, these concentration increases were limited to prevent boron precipitation in the reactor core and maximum values of them were determined in consideration of the convenient operation for operator on reloading.</p> <p>Boric acid concentrations of the RWST and the accumulators for Westinghouse 3-loop type plants were increased to meet the post-LOCA shutdown requirement for the long life cycles from 12 months to 18 months. To maintain LTC capability following a LOCA, the switchover time is examined using Boron code to prevent the boron precipitation in the reactor core with the increased boron concentrations. The analysis results showed that hot leg recirculation switchover times were shortened to 7.5 hours from 24 hours after the initiation of LOCA for Kori 3&4 and 8 hours from 18 hours for Ulchin 1&2, respectively. The flow path in the mode J for Kori 3&4 was recommended to realign to the simultaneous recirculation of both hot and cold legs from the cold leg recirculation, as done by Ulchin 1&2.</p>				
Subject Keywords (About 10 words)	Long Term Cooling, Post-LOCA, , Boron, Boron Dilution Accident, Excess Reactivity, Hot Leg Recirculation, Switchover, Boron Precipitation. Kori3&4, Ulchin1&2				