

2013년 2월
석사학위논문

붕소주입탱크(BIT) 제거의 장기
노심 냉각에 미치는 영향에 관한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 정 진

붕소주입탱크(BIT) 제거의 장기 노심 냉각에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Influence of Boron Injection Tank
Removal on (Post) LOCA Long-term core cooling
for Yonggwang NPP #1, 2

2013년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 정 진

붕소주입탱크(BIT) 제거의 장기 노심 냉각에 미치는 영향에 관한 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

박 정 진

박정진의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 (인)

위 원 조선대학교 교수 송종순 (인)

위 원 조선대학교 교수 이경진 (인)

2012년 11월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	ii
그림 목차	iii
ABSTRACT	v
제1장 서 론	1
제 1 절 붕소주입탱크(BIT)에 제거 배경	1
제 2 절 국내·외 추진 현황	1
1. 국내	1
2. 국외	2
제 2 장 원자력 비상노심냉각계통에 대한 고찰	3
제 1 절 비상노심냉각계통	3
1. 정의	3
2. 비상노심냉각계통의 기능	3
3. 비상노심냉각계통의 안전 설계기준	4
4. 비상노심냉각계통의 허용기준	5
5. 비상노심냉각계통 구성	5
6. 비상노심냉각계통 운전	6
제 2 절 붕소주입계통	6
1. 구성	6
2. 붕소주입계통 기능	6
3. 붕소주입계통 설계	6
4. 운영기술지침서 사항	9
제 3 장 붕소주입탱크(BIT)의 제거에 대한 분석	10
제 1 절 붕소주입탱크(BIT)에 제거에 따른 경제적, 기술적 효과	10
1. 경제적 효과	10
2. 기술적 효과	11

3. BIT 제거방법에 따른 장·단점 비교	11
제 2 절 장기노심냉각 평가	14
1. 노심의 미입계 확인	14
2. 노심 내 붕소 석출 방지	15
3. 최소 안전주입 유량 확인	17
제 3 절 기준 노심장전 모형 평가	18
1. 고리 2호기	18
2. 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기	18
제 4 장 BIT 제거에 따른 개선방안	22
제 5 장 결 론	25
참고문헌	27

표 목 차

표 3.3.2 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기 BIT 제거 시 SAT의 NaOH 농도 변경	18
표 3.2.3 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기 BIT 제거 시 LOCA 후 미임계 여유도(ppm)	19

그림 목 차

그림 3.1.3-1 BIT 제거 전 주증기관 파단사고시 원자로 출력변화	12
그림 3.1.3-2 BIT 제거 후 주증기관 파단사고시 원자로 출력변화	13
그림 3.1.3-3 BIT 제거 전 2차측 부주의한 밸브개방 사고시 원자로 출력변화	14
그림 3.3.2-1 BIT 제거 전/후의 고리 2호기 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소 농도	20
그림 3.3.2-2 BIT 제거 전/후의 고리 3,4 및 영광 1,2호기 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소 농도	21
그림 4-1 고리 2호기 BIT 계통도	23
그림 4-2 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기 BIT 계통도 (변경전)	24
그림 4-3 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기 BIT 계통도 (변경후)	25

ABSTRACT

A Study on the Influence of Boron Injection Tank Removal on (Post) LOCA Long-term core cooling for Yonggwang NPP #1, 2

By Park, Jeong Jin

Adviser : Prof. Song, Jong Sun, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

Boron injection tank of Younggwang Units 1/2 contains boric acid solution with a 20,000ppm of boron concentration with 900 gallons of volume. Original design of BIT is to prevent return to power to criticality after a main steam line break event. Because of high boron concentration in BIT system, it is necessary for the design improvement to mitigate burden of maintenance such keeping high temperature with heat tracing to prevent boric acid precipitation for relating systems.

Elimination of the BIT would result in a situation in which SI water from the lower boron concentration RWST(2,450ppm) provides the primary means of boration needed to achieve adequate shutdown margin for these rapid cooldown events.

Following analyses should be performed to eliminate BIT. And technical bases for design modification will be prepared in this study.

- Evaluation of Post LOCA Long-term core cooling
 - Confirmation of core subcriticality
 - Prevention of boric acid precipitation in core
 - Confirmation of minimum safety injection flow

제 1 장 서 론

고리 2호기 및 고리 3,4, 영광 1,2호기의 붕소주입탱크는 비상노심냉각계통의 일부로서 900gal의 용량을 가진 20,000ppm의 고농도 붕산수를 저장하고 있으며 안전주입신호에 SI펌프를 통하여 붕산수가 원자로에 주입된다. 붕소주입탱크는 주증기관 파단사고(MSLB)시 사고초기 노심 출력급증을 방지하고 지속적으로 재장전수저장탱크(RWST)로부터 2,450ppm 정도의 붕산수가 공급됨으로써 원자로를 안전정지 시키도록 설계되어있다. 그러나 BIT 제거 후에도 장기간 노심냉각시 노심의 미입계는 충분한 여유도를 가지고 보장되는지를 알아보고 BIT 제거시 설비 개선등을 통한 발전소 효율성 향상에 기여하고자 본 연구를 시작하게 되었다.

제 1 절 붕소주입탱크(BIT)제거 배경

웨스팅 하우스형 발전소¹⁾에 있는 붕소주입탱크(이하 BIT)는 주증기관 파단 사고시 원자로 노심의 출력 급증을 방지하기위해 약 20,000 ~ 22,500 ppm의 고농도 붕산수를 원자로 노심에 주입하는 기능을 가지고 있다.

그러나, 고압 충전수와 인접한 BIT 격리밸브의 누설로 BIT 붕소농도가 희석되어 발전소안전 운전에 영향을 미치는 사례가 발생되고 BIT 내의 고농도 붕산수의 건전성 유지를 위한 보조 계통의 운전 및 유지 비용이 증가하고 있다.

이에 주증기관 파단사고 등의 안전 분석을 통해, 원자로 노심에 추가로 공급되는 연료 재장전수탱크(이하 RWST)의 약 2,450 ~ 2,600 ppm 정도의 붕산수로도 사고를 완화할 수 있음을 확인하고 발전소 안전성 향상 및 이용율 증가를 도모 하고자 BIT 제거 설계변경을 추진하고 있다.

제 2 절 국내외 추진 현황

1. 국내

고리 1호기는 전력연구원 안전분석 그룹의 안전해석 결과 BIT와 유사설비인 붕산저장탱크(BAT²⁾)로부터 안전주입기능을 제거하고 RWST만으로 사고를 완화 할 수 있는

1) 웨스팅 하우스형 발전소 : 고리 2호기, 고리 3,4, 영광 1,2호기

것으로 확인되어 '09.7월 현재 안전주입기능을 제거한 상태로 운영중이다.

2. 국외

'94년 웨스팅 하우스형 발전소인 미국의 KNPP(Kewaunee Nuclear Power Plant)가 BIT 설비제거에 관한 안전성 해석 결과 안전성에 문제가 없어 NRC 승인을 득한 후 웨스팅 하우스형 원전 다수(46/49원전)가 BIT 설비를 제거하여 운영 중이다.

가. 미국 내 Westinghouse형 원전에 대한 BIT 제거 현황

BIT 제거 유무	BIT 제거 형태		호기수
BIT 기능 제거	Bypass		6
	BIT 현장 유지(농도저감)		11
	BIT 및 관련기기 완전철거		4
	건설시 BIT 제거		6
	단순 제거표시		16
	기타	EBS 제거(BIT 기능 EBS 담당)	
건설중(Watts Bar 2호기, BIT 언급 없으나 제거 예상)		1	
BIT 유지			3
계			49

2) BAT(고리 1호기) : BIT설비가 없으며, BAT(보론농도 : 20,000ppm)가 BIT기능까지 하도록 설계되어 있음

제 2 장 비상 노심 냉각 계통에 대한 고찰

제 1 절 비상 노심 냉각 계통 (Emergency Core Cooling System)

1. 정의

비상 노심 냉각 계통은 내진 I 등급 계통이며, 발전소의 안전에 관련된 계통으로서 충전 펌프(High Head Safety Injection Pump), 붕소 주입 탱크(Boron Injection Tank), 연료 재장전수 저장 탱크(Refueling Water Storage Tank), 잔열제거 펌프(Low Head Safety Injection Pump), 안전 주입 탱크(Accumulator) 및 관련된 밸브, 배관, 계측기로 구성되어 있다.

2. 비상 노심 냉각 계통 기능

비상 노심 냉각 계통의 주 기능은 사고 발생 등으로 인한 비상시 고농도의 붕산수를 주입하여 원자로 노심에서 발생하는 핵분열 생성물의 붕괴열과 축적된 열을 제거하고, 핵연료의 유효 증배 계수(Keff)를 미 임계 상태로 유지하는 것이다. 따라서 비상 노심 냉각 계통은 핵연료봉의 손상을 방지하고 건전성을 유지시킨다.

가. 비상 노심 냉각 계통은 아래에 기록된 사고 발생 후에도 원자로가 충분한 미 임계 상태를 유지하도록 부(-) 반응도를 부여하고, 노심을 냉각시키는 기능을 제공한다.

- (1) 냉각재 상실 사고(Loss of Coolant Accident) 즉, 정상 충전 유량보다 큰 냉각재 누설량을 갖는 사고,
- (2) 원자로 용기 상부 영역에서 냉각재 상실을 초래하는 제어봉 구동 기구(Control Rod Drive Mechanism) 보호관 파열로 인한 제어봉 뭉치 이탈 사고(Rod Ejection Accident)
- (3) 2차 측 냉각수 상실 사고 즉, 주증기관 파단에 의한 제어 불능의 증기 방출 혹은 주급수관 파단에 의한 제어 불능의 급수 상실 사고 (Main Steam Line Rupture or Feed Water Line Rupture)
- (4) 증기 발생기 튜브 파열 사고(S/G Tube Rupture) 등이다.

나. 비상 노심 냉각 계통은 사고 시 붕소 주입 탱크(BIT)의 고농도 붕산수를 먼저 주입하도록 설계되어 있는데 이는 1차 측이 과잉 냉

각됨에 따라 정(+) 반응도가 인가되어 노심이 임계에 재 도달하는 것을 방지하기 위함이다.

3. 비상 노심 냉각 계통의 안전 설계 기준 (Safety Design Bases)

요구되는 발전소의 모든 운전 조건하에서 이 계통의 고유 설계 기능을 수행할 수 있도록 하기 위하여 비상 노심 냉각 계통에 설정된 기준이다.

항목	비상 노심 냉각 계통
폭풍, 해일 등의 자연 현상과 외부 비산물	보호
안전 정지 지진(SSE)이 발생 시	유지
한 계열의 계통 기능 및 외부 전원 공급 상실 시	유지
운전 중에도 기능점검	가능
ECCS Acceptance Criteria (10 CFR 50.46)의 수용 범위 설계 기준	충족
모든 사고 이후의 상황	운전
계통이 운전 중에도 기능점검(능동적 구성요소)	가능

비상 노심 냉각 계통의 능동적 구성 요소는 모두 2계열씩 구성되어 다중성을 갖는다. 즉, 한 계열의 기기만으로도 100 % 고유 설계 기능을 수행할 수 있으므로 비상 사고 시 사태를 수습할 수 있는 확률을 높였다.

비상 노심 냉각 계통은 안전 주입(Safety Injection) 및 재순환(Recirculation) 운전 형태 동안 능동적 기능 상실(Active Failure)시에도 고유 설계 기능을 완전히 발휘할 수 있도록 설계되어 있다. 여기서 “능동적 기능 상실”이란 계통 내에서 동작 신호 발생(안전 주입 신호 등) 상태에서 구성 요소(펌프, 밸브 등)의 기능 상실을 말한다.

계통의 다중성과 격리 계통의 구성 요소로부터 비상 노심 냉각 계통은 재순환 운전 형태 동안 수동적인 기능 상실에도 고유 설계 기능을 발휘할 수 있도록 하였다. 여기서 “수동적 기능 상실”(Passive Failure)이란 수동적 구성 요소의 기능 상실로서 밸브의 밀봉 부위, 배관의 플랜지(Flange) 등의 기능 상실을 의미한다. 예를 들어 예상할 수 있는 가장 심각하고, 확실하며, 장기간 동안에 걸쳐서 진행될 수 있는 수동적 구성 요소의 기능 상실은 펌프 축 밀봉 기능 상실 등이다.

4. 비상노심냉각계통의 허용기준(ECCS Acceptance Criteria)

10 CFR 50.46에서 규정한 수용 범위는 다음과 같다. 즉, 이는 냉각재 상실 사고 등에 따라 비상 노심 냉각 계통이 냉각 기능을 발휘하여 다음 사항을 만족하도록 설계 기준이 정해져 있다.

항 목	설계 기준 제한치
핵연료 피복재의 표면 최대 온도	1,204 °C (2,200 °F) 이하
핵연료 피복재의 산화율	피복재 두께의 17 % 이하
지르코늄(Zr)과 물(H ₂ O)의 반응으로 인한 수소(H ₂) 생성량	노심 내의 모든 지르코늄(Zr)이 물과 반응 시 생성되는 총 수소 가상 량의 1 % 이하
원자로 내부 구조물	냉각 가능한 기하학적 형태 계속 유지
장기간에 걸친 노심 냉각을 위한 용량	계속 유지

5. 비상 노심 냉각 계통 구성

비상 노심 냉각 계통은 고압 안전 주입 계통(붕소 주입 탱크(BIT)를 포함한 충전수 계통 일부), 저압 안전 주입 계통(잔열 제거 계통), 안전 주입 탱크(Accumulator), 연료 재장전수 저장 탱크(RWST)으로 4개의 부속 계통으로 구성된다.

6. 비상 노심 냉각 계통 운전

비상 노심 냉각 계통에는 3가지 운전 형태가 있다. 즉, 안전 주입 운전 형태, 저온 관 재순환 운전 형태 및 고온 관 재순환 운전 형태가 그것이다.

안전 주입 운전 형태에서 냉각수는 연료 재장전수 저장 탱크(RWST)에서 취하여 붕소 주입 탱크(BIT)의 붕산수와 함께 원자로 냉각재 계통 저온 관에 주입된다. 즉, 원자로를 미 임계로 유지하고 노심 냉각을 위해서 많은 붕산수가 원자로 냉각재 계통에 주입된다. 연료 재장전수 저장 탱크(RWST)내에 충분한 냉각수가 없을 때는 격납건물 재순환 배수 조(Sump)의 물을 잔열 제거 펌프가 흡입하여 충분한 냉각수를 제공하게 되는데, 이때부터 저온 관 재순환 운전 형태가 시작된다.

즉, 노심으로의 냉각수 공급은 잔열 제거 펌프에 의해서 이루어지는데, 잔열 제거 펌프의 흡입은 RWST로부터 격납건물 재순환 배수조로 전환하게 된다. 잔열 제거 펌프는 원자로 냉각재 계통과 다른 비상 노심 냉각 계통 즉, 고압 안전 주입 펌프 흡입구에 냉각수를 공급하며 이때 격납건물 배수조의 냉각수는 잔열 제거 열교환기를 통하여 1차기 냉각수에 의해서 열이 계속적으로 제거된 후 원자로 냉각재 계통 저온 관으로

들어가게 된다.

안전 주입 운전이 시작된 지 약 24시간 이후에 비상 노심 냉각 계통은 고온관 재순환 운전 형태로 전환된다. 이 운전 형태는 냉각재 상실 사고(LOCA)와 같은 경우에 노심의 상부에서 냉각재가 잠정적으로 비등 조건에 도달하기 때문이며, 이러한 비등 조건에서 노심 상부의 냉각 효과는 감소하고 붕소가 석출될 수 있다. 따라서 고온관 재순환 운전은 노심에 역방향의 냉각수를 제공함으로써 냉각수를 노심의 상부에 주입하여 상부 노심을 냉각하고, 석출된 붕소를 제거하여 핵연료봉의 손상을 방지한다. 안전 주입 신호 발생 시 비상 노심 냉각 계통은 자동적으로 원자로 저온관으로 안전 주입 운전이 이루어지도록 배관이 형성되어 있다.

제 2 절 붕소주입계통

1. 구성

붕소 주입 계통은 주로 붕소 주입 탱크(Boron Injection Tank) 1 대, 붕소 주입 완충 탱크(Boron Injection Storage Tank) 1 대, 붕소 주입 재순환 펌프(Boron Injection Recirculation Pump) 2 대, 전열기(Heater), 전열선(Heat Tracing) 및 부속 계기, 밸브, 배관 등으로 구분된다.

2. 붕소주입계통 기능

붕소 주입 계통은 안전 주입 계통을 통해서 원자로 냉각재 계통 내로 순간적 부(-)반응도를 인가하는 첫 번째 방법이다.

3. 붕소주입계통 설계

가. 붕소주입탱크 및 전열기

붕소 주입 계통을 통한 주 유로는 두 개의 독립된 배관을 통한 각 충전 펌프의 출구로부터 형성된다. 각 유로에는 중앙 제어실에서 지시하는 유량계를 갖고 있으며 붕소 주입 탱크(BIT) 입구 유로에는 3개의 밸브(BH-HV22, BH-HV23, BH-HV937B)가 병렬로 설치되어 있다. 이들 3개의 밸브는 정상 운전시 닫혀 있다가 안전 주입 신호에 의하여 열리게 되며, 이중 2개는 전동기 구동 밸브(MOV)로서 구동력 상실시 현 위치를 유지한다. 그리고 1개의 밸브는 솔레노이드 밸브로서 구동력 상실시 닫힘 위치로

전환된다. 이들 3개의 밸브는 모두 주 제어실에서 조작할 수 있다.

고압 안전 주입 펌프 출구 배관 중 안전 주입 유로는 붕소 주입 탱크(BIT)의 입구에 연결된다. 붕소 주입 탱크는 3.4 m³(900 gal)의 용량을 갖는 스텐레스강 탱크로서 붕산 농도가 약 12 w/o인 붕산수를 가지고 있다. 이 탱크에는 붕산수가 응고점 이상의 액체 상태를 유지하기 위하여 전열기(Heater)가 설치되어 있는데, 이 전열기는 붕소 주입 탱크 바닥에 설치된 온도 감지기에 의해서 제어된다. 전열기는 2 계열로 구성되며, 용량은 6 kW이다. 즉, 전열기는 약 74 °C (165 °F)에서 켜지며, 80 °C (175 °F)에서 꺼진다. 이 온도 감지기는 또한 중앙 제어실에 경보를 제공하며, 85 °C (185°F)에서 고온 경보를, 68 °C (155°F)에서 저온도 경보를 각각 발생한다. 붕소 주입 탱크 밑부분에는 유입되는 냉각수의 방향을 유도하고, 충전 펌프나 붕소 재순환 펌프로부터 공급되는 냉각수가 붕소 주입 탱크 내부의 액체와 잘 섞이도록 360° 팬 모양의 조절판이 있다.

붕소 주입 탱크는 192 kg/cm² (2,735 psig)의 압력에 견딜 수 있도록 설계 되어 있으며, 출구 측에 설치된 방출 밸브에 의해서 고압으로부터 보호되도록 되어 있다. 이 방출 밸브의 열림 설정치는 192 kg/cm² (2,735 psig)이고, 유량은 4.6 m³/h (20 gpm)이다.

붕소 주입 탱크 출구 측에 있는 압력 계측기에 의해서 중앙 제어실에 압력이 지시되며, 168.7 kg/cm² (2,400 psig)에서 고압 경보를 발생한다. 주 유로의 붕소 주입 탱크 출구 측에 2개의 병렬 격리 밸브(BH-HV24, BH-HV25)가 있다. 이들은 모두 전동기 구동 밸브로서 중앙 제어실에서 조작한다. 그리고, 이들 밸브는 안전 주입 신호에 의해서 자동으로 열리며, 구동력 즉, 전원 상실시 현 위치를 유지한다. 이러한 주 유로는 격납 건물 내부로 들어가서 병렬로 3개의 유로로 나누어지고 각각 역류 방지 밸브(Check Valve)를 통하여 원자로 냉각재 계통의 저온 관에 주입하게 된다. 각 유로에는 현장에서 읽을 수 있는 유량 계측기가 있으며 유량 시험 시 사용된다. 즉, BH-FI-971, BH-FI-972, BH-FI-973 및 BH-FI-975, BH-FI-976, BH-FI-977이다. 병렬로 된 3개의 유로를 통하여 동일한 유량을 공급하기 위해 조절 밸브(Throttle Valve)가 사용되고 있다. 이들 현장 유량 계측기는 각 유량을 비교하여 조절 밸브(Throttle Valve)의 디스크 위치를 고정하기 위함인데 이는 펌프의 과부하에 의한 정지를 방지하기 위함이다. 원자로 냉각재 계통의 각 저온 관에 연결되기 전에 역류 방지 밸브가 설치되어 있다.

나. 주입재순환(Boron Injection Recirculation) 및 전열선(Heat Tracing)계통

붕소 주입 탱크에는 전열기 외에도, 붕소 주입 재순환 계통과 전열선이 설치되어 있다. 이들 계통은 붕산수가 수용액 상태로 유지될 수 있도록 해준다. 이 붕소 주입 재순

환 계통은 한 대의 붕소 주입 완충 탱크(BIST)와 두 대의 붕소 주입 재순환 펌프(BIRP), 붕소 주입 탱크 혼합기, 수증 전열기 및 관련된 배관과 제어 계통으로 구성된다.

붕소 주입 완충 탱크는 용량 0.28 m³(75 gal)인 스테인레스강 탱크로 되어 있으며, 이 탱크는 붕소 주입 계통에 대한 완충 기능을 수행한다. 붕소 주입 완충 탱크에는 수증 전열기가 설치되어 있으며, 이 탱크의 온도는 탱크 내에 위치한 온도 계측기(BH-TIS-966)에 의해서 제어된다. 이 수증 전열기는 74 °C(165 °F)에서 꺼진다. 그리고 이 온도 지시기(BH-TI-966)에 의해서 중앙 제어실에 온도가 지시되며, 85 °C(185 °F)에서 고온 경보, 68 °C(155 °F)에서 저온 경보를 발생한다. 또 수위 지시계(BH-LIS-964)가 설치되어 80 %에서 고수위 경보를, 40 %에서 저수위 경보를 발생한다. 이 탱크에는 저 용량의 전동기가 달린 교반기가 설치되어 있다. 이 교반기는 보통 보충 액을 혼합시킬 때 사용되며 수동으로 운전한다.

다. 운전

정상 운전 중에는 2대의 붕소 주입 재순환 펌프 중 1대 만이 붕소 주입 완충 탱크(BIST)에서 흡입하여 붕소 주입 탱크(BIT) 입구 측으로 붕산수를 보낸다. 그리고, 이 붕산 수용액은 붕소 주입 완충 탱크로 되돌아오게 된다. 붕소 주입 재순환 펌프는 2마력의 용량으로서 출구 압이 3 kg/cm²(43 psig)에서 각각 4.5 m³/hr(20 gpm)의 유량을 형성한다. 이들은 중앙 제어실에서 원격 조작된다. 정상적으로 한 펌프는 운전 중이며, 다른 한 펌프는 대기 중이다. 운전 중인 펌프는 안전 주입 신호에 의해 정지된다. 붕소 주입 완충 탱크로 회수되는 배관 상에 설치된 유량계(BH-FIS-934)는 90 % 유량 이하에서 경보를 발생한다. 이 경보는 붕소 주입 탱크(BIT) 재순환 유량 상실에 대한 경보이다. 붕소 주입 재순환 유로 상의 대부분 밸브는 수동 밸브이나, 재순환 펌프 출구 공통 격리 밸브(BH-HV28) 및 붕소 주입 탱크 출구 격리 밸브(BH-HV29, BH-HV30) 등은 공기 구동 밸브(AOV)로서 안전 주입 신호에 의해 자동으로 닫히게 되며, 구동력 상실시 닫힘 위치로 되돌아간다. 이들 밸브는 중앙 제어실에서 원격 조작된다.

전열선(Heat Tracing)은 배관 주위에 감겨 있는 일종의 전열기이다. 12 w/o의 붕산수를 함유하는 모든 배관은 2계열의 전열선으로 감겨 있다. 2계열의 전열선은 상호 독립적인 안전 관련 전원 공급 모선을 통해서 공급된다. 이는 정전 사고 시에도 전원을 확보하기 위함이다. 전열선의 기능은 배관 내의 붕산수 용액을 항상 따뜻하게 유지하도록 하며 배관의 어느 부분에서 재순환 유량이 붕소의 응고로 인하여 정체되는 것을 방지한다.

(1) 고압 안전 주입 펌프를 통한 주요 유로 형성은 다음과 같다.

저온 관(Cold Leg) 고압 안전 주입 시는 연료 재장전수 저장 탱크(RWST)로부터 취수하여 고압 안전 주입 충전 펌프에 의하여 붕소 주입 탱크(BIT)를 거친 후 원자로 냉각재 계통 저온 관으로 유량을 형성한다.

저온 관(Cold Leg) 고압 재순환 운전 시는 격납건물 재순환 배수 조(Sump)로부터 잔열 제거 펌프 및 열교환기를 통하여 취수된 붕산수가 고압 안전 주입 충전 펌프에 의하여 붕소 주입 탱크를 거쳐 원자로 냉각재 계통 저온 관으로 유로를 형성한다. 그리고 고온 관(Hot Leg) 고압 재순환 운전 시는 저온 관 고압 재순환 운전 시와 같은 방법으로 취수하여 붕소 주입 탱크 입구 측에서 우회하여 곧 바로 밸브 BH-HV19 또는 BH-HV21을 통하여 원자로 냉각재 계통 고온 관으로 유로를 형성한다.

4. 운영기술지침서 사항

붕소주입탱크는 운전 가능한 상태이어야 한다. (운전모드 : 1, 2, 3)
 운전가능하다는 것은 체적, 붕소농도, 온도에 대해 점검요구사항에서 정해진 제한치를 만족해야 한다.

항 목		제한치
붕소주입탱크 붕산수	온도	62.8 °C(145 °F) 이상
	체적	3.41 m ³ (900gal) 이상
	붕소농도	20,000 ppm 이상, 22,500 ppm 이하

붕소주입탱크(BIT)는 안전주입(SI)신호에 따라 부 반응도를 원자로냉각재계통(RCS)에 신속히 제공하는 주된 수단인 붕소주입계통의 일부분이다.

붕소주입계통을 통한 주유로는 원심충전펌프의 출구배관부터 유량측정기와 안전주입 신호에 의해 열리는 병렬로 연결된 2개의 밸브가 설치된 배관을 거친다. 이 밸브들은 주제어실에서 조작할 수 있다. 밸브와 유량측정기는 주제어실에 지시계가 있다. 이 밸브를 통한 유량은 BIT로 들어간다.

BIT는 농축된 붕산을 담고 있는 스텐인레스강으로 된 탱크이다. 2계열의 스트립히터들은 붕산수온도를 석출점 이상으로 유지하기 위해서 탱크에 부착되어 있다. 이 스트립히터들은 BIT의 바닥부근에 위치한 온도측정기에 의해 조절된다. 이 온도측정기들은 또한 주제어실에 고온 및 저온 경보를 발생시킨다. BIT 스트립히터에 추가하여 전동기구동 차단밸브 사이에 전열보온계통이 설치된 배관을 포함한 재순환계통이 있으

며, 봉산이 용액상태로 유지되도록 하는 것을 보장한다. 또한 주제어실에 BIT 고압경보가 설치되어 있다. 주입 요구시 BIT내의 전체 봉산수가 주입 된다; 즉, 보유 체적과 주입가능 체적은 같다.

정상운전 중, BIT 재순환펌프 2대중 1대는 봉소주입 완충탱크(BIST)에서 흡입을 취해서 BIT로 보내지며, 이 용액은 BIST로 되돌아온다. 정상적으로 1대의 펌프만 운전되고 나머지 1대는 정지되어 있다. SI 신호가 발생하면 운전 중인 펌프는 정지되고 공기구동 밸브는 닫힌다. BIT로 가는 유량은 원심충전펌프로부터 공급된다. BIT의 봉산수는 RCS 저온관을 통해서 RCS로 주입된다.

제 3 장 봉소주입탱크(BIT)의 제거에 대한 분석

제 1 절 BIT 제거에 따른 경제적, 기술적 효과

1. 경제적 효과

봉소주입탱크 및 관련설비(재순환펌프, Heat Tracing)제거에 따른 계통의 단순화로 고장을 및 이용률 향상과 봉소주입탱크 및 관련설비 제거에 따른 유지 및 정비 비용이 감소된다.

항목	절감액
SI(안전주입) 발생 시 발전소 기동 공정 단축(봉소배칭 시간 감소)에 따른 판매전력 증가량	19,462,080,000 원
봉소 구입 비용 감소	580,000,000 원
봉소재순환펌프 정비 감소 비용	146,200,000 원
봉소주입탱크 및 주변기기 소내 전력 감소 비용	272,485,844 원
총 절감액	20,384,429,364 원

☞ $48 \text{ h(봉소 배칭시간)} \times 9 \text{ 회(영광 1,2호기 잔여 수명 기간동안 SI 발생횟수)} \times 950,000 \text{ kwh} \times 38.8\text{원}^3/\text{kwh}$

☞ 영광 1, 2호기 SI 발생 횟수 : 영광 1호기 23년 동안 7회 발생, 영광 2호기 22년 동안 6회 발생

3) 전력단가는 2012년 10월 8일 기준

- ☞ 잔여 수명 기간⁴⁾ 동안 영광 1,2호기 SI 발생 예상 횟수 : 9 회 영광 1,2 호기 잔여 수명 : 영광 1호기 14년, 영광 2호기 15년
- ☞ 붕소 구입 : 호기당 1000 만원 × 2개 호기 × 29 년(영광 1,2호기 잔여 수명)
- ☞ 붕소재순환펌프 정비 : 43 Man-day × 170,000 원/Man-day(펌프 정비 비용) × 10 회 (호기별 계획예방정비 횟수) × 2개 호기
- ☞ 붕소주입탱크 및 주변기기 소내 전력 감소 : 19.9 kwh(펌프 1.9 KW, 붕소주입탱크 전열기 12 kw, 붕소주입 Surge 탱크 전열기 6 kw) × 38.8원/kwh X 24 h × 365 일 × 29 년

2. 기술적 효과

운영기술지침서 비 적용에 따른 검사요건 완화를 통한 운전 편의성 향상이 예상된다.

3. BIT 제거방법에 따른 장단점 비교

가. 붕산농도 저감 운전방법(BIT 설비 유지)

(1) 장점

BIT 붕산농도를 약 2,600 ppm으로 저감 유지시 예비 안전해석(핵주 수행) 결과 2차측 주증기 안전 또는 압력방출 밸브 열림 사고시 원자로가 미임계 상태를 유지하는 것으로 분석되었다.

또한, 기존의 BIT를 그대로 사용하므로 설계 변경 및 시공이 불필요하고, 향후 규제 환경 변화에도 BIT 재활용 가능하다는 장점이 있다. 그리고, 보조계통 제거 및 단순화가 가능하다.

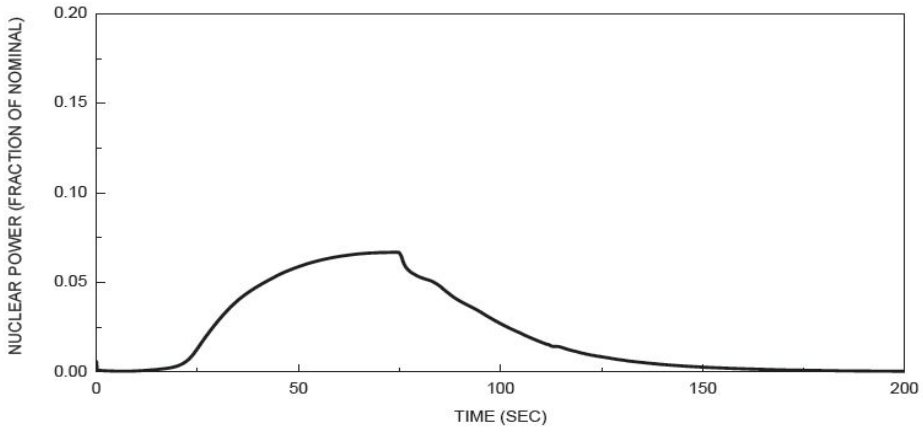
(2) 단점

RWST 및 Accumulator 붕산농도 상향 변경(2,450 ~ 2,600 ppm → 2,550 ~ 2,650) 필요하며 SI 오작동시 고농도 붕산주입으로 재기동(BIT 재충수) 시간 소요된다는 점과 BIT 및 보조계통 정비 비용이 추가로 발생한다는 단점이 있다.

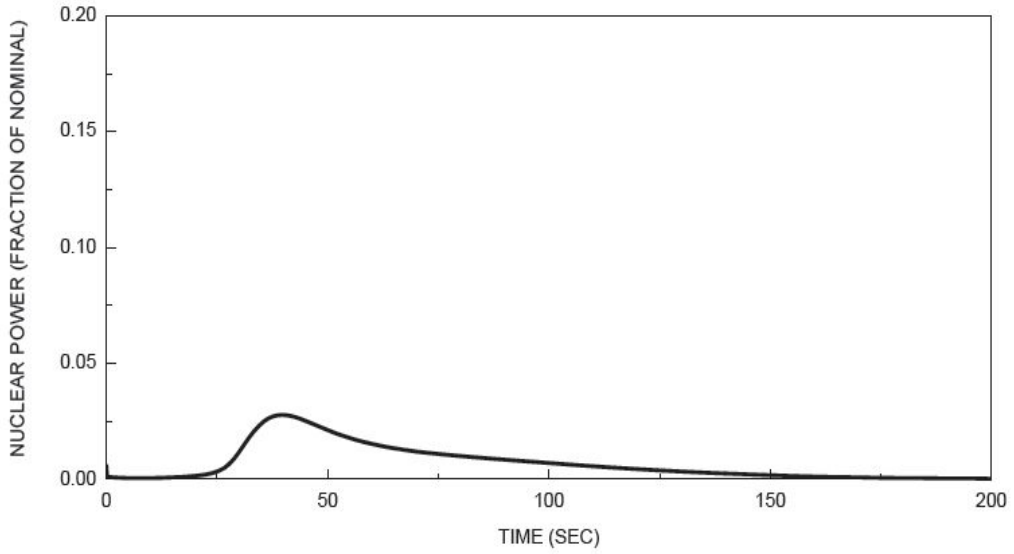
또한, 인허가 심사시 운영기술지침서 일부 내용 유지로 운전편의성이 감소된다는 경우가 생긴다.

그림 3.1.3-1 BIT 제거 전 주증기관 파단사고시 원자로 출력변화

4) 호기별 잔여수명 (영광 1호기 : 14년, 영광 2호기 : 15년) 근거 : FSAR 표 1.3-1(NSSS Vendor Supplied Components Comparison With Similar Facility Designs)

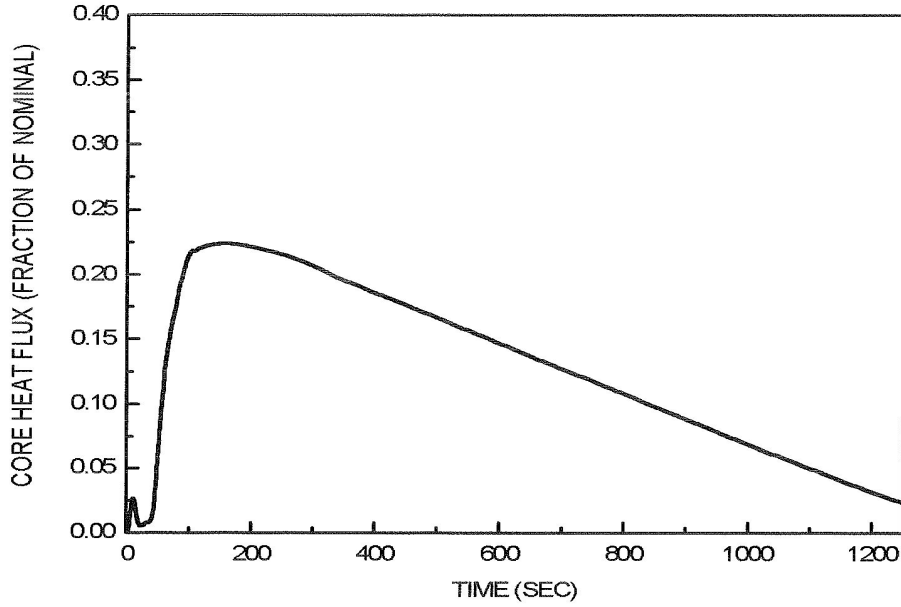


주증기관 파단사고(With Offsite Power)

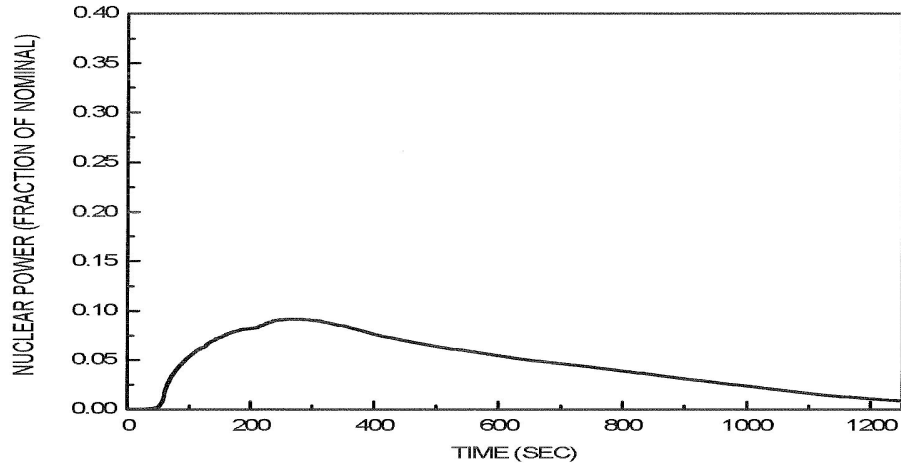


주증기관 파단사고(Without Offsite Power)

그림 3.1.3-2 BIT 제거 후 주증기관 파단사고시 원자로 출력변화



주증기관 파단사고(With Offsite Power)



주증기관 파단사고(Without Offsite Power)

나. BIT 및 관련기기 완전철거

(1) 장점

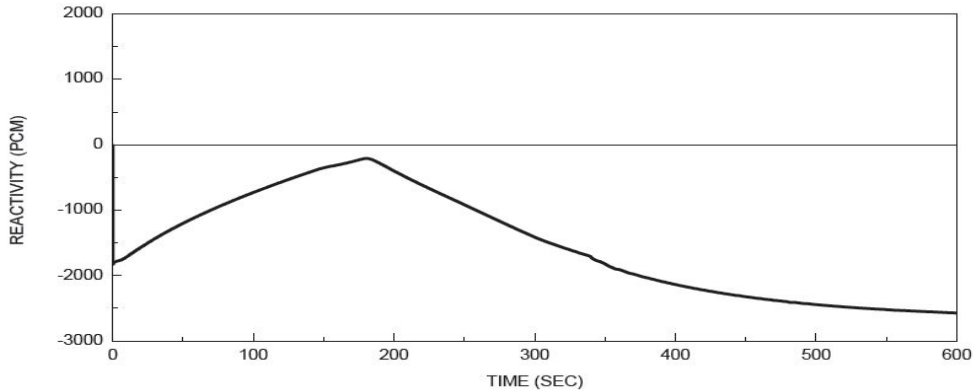
BIT 및 보조계통 제거로 고장율 감소 및 발전소 이용률 향상과 운영기술지침서 비적용에 따른 검사요건 완화 및 운전편의성 향상이 된다는 잇점이 있다.

(2) 단점

BIT 제거에 관한 안전해석의 결과가 경수로 안전심사 지침을 만족하지만 2차측 부주의한 밸브개방사건의 경우 원자로가 임계에 도달하는 부분은 현재 규제기관의 주요한 관심사항이며 향후 규제환경 변화시 논란의 소지가 될 가능성 있다.

또한, 설계변경에 따른 설계 및 시공 필요하고 BIT 설비 폐기 비용이 추가로 발생한다는 점을 들 수 있다.

그림 3.1.3-3 BIT 제거 전 2차측 부주의한 밸브개방 사고시 원자로 출력변화



제 2 절 장기노심냉각 평가

일반적인 장기노심냉각 분석은 노심의 미임계 확인, 노심 내 붕소석출 방지, 최소 안전주입 유량 확인다음의 3가지 평가항목으로 구성된다.

1. 노심의 미임계 확인

LOCA 후 저온관 재순환 운전이 진입한 뒤 냉각재는 격납건물 집수조로부터 원자로냉각재계통으로 주입된다. 따라서 LOCA 후 격납건물 집수조의 혼합 평균 붕소농도를 계산하여, 그 값이 특정 교체노심의 미임계를 보장할 수 있는 붕소농도보다 크다는 것을 확인하면, LOCA 후 노심의 미임계를 보장할 수 있다.

LOCA 후 격납건물 집수조의 혼합 평균 붕소농도는 집수조에 모일 수 있는 물의 양과 붕소농도로부터 계산할 수 있다. 이 계산은 다음과 같은 가정을 바탕으로 수행된다.

가. LOCA 전 조건은 기술지침서에 기술되어 있는 운전모드 1 조건이다.

나. 집수조 내 붕소는 균일하게 혼합되기 때문에 그 평균 농도를 노심의 임계 여부 판단에 사용할 수 있다.

다. 원자로냉각재계통, 축압기(Accumulator), 재장전수저장탱크, 살수첨가탱크와 그에 연결된 배관으로부터 나온 물은 다른 곳에 머물지 않고 모두 집수조로 모인다.

라. 재장전수저장탱크 저-저 수위 및 고갈 신호가 발생하면 안전주입계통의 재순환 운전이 즉시 시작되며 격납건물 살수계통은 운전을 멈춘다.

이 계산에서는 원자로냉각재계통, 안전주입계통/잔열제거계통 배관, RWST, 축압기(Accumulator) 및 그 배관, BIT 및 그 배관, 살수첨가탱크, 격납건물 집수조 흡입 배관 등에 담겨 있는 물이 집수조로 모이는 것으로 고려하는데, 각 계통들의 붕소농도로는 보수적인 최소값을 가정하고, 물의 양으로는 해당 계통들의 붕소농도가 최종적으로 계산된 혼합 평균 붕소농도보다 낮은 경우는 최대값을, 반대인 경우는 최소값을 가정한다.

BIT는 매우 높은 붕소농도를 가지기 때문에, BIT를 제거하면 격납건물 집수조의 혼합 평균 붕소농도는 감소한다. 기준 노심을 대상으로 평가한 바에 따르면 BIT 제거는 LOCA 후 격납건물 집수조의 혼합 평균 농도를 고리 2호기의 경우 약 60 ppm, 고리 3,4 및 영광 1,2호기의 경우 약 35 ppm 가량 감소시킬 수 있는 것으로 밝혀졌다.

이러한 격납건물 집수조의 혼합 평균 농도 감소는, 앞 절에서 이미 설명하였듯이, 고리 2호기의 노심 미임계 보장 여부에는 별 영향을 미치지 못한다. 그러나 고리 3,4 및 영광 1,2호기의 경우에는 향후 예상되는 보수적 장전모형이 적용될 경우, 격납건물 집수조의 혼합 평균 농도가 갖는 여유도가 크게 감소할 수 있음이 밝혀졌다.

때문에 고리 3,4 및 영광 1,2호기의 RWST와 축압기(Accumulator)의 최소 붕소농도를 현재의 2,450 ppm에서 2,550 ppm으로 변경시키기로 하였고, 그럴 경우에는 BIT의 제거에도 불구하고, 장기노심냉각 시 노심 미임계가 비교적 충분한 여유도를 가지고 만족됨을 확인하였다.

2. 노심 내 붕소 석출 방지

붕소 석출은 적절한 시점에 재순환 안전주입을 저온관 주입으로부터 고온관 주입으로 전환하거나, 고온관 주입으로부터 저온관 주입으로 전환하고, 노심 수위 유지와 붕소 석출 방지에 필요한 최소 재순환 유량을 확보함으로써 억제할 수 있다. 이를 위해서는 고온관 전환 시점과 고온관/저온관 주입의 전환 주기를 결정하여야 한다.

고온관 전환 시점 및 고온관/저온관 주입의 전환 주기 계산에는 축압기(Accumulator), 붕소주입탱크, 원자로냉각재계통, 재장전수저장탱크의 최대 붕소

농도/축압기(Accumulator), 붕소주입탱크, 원자로냉각재계통, 재장전수저장탱크의 유체 질량/원자로용기 내 유효 혼합 체적/노심 출력/하부플래넘 과냉각도/상부플래넘 주입 유량 입력이 사용된다.

BIT 제거 전 고리 2호기, 고리 3,4호기, 영광 1,2호기의 고온관 전환 시점은 각각 6.5 시간, 7 시간, 7 시간이고, 고온관/저온 주입의 전환 주기는 각각 13 시간, 10 시간, 10.5 시간이다. 고리 3,4호기와 영광 1,2호기의 고온관/저온관 주입 전환 주기가 서로 다른 것은 출력증강 적용 여부에 따라 정격 노심 출력이 상이하기 때문이다.

그런데, BIT 제거는 LOCA 후 장기 재순환 운전 시 노심으로 유입되는 안전주입수의 붕소농도를 감소시킨다. 따라서 고리 2호기와 같이 RWST나 축압기(Accumulator)의 붕소농도가 변경되지 않을 경우, BIT를 고려한 기존의 고온관 전환 시점과 고온관/저온관 주입의 전환 주기는 BIT 제거 후에도 여전히 보수적이다.

그러나 앞에서 설명한 바와 같이, 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기의 경우에는 노심 미임계 보장을 위해서 RWST와 축압기(Accumulator)의 최소 붕소농도를 100 ppm 증가시킬 필요가 있다. 이 경우 해당 기기의 최대 붕소농도도 변경하지 않으면 운전 편의성이 크게 감소할 수 있다. 따라서 고리 3,4 및 영광 1,2호기의 RWST와 축압기(Accumulator)의 최대 붕소농도를 현재의 2,600 ppm에서 2,650 ppm으로 50 ppm 증가시키는 것이 바람직하며, 이 경우 노심 내 붕소 석출 시점은 BIT 제거 전에 비해 짧아질 가능성이 있다.

따라서 BIT 제거와 RWST 및 축압기(Accumulator)의 최대 붕소농도 증가를 모두 고려한, 고리 3,4 및 영광 1,2호기의 고온관 주입 전환 시점 및 저온관 주입-고온관 주입 반복 전환 주기를 새롭게 계산하였다.

고리 3,4호기에 대한 새로운 계산에서 도출된 저온관 주입 시 노심 붕소 석출 시점은 25,814 초로서, 현재 조건에서 계산된 시점보다 약 250 초정도 빨라지나, 현재의 고온관 주입 전환 시점인 7시간(25,200 초)을 여전히 상회한다. 또한, 고온관 주입 전환 후 다시 노심 붕소 석출이 발생하는 데 필요한 시간은 36,626 초로 계산되어, 현재 조건에서 계산된 시점보다 약 290 초정도 빨라지나, 현재의 저온관주입-고온관 주입 반복 전환 주기 10시간(36,000 초)은 여전히 만족한다.

영광 1,2호기에 대한 새로운 계산에서 도출된 저온관 주입 시 노심 붕소 석출 시점은 27,440 초로서, 현재 조건에서 계산된 시점보다 약 270 초정도 빨라지나, 현재의 고온관 주입 전환 시점인 7시간(25,200 초)을 여전히 상회한다. 또한, 고온관 주입 전환 후 다시 노심 붕소 석출이 발생하는 데 필요한 시간은 38,498 초로 계산되어, 현재 조건에서 계산된 시점보다 약 305 초정도 빨라지나, 현재의 저온관주입-고온관 주입 반복 전환 주기

10.5시간(36,000 초)은 여전히 만족한다.

한편, 비록 노심 내 붕소 석출과는 관계가 없으나, RWST와 축압기(Accumulator)의 최대 붕소농도 증가는 격납건물 집수조의 산도(pH) 평가 결과에도 영향을 미친다.

증가된 RWST와 축압기(Accumulator)의 최대 붕소농도를 가정한 격납건물 집수조 산도 평가 결과는 표 3.2.3에 제시되어 있다. 이 표에서 보듯이, 상향 조정된 최대 붕소농도를 가정한 격납건물 집수조 산도가 FSAR의 산도 요건(고리 3,4호기: 8.5 ~ 11.0, 영광 1,2호기: 8.5 ~ 9.5)을 충족시키기 위해서는 살수첨가탱크의 가성소다(NaOH) 최소 농도를 현재의 29 w/o에서 30 w/o으로 상향 조정하여야 한다.

3. 최소 안전주입 유량 확인

LOCA 후 노심 냉각은 저온관 또는 고온관으로의 재순환 안전주입 유량이 원자로용기 내 수위를 유지하고 노심 내 붕소 석출을 방지하는 데 충분한 경우에만 적절히 확보될 수 있다. 따라서 재순환 안전주입 유량을 계산하고, 그 값을 장기 노심 냉각에 필요한 최소 안전주입 유량과 비교, 평가하여야 한다.

BIT 제거와 그에 따른 안전주입 유로의 변경은 안전주입 유로의 국부 유로 저항을 변경시킬 수 있으나, 제거 후 수행한 유량 균형 시험에서 운영기술지침서 16.4.5.2절(고리 2호기) 또는 FSAR Appendix A, Table 11(고리 3,4호기 및 영광 1,2호기)에 기술된 유량 조건이 만족되는 것으로 가정할 때, 기존 사고 해석에 적용된 안전주입 유량은 여전히 유효하다. 이 경우, BIT 제거 전의 최소 안전주입 유량 확인 결과는 BIT 제거 후에도 여전히 타당하다.

표 3.2.3 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기 BIT 제거 시 SAT의 NaOH 농도 변경

	기존 FSAR		변경 안		비고
	최소 농도	최대 농도	최소 농도	최대 농도	
RWST 및 축압기(Accumulator)의 붕소농도(ppm)	2,450	2,600	2,550	2,650	
SAT의 NaOH 농도 (w/o)	29	32	30	33	

제 3 절 기준 노심 장전모형 평가

BIT 제거는 LOCA 후 노심으로 유입되는 재순환 안전주입수의 붕소 농도를 감소시키므로 BIT 제거 전의 LOCA 후 노심 미임계 평가 결과는 BIT 제거 후 더이상 유효하지 않다. 따라서 BIT 제거를 고려하여 생산된 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소 농도를 가정하여 노심 미임계 평가를 수행하였다.

1. 고리 2호기

앞에서 언급된 기준 장전모형이 본 분석에서도 동일하게 사용되었다. BIT 제거를 가정한, 고리 2호기의 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소농도는 BIT 제거 전의 붕소농도와 함께 그림 4.1-1에 제시되어 있다. 이 그림에 제시한 바와 같이 BIT의 제거는 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소농도를 약 60 ppm 감소시킨다.

제한적인 고리 2호기 평형노심에서 사고 전 원자로냉각재계통 붕소농도는 1,240 ppm이고, LOCA 후 노심 미임계 유지에 필요한 붕소농도는 약 2,040 ppm이다. 그림 3.3.2-1에서 보듯이, BIT 제거 후 노심에 공급 가능한 재순환 안전주입수의 최소 붕소농도는 약 2,153 ppm이다. 따라서 BIT 제거 후에도 노심 미임계는 충분한 여유도를 가지고 보장된다.

2. 고리 3,4 호기 및 영광 1,2호기

BIT 제거를 가정한, 고리 3, 4호기(출력증강 노심) 및 영광 1, 2호기(비출력증강 노심)의 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소농도는 BIT 제거 전의 붕소농도와 함께 그림 3.3-2에 제시되어 있다. 이 그림에 제시된 바와 같이 BIT의 제거는 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소농도를 약 35 ppm 감소시킨다. 표 3.3.2과 그림 3.3.2-2에서 보듯이 BIT를 제거하더라도 현재의 장전모형이나 향후 예상되는 보수적 장전모형에 대해서 노심 미임계는 유지될 수 있다. 그러나 이 경우 미임계에 필요한 붕소농도와 격납건물 집수조의 붕소농도가 보이는 차이는 최소 2 ppm 정도로 매우 작다. 따라서 RWST와 축압기(Accumulator)의 최소 붕소농도를 현재의 2,450 ppm에서 2,550 ppm으로 100 ppm 증가시키기로 하였고, 이 경우에는 비교적 충분한 여유도를 가지고 노심 미임계가 보장된다.

표 3.3.2 고리3,4호기 및 영광 1,2호기 BIT 제거 시 LOCA 후 미임계 여유도(ppm)

Case	RWST와 축압기(Accumulator)의 붕소농도		비 고
	2,450 ppm	2,550 ppm	
1	62	147	K4C19 장전모형, 현재 장전모형
2	2	87	K4C23 장전모형, 4.65 % 농축도
3	50	135	Y1C19 장전모형
4	17	103	Y1C18 장전모형
5	50	135	Y2C19 장전모형
6	20	105	Y2C18 장전모형

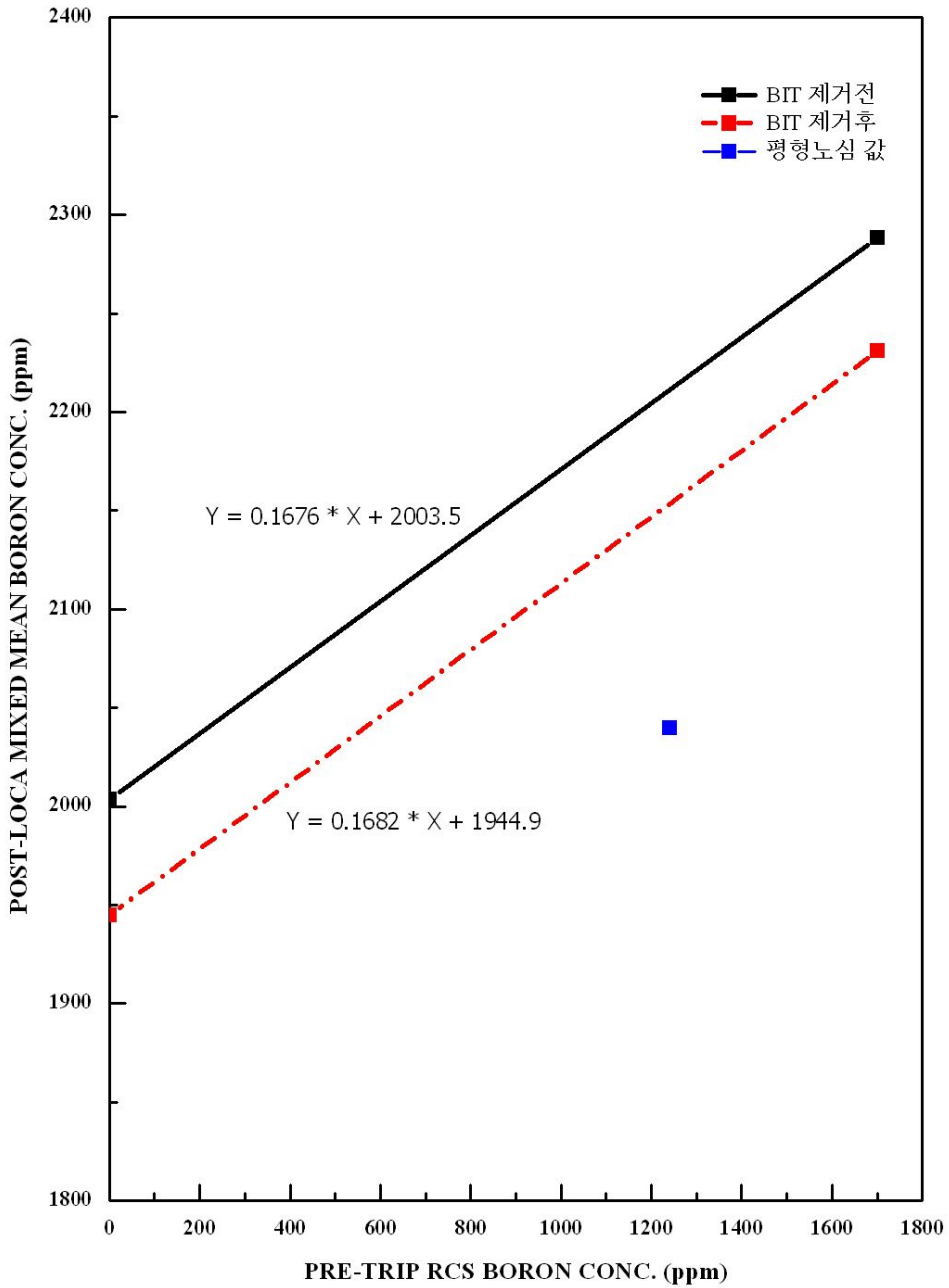


그림 3.3.2-1 BIT 제거 전/후의 고리 2호기 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소 농도

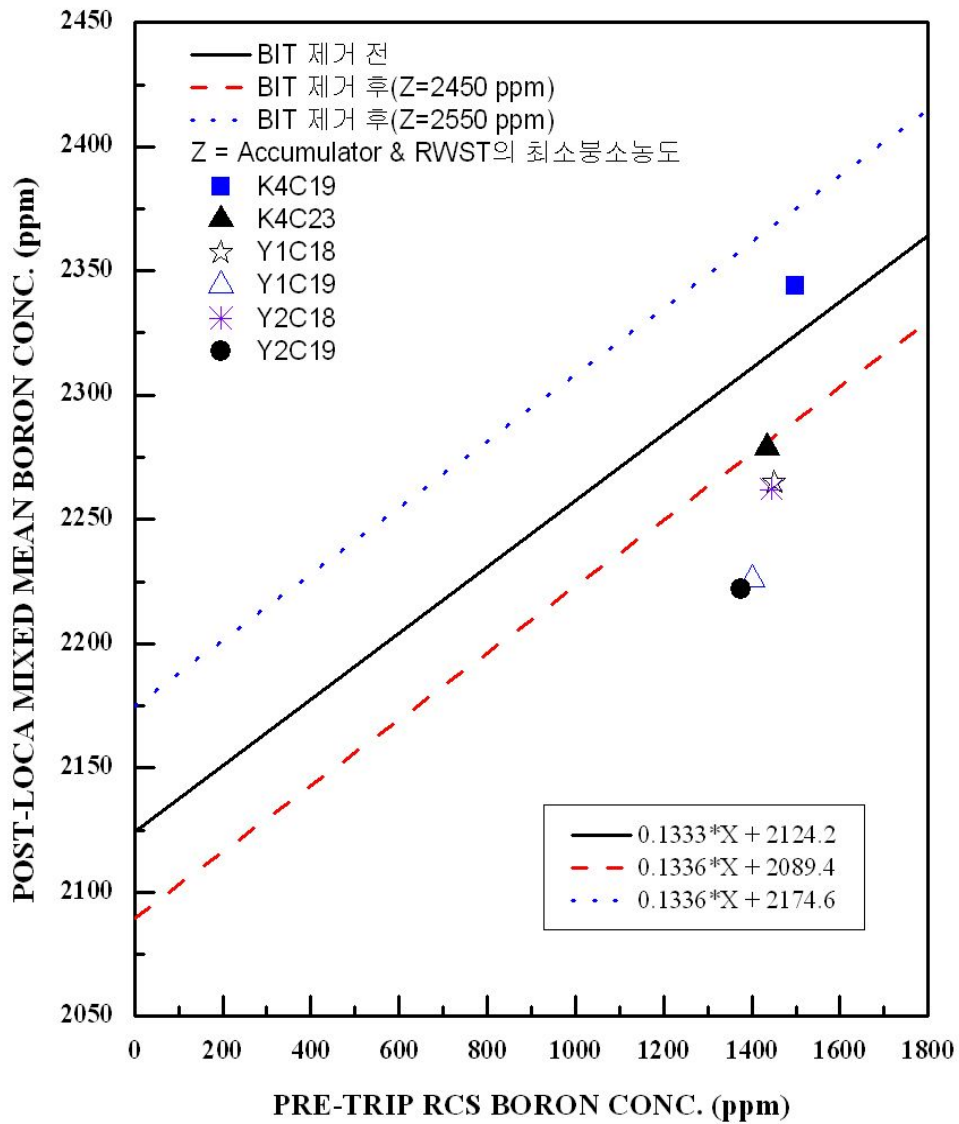


그림 3.3.2-2 BIT 제거 전/후의 고리 3,4 및 영광 1,2호기 LOCA 후 격납건물 집수조 붕소 농도

제 4 장 BIT 제거에 따른 개선 방안

고리 2호기의 BIT 제거에 대한 주증기관 파단사고시 노심건전성 및 격납건물건전성 분석 결과 고리 2호기의 BIT는 제거가 불가능하며 현 상태에서 농도저감은 가능하다. 고리 2호기 붕소저장탱크의 농도저감의 경우 설계개선을 필요로 하지는 않는다. 고리 2호기의 BIT 관련 계통도를 그림 4-1에서 보여주고 있다.

고리 3,4호기는 출력증강 조건, 영광 1,2호기는 비출력증강 조건에서 BIT 제거에 대한 주증기관 파단사고시 노심건전성 분석 결과 고리 3,4 및 영광 1,2호기 모두 BIT의 제거가 가능한 것으로 평가되었다. 고리 3,4 및 영광 1,2호기의 BIT 관련 계통도를 그림 4-2에서 보여주고 있다.

BIT 제거 방안은 관련계통 및 현장여건을 종합하여 결정할 수 있으며, 본 연구과제에서는 BIT를 우회하는 배관을 설치하는 방법을 제안한다. 우회배관은 BIT의 전단밸브인 HV15/HV22/HV937B/HV23 후단과 탱크의 후단밸브인 HV24/HV25 전단 혹은 후단으로 연결한다. BIT 전단의 HV15 밸브 및 후단의 HV24/HV25 밸브는 제거가 가능한 것으로 판단된다. 그림 4-3는 제안된 붕소저장탱크 우회배관 계통도이다. BIT를 우회함으로써 기존에 붕산수 석출 방지를 위해 필요했던 Heat Tracing, 완충탱크, 재순환 펌프 등 관련 계통 역시 더 이상 필요 없게 된다.

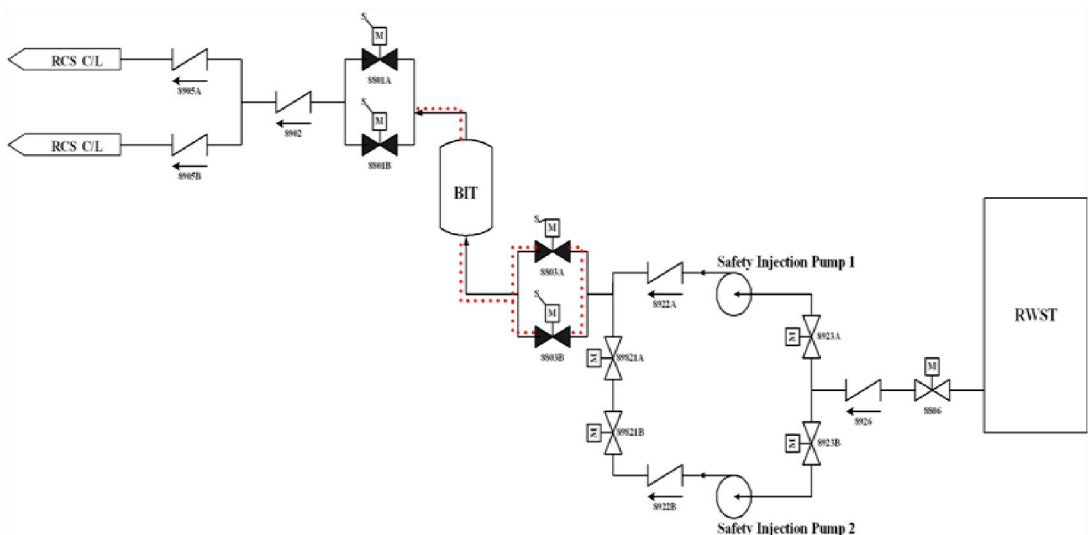


그림 4-1 고리 2호기 BIT 계통도

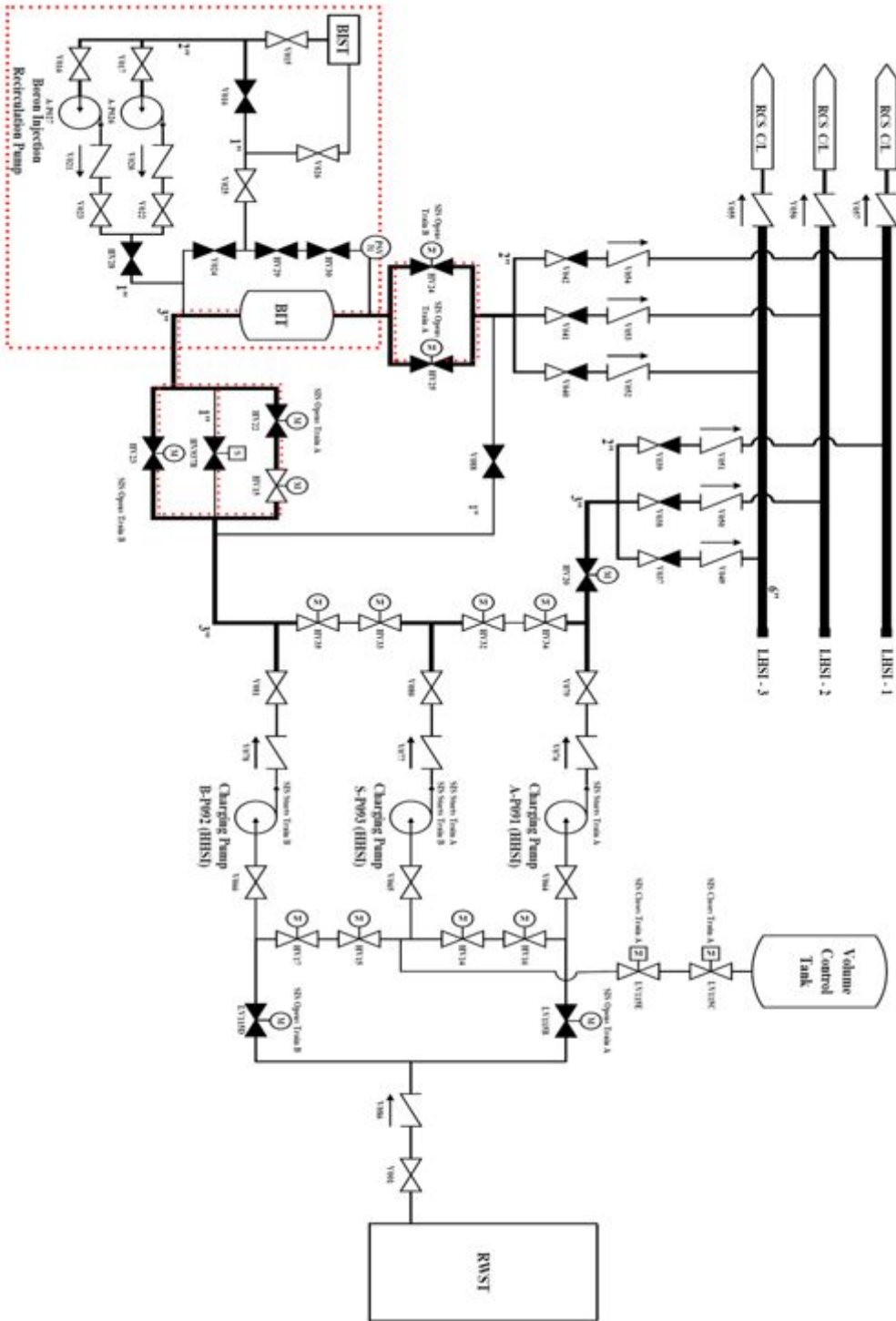


그림 4-2 고리 3,4 및 영광 1,2호기 BIT 계통도 (변경전)

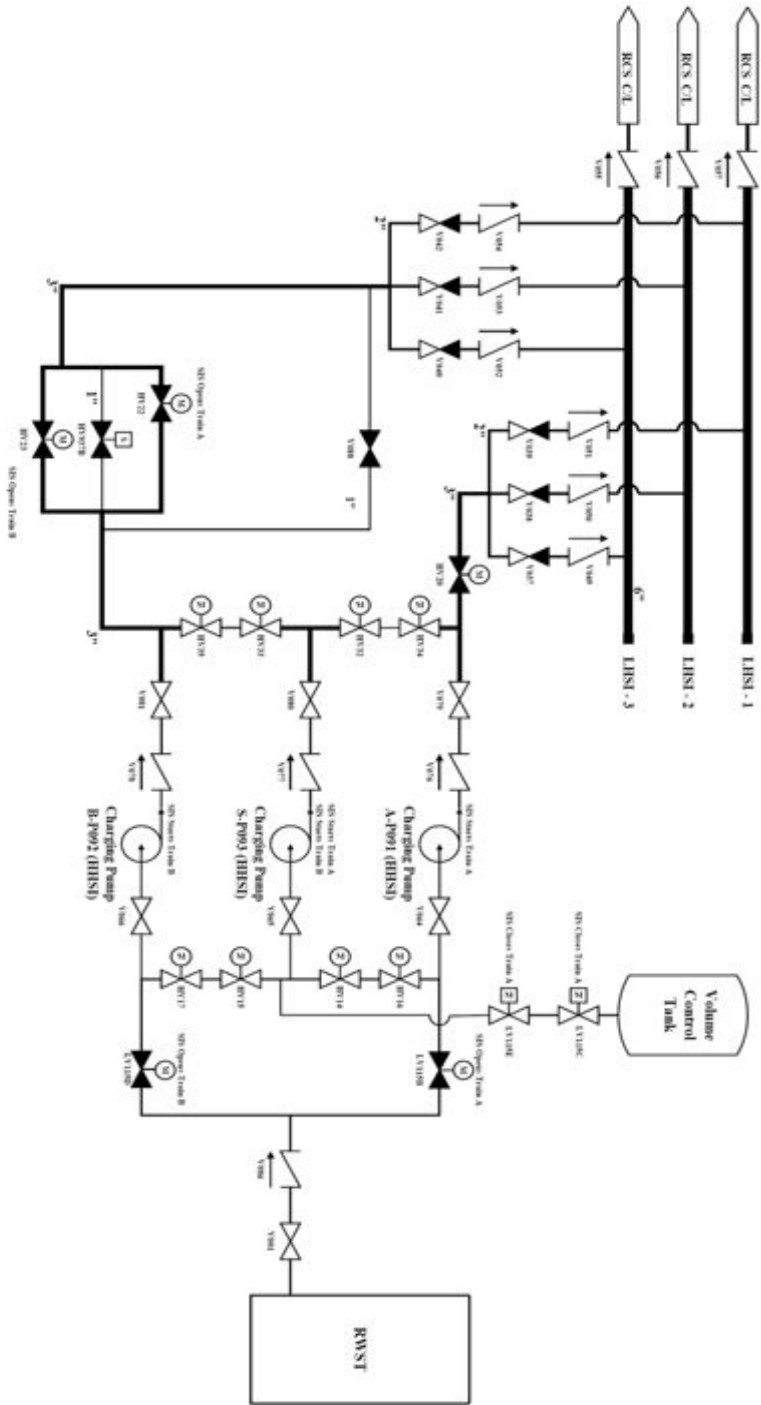


그림 4.3 고리 3,4 및 영광 1,2호기 BIT 계통도 (변경후)

제 6 장 결 론

본 연구를 통하여 알 수 있었던 내용은 BIT 제거 후에 LOCA 사고시 노심의 미임계를 확인한 결과, BIT는 고농도이기 때문에 BIT를 제거하면 격납건물 집수조의 혼합 평균 붕소 농도는 감소한다. 고리 2호기의 경우 천이노심 및 평형노심에 대하여 대략 100 ppm 정도의 여유를 가지고 만족함을 확인하였다.

고리 3, 4호기 및 영광 1, 2호기 경우는 현재의 장전모형이나 향후 예상되는 장전모형의 노심 미임계를 보장할 수는 있으나, 그 여유도가 크게 감소한다. 따라서 RWST와 Accumulator의 최소붕소농도를 기존 2,450 ppm에서 2,550 ppm으로 100 ppm 상향 조정이 필요하고 운전편의성을 위해 최대 붕소농도는 기존 2,600 ppm에서 2,650ppm으로 50 ppm 상향 조정이 요구된다.

고리 3, 4 및 영광 1, 2호기의 이러한 붕소농도 상향 조정에도 불구하고 기존의 고온관 주입 전환 시간과 저온관-고온관 주입 전환 주기가 여전히 유효함을 확인하였다. 다만, RWST와 Accumulator의 최대붕소농도 증가는 격납건물 집수조의 산도(pH)에도 영향을 미치며, 이와 관련된 요건은 살수첨가탱크의 가성소다(NaOH) 농도를 기존 29~32w/o에서 30~33w/o로 1w/o 상향 조정함으로써 충족시킬 수 있음을 알 수 있다.

붕소주입탱크 및 관련설비(재순환펌프, Heat Tracing)제거에 따른 계통의 단순화로 고장을 및 이용률 향상과 유지 및 정비 비용이 감소됨을 알 수 있다.

그러나, BIT 제거시 2차측 부주의한 밸브개방사건의 경우 원자로가 임계에 도달하는 부분은 향후 규제환경 변화시 논란의 소지가 될 가능성 있다.

또한, 설계변경에 따른 설계 및 시공 필요하고 BIT 설비 폐기 비용이 추가로 발생한다는 점을 들 수 있다.

향후, BIT 붕소농도를 약 2,600 ppm으로 저감 운전하는 방법과 BAT(붕산저장탱크)의 농도를 상향하여 활용하는 방법등의 심도있는 연구를 통한 BIT 최적의 운전에 관한 도출이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- [1] ‘2007 KOREA NUCLEAR UNITS 7&8 STATION MANUAL
- [2] ‘2009 영광원자력 제1발전소 발전실무편람
- [3] ‘2012 영광원자력본부 영광훈련센터 교재-계통 설명서
- [4] ‘2012 영광 1.2호기 운영기술지침서 및 운영기술지침서 기술배경서
- [5] ‘2012 영광 1.2호기 정상운전절차서
- [6] ‘2012 영광 1.2호기 비상운전절차서
- [7] “Final Safety Analysis Report for KORI Unit 2,” KHNP.
- [8] “Final Safety Analysis Report for Kori Units 3,4,” KHNP.
- [9] “Final Safety Analysis Report for Yonggwang Units 1,2,” KHNP.
- [10] “Safety Analysis Standard 12.2, Rev. 8, “Mass and Energy Releases to Containment Following a Steamline Rupture,” September 2000.
- [11] “Safety Analysis Standard 12.2, Rev. 6, “Mass and Energy Releases to Containment Following a Steamline Rupture,” September 1996.
- [12] A Study on Boron Injection Tank Removal for Kori 2, 3/4 and Yonggwang Units 1/2

감사의 글

바로 어제, 대학원 1학기를 시작했던 것 같은데 감사의 글을 쓰려고 하니 설레임과 아쉬움이 가슴에 가득히 차 오릅니다.

직장과 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지만은 않았지만 저에게 애정을 쏟아 주시는 많은 분들의 도움으로 인해 이렇게 무사히 졸업을 할 수 있었습니다. 이 좁은 지면을 통해 일일이 감사의 뜻을 전하지는 못하지만 그 분들의 도움이 아니었다면 힘들었을 것입니다. 모든 과정을 마치고 논문의 마지막을 감사의 글로 남기려고 하니 항상 도움만 받고 베풀지 못한 제 자신이 한없이 부끄러워집니다.

본 논문을 지도해 주시고 한량없는 열정과 자상함으로 끝까지 이끌어 주신 송종순 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀 올립니다.

논문 심사과정과 평소 학교생활을 통하여 변함없는 애정과 관심으로 격려해 주신 김진원 교수님, 나만균 교수님, 이경진 교수님 그리고 밤낮으로 학과 일에 온갖 정열을 바치시는 학과장 정운관 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

오늘의 결실이 있기까지 물심양면으로 아낌없는 지원을 해준 가족에게도 본 지면을 통해 감사의 마음을 전해 드립니다.

2012년 10 월

박 정 진

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20117084	과 정	석사
성 명	한글 : 박 정 진 한문 : 朴 鉦 軫 영문 : PARK JEONG JIN				
주 소	전남 영광군 홍농읍 상하리 한수원 사택 8-402호				
연락처	E-mail : id54321@khnp.co.kr				
논문제목	붕소주입탱크(BIT) 제거의 장기 노심 냉각에 미치는 영향에 관한 연구				
	A Study on the Influence of Boron Injection Tank Removal on (Post) LOCA Long-term core cooling for Yonggwang NPP #1, 2				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(O) 반대()

2012년 10 월

저작자: 박 정 진 (인)

조선대학교 총장 귀하