



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2016년 2월
석사학위 논문

표준형발전소 RPCS 동작 후 원자로
출력 및 ASI 최적제어 개선연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

유 문 철

표준형발전소 RPCS 동작 후 원자로 출력 및 ASI 최적제어 개선연구

A study of optimal control that Reactor power and ASI
when RPCS actuated

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

유 문 철

표준형발전소 RPCS 동작 후 원자로 출력 및 ASI 최적제어 개선연구

지도교수 : 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2016년 2월

조선대학교 대학원

원자력공학과

유 문 철

유문철 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정 운 관 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

2016년 2월

조선대학교 대학원

목 차

목 차	i
그림목차	ii
표 목 차	iv
ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 본 론	2
제 1절 원자로출력 급감발계통(RPCS)	2
제 2절 ASI 개요	11
제 3절 RPCS 동작이력	14
제 4절 문제점 검토	22
제 5절 해결방안	27
제 3 장 결 론	37
참고문헌	40

그림 목 차

그림 2-1.	4
그림 2-2.	5
그림 2-3.	6
그림 2-4.	7
그림 2-5.	7
그림 2-6.	8
그림 2-7.	8
그림 2-8.	9
그림 2-9.	9
그림 2-10.	11
그림 2-11.	14
그림 2-12.	15
그림 2-13.	17
그림 2-14.	18
그림 2-15.	19
그림 2-16.	20
그림 2-17.	21
그림 2-18.	22
그림 2-19.	23
그림 2-20.	32
그림 2-21.	33
그림 2-22.	34
그림 2-23.	35
그림 2-23.	36

그림 2-24.	37
그림 2-25.	38
그림 2-26.	40
그림 3-1.	43
그림 3-2.	44

표 목 차

표 2-1.	.....	14
표 2-2.	.....	23
표 2-3.	.....	24
표 2-4.	.....	25
표 2-5.	.....	25
표 2-6.	.....	26
표 2-7.	.....	34

ABSTRACT

A study optimal control that Reactor power and ASI when RPCS actuated

You, Moon Chul

Adviser : Prof. Song, Jong Sun, Ph. D.
Department of Nuclear Engineering,
Graduate School of Chosun University

Nuclear power station is responsible for base load in the electricity. Other Thermal Power Plant and will have different characteristics. Nuclear power plant due to these properties is always the subject of interest from the public. In order to address the concern and anxiety about the safety of these people it produced a stable power through transients in case of optimal control and Hannah go halgeotyida safe driving.

Nuclear power plants, it is important to balance the output primary side and the secondary side, unlike the thermal power plant.

These outputs are multiple strains and are responsible for the ability to maintain balance, Reactor Power Cutback System(RPCS) also one the important system for transients during plant operation stable. Loss or a large load during normal operation, the main feed water pump 1 2 If the public primary consideration will stop output is higher than the secondary output. By dropping the control rods thereby instantaneously gambal the primary side power to less than 75% by RPCS operates to solve the above power imbalance.

However, except for the initial core and the reactor operation Reactor Power Cutback System ASI output and do not have precise instructions for the control, there are difficulties. RPCS operation analyzing operational parameters in order to

solve this problem, and to take advantage of the reactor core simulation analysis program was performed.

Analysis by entering the control rod initial RPCS ACEONED program and during operation, to inject the acid was seen that effective in waste generation and control core. In addition, the ASI control was found to be controllable within the operating parameters prematurely by inserting a steel rod section with a quick control rod withdrawal.

It confirmed a plan that can handle control is difficult when RPCS operates through the ASI study the optimum, optimum reactor power control also could be confirmed.

제 1 장 서 론

원자력발전소는 전력생산에 있어 기저부하를 담당하고 있다. 여타 화력발전소와는 다른 특성을 가지고 있는 것이다. 이러한 특성으로 인해 원자력발전소는 늘 관심에 대상이 된다. 이러한 국민들에 관심과 안전에 대한 불안감을 해소하기 위해서는 과도상태 발생 시 최적제어를 통해 안정적으로 전력을 생산하고, 안전한 운전을 해나가야 할 것이다.

원자력발전소는 화력발전소와 달리 1차측과 2차측에 출력균형이 중요하다. 이러한 출력균형을 유지하기 위한 여러 계통들이 기능을 담당하고 있으며, 원자로출력 급감발 계통(Reactor Power Cutback System, RPCS) 역시 과도상태 시 발전소를 안정적으로 운전하기 위한 중요계통중에 하나이다. 정상운전 중 대형부하 탈락(터빈트립)이나, 주급수펌프 2대중 한대가 정지될 경우 1차측 출력은 2차측에 비해 높아지고, 이러한 출력불균형을 해소하기 위해 RPCS 가 동작하여 순간적으로 제어봉을 낙하시켜 1차측 출력을 75% 이하로 감소시킨다. 그러나 노심초기를 제외하고RPCS 동작시 원자로 출력 및 축방향출력편차(Axial Shape Index, ASI) 제어에 대한 정확한 지침이 없어 어려움이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 2005년 이후 발생한 RPCS 동작이력을 분석하고, RPCS 동작 시 운전변수를 PI를 통해 분석 후 최종적으로 ACEONED 프로그램을 통해 설계된 노심상태에 따른 노심 거동을 분석하고자 본 연구를 수행하게 되었다.

본연구에 최종 목표는 RPCS 동작 후 노심설계에 따른 출력 및 ASI를 분석함으로써 정상운전중 RPCS 동작시 최적 원자로출력 및 ASI를 제어하기 위한 조치사항들을 도출하는 것이다.

제 2 장 본 론

제 1 절. 원자로출력 급감발계통(RPCS)

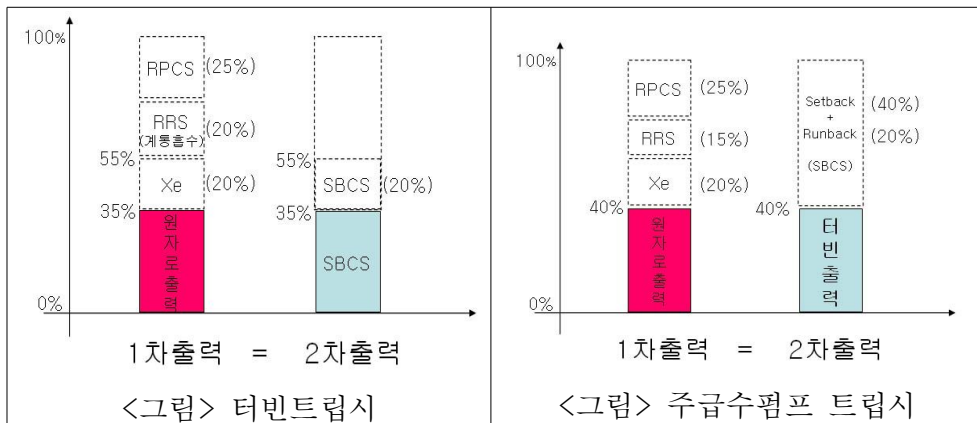
1. 기 능

RPCS는 다음과 같은 비정상시에 SBCS, RRS, PLCS 및 PPCS와 같이 사용되어,

1) 주급수펌프 트립시에 원자로와 터빈출력을 재빨리 감소시켜 증기발생기 저수위로 인한 원자로 트립을 방지시켜 주는 역할을 담당한다.

2) 출력운전 중 터빈트립 또는 큰 부하 감발시 원자로 출력을 재빨리 감소시켜 가압기 고압력에 의한 원자로 트립을 방지하고 1, 2차 안전밸브 개방을 방지시켜 줌.

* 아래 그림은 전출력상태에서 RPCS 동작사항을 일반적으로 표현한 것으로 RPCS에 의한 출력감발량, 지논효과 등은 상황에 따라 다를수 있다.



[그림 2-1] RPCS 동작별 1,2차측 출력분포

2. 설계요건

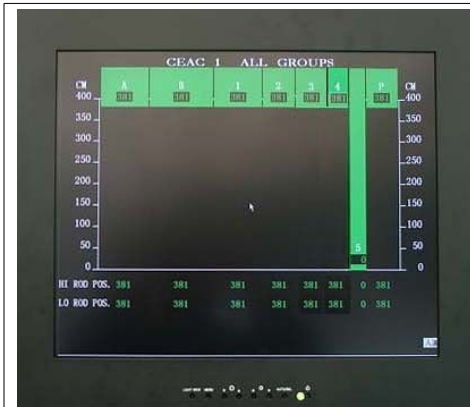
- 1) 제어봉 선택이 자동과 수동으로 가능하여야 한다.
- 2) 자동과 수동으로 원자로 출력 급감발계통이 작동되어야 한다.
- 3) 원자로 출력 급감발계통이 동작된 후 제어봉 제어가 자동과 수동으로 제어 가능하여야 한다.

- 4) 자동 원자로 출력 급감발 기동신호가 원자로 출력 급감발 제어판넬에서 계속 나타나고 수동 제어봉 낙하선택이 가능해야 한다.

3. RPCS 동작상황

1) 제어봉 낙하

- 원자로 출력을 75% 미만으로 감소시키기 위해 조절제어봉 자동선택되어 낙하된다.



<그림> 조절제어봉 5 낙하



<그림> 조절제어봉 4+5 낙하

[그림 2-2] 제어봉 낙하 Display

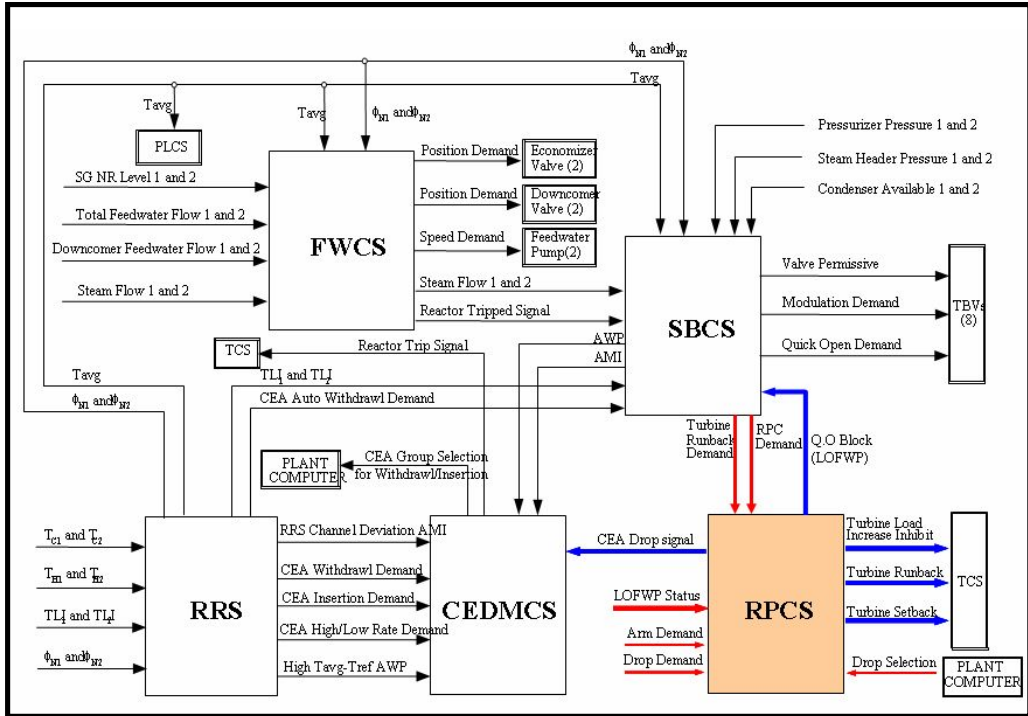
2) 터빈 출력 감발

- 원자로 출력 60% 이상에서 부하상실 또는 주급수펌프 트립 등의 경우 터빈 셋백(Setback) 및 런백(Runback) 발생되어 터빈 출력을 감발시킨다.
- 터빈 셋백(Setback) : 600%/min
- 런백(Runback) : 133%/min

4. RPCS 계통연계

RPCS는 다른 NSSS 제어계통과 연계되어 다음과 같은 상황이 발생되지 않도록 하며, 또한 발전소 트립이 발생하지 않도록 한다.

- 운전중인 2대의 주급수펌프중 1대가 트립되는 경우 증기발생기 저 수위 발생
- 대형 부하 탈락시 1, 2차측 안전밸브 개방

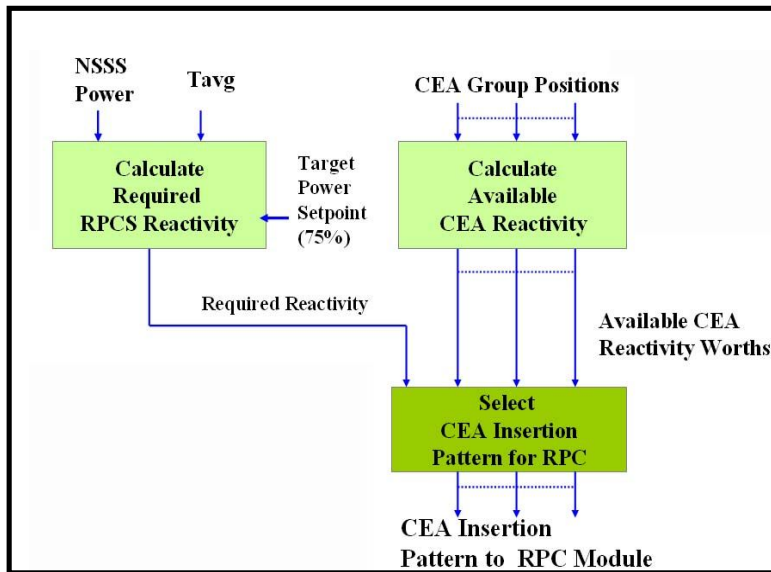


[그림 2-3] RPCS 계통 연계도

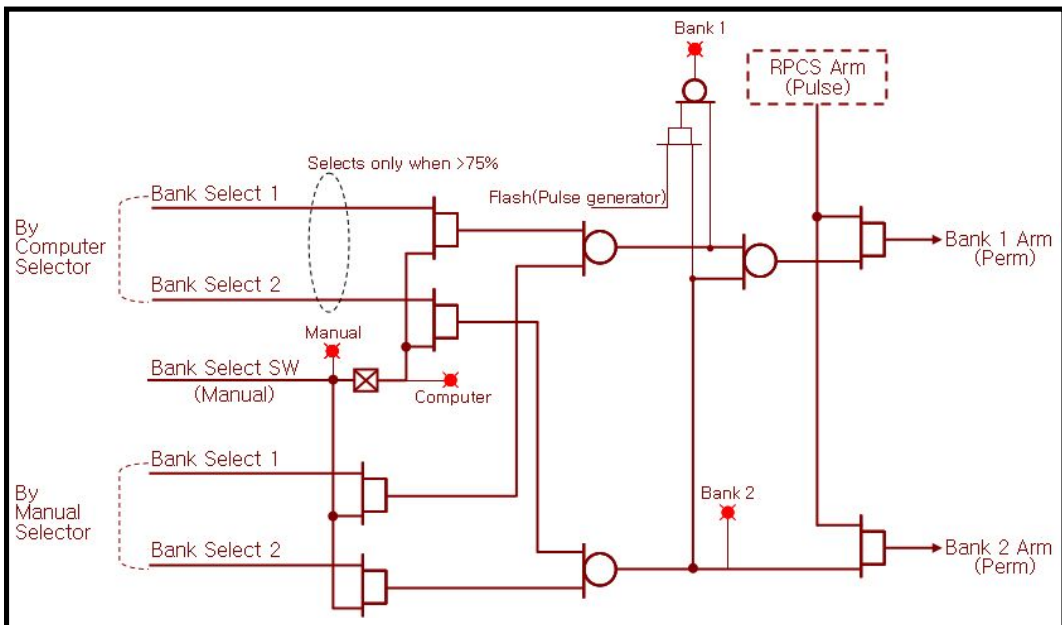
5. 제어봉 선택신호(Bank 1 or Bank 1&2 Select)

- 소내 감시 전산기(Plant Monitoring Computer)는 원자로 출력, T_{AVG} 및 연료 연소도를 감시하고 연료 온도계수(FTC)와 감속재 온도계수(MTC)를 계속 계산하여 전산기는 원자로 출력을 75% 이하로 감소시키기 위해서는 얼마만큼의 부 반응도(Negative Reactivity)가 필요한지를 결정하게 하게되며, 소내전산기 계산결과에 따라 제어봉이 선택된다.

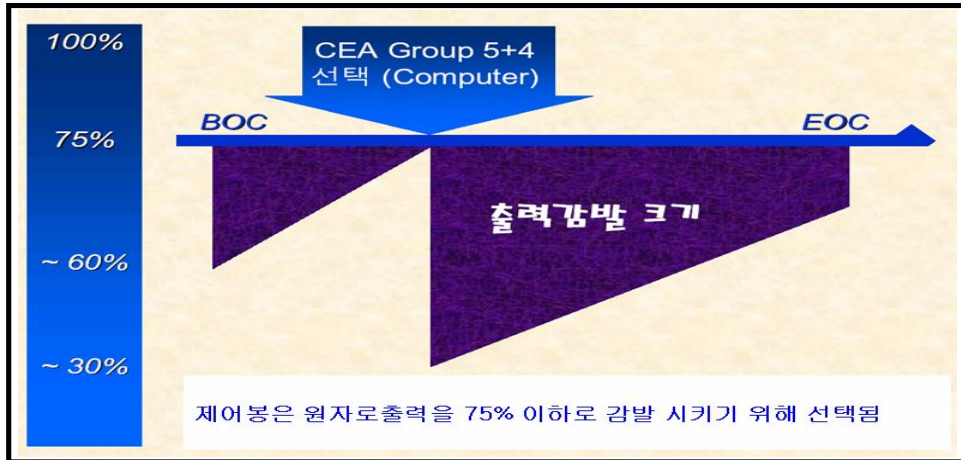
- 다음그림은 제어봉이 소내전산기에서 어떻게 선택되는지를 보여줌.



[그림 2-4] RPCS 제어봉 선택 알고리즘



[그림 2-5] RPCS 제어봉 선택 논리도

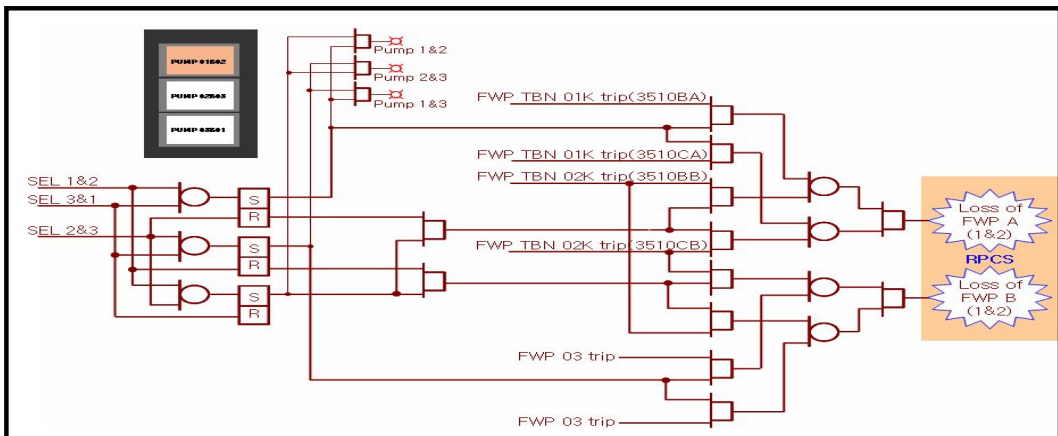


[그림 2-6] 낙하제어봉 선택기준

6. RPCS 동작신호

1) 주급수펌프 상실 신호(Loss of Feed Pump 1&2)

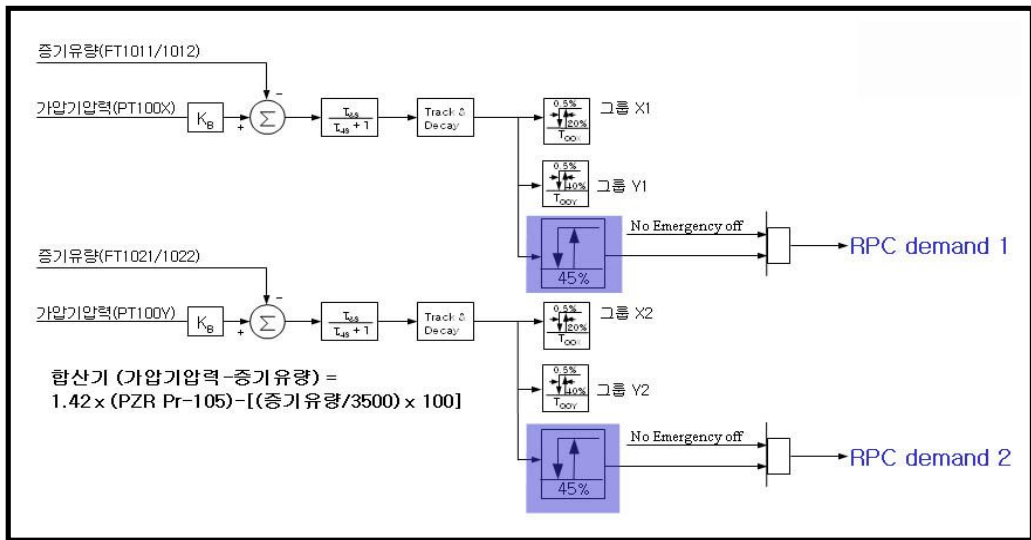
- RPCS는 주급수펌프 1대당 2개의 똑같은 다중 펌프 트립신호를 받아 각 펌프당 2/2 논리가 만족될 경우 동작됨. 터빈구동 주급수펌프(MFWP 01, 02)는 제어유 압력이 설정치 이하로 감소시, 전동기구동 주급수펌프(MFWP 03)는 펌프 정지신호에 의해 RPCS가 동작된다.



[그림 2-7] 주급수펌프 트립시 RPCS 동작 논리도

2) 대형 부하상실(SBCS LARGE LOAD REJECT 1&2)

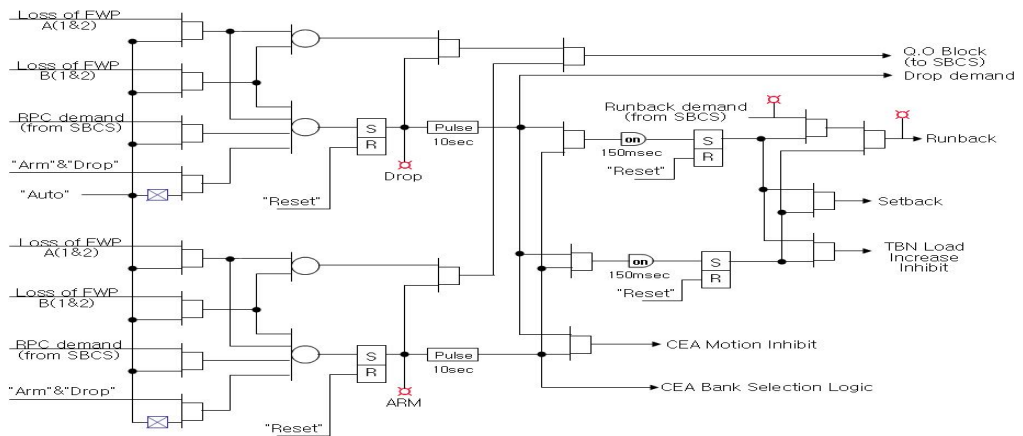
- 대형 부하 상실 요구신호는 증기우회제어계통(SBCS)에서 발생됨.



[그림 2-8] 터빈트립시 RPCS 동작 논리도

7. RPCS 출력신호

가. 주논리도



[그림 2-9] 터빈트립시 RPCS 동작 논리도

나. 제어봉 낙하(Drop) 신호

이 신호는 RPCS가 동작될 경우 제어봉 구동장치 제어계통(CEDMCS)의 전원공급 장치로 전송되며, 또한 암(Arm) 연동신호에도 이용됨. 선택된 제어봉 부그룹이 낙하 되려면 암(Arm) 연동신호와 낙하(Drop) 신호가 동시에 제어봉 전원계통으로 입력되어야 함. 소내전산기에 의해 발생된 제어봉 선택 신호는 원자로 열출력이 75% 이상일 때 제어봉 선택 기억장치(CEA Selection Storage Memory)에 보내짐.

○ 터빈 셋백(TBN Setback)

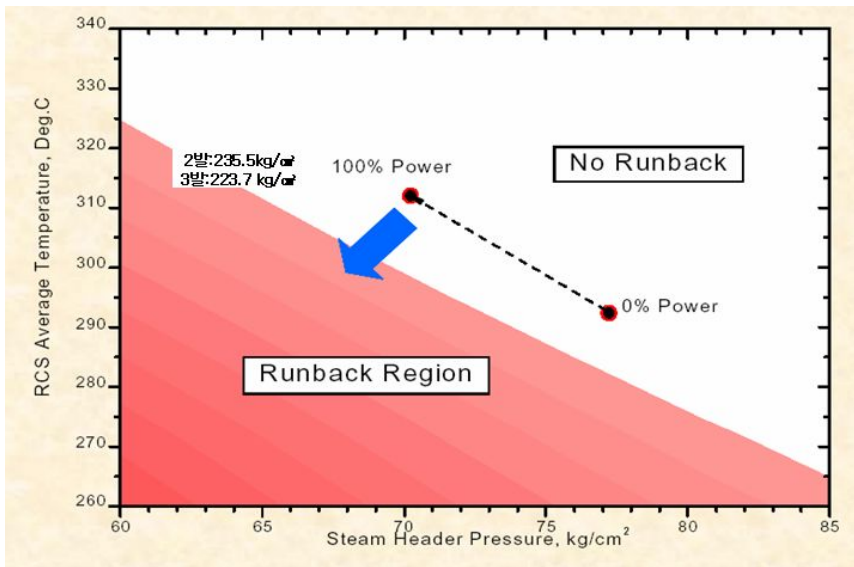
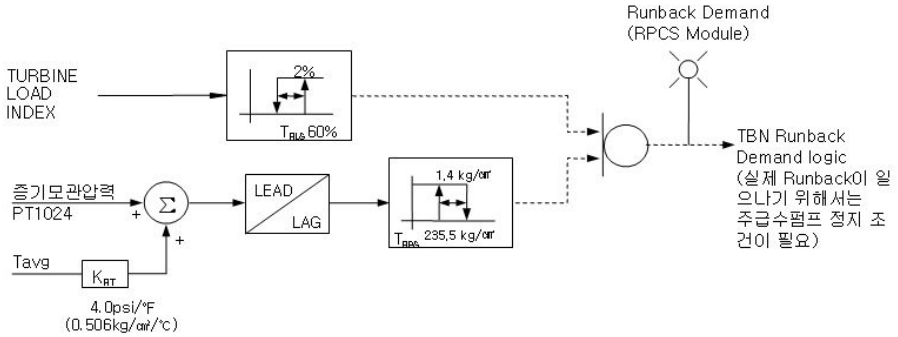
RPCS가 동작되면 그 신호가 터빈 제어계통으로도 보내어져 터빈 셋백(Setback) 및 런백(Runback) 동작신호를 발생시킴. 터빈셋백 신호는 RPCS가 동작되면 항상 발생하는 신호로서 터빈 부하를 600%/min의 비율로 60%까지 내리도록 터빈 제어계통으로 전송됨.

○ 터빈 런백(TBN Runback)

터빈 런백 신호는 RPCS가 동작될 때 터빈셋백신호와 같이 발생되나 셋백신호 비율이 런백신호 비율보다 훨씬 커서 셋백에 의해 60%까지 출력감발이 이루어짐. 이후 터빈 런백 신호는 T_{avg} 와 2차측 증기압이 안정될 때까지 133%/min의 비율로 진행되며, 안정상태는 원자로 출력이 SBCS 합산용량과 일치되었음을 의미함. 만약 셋백신호에 의해 발전소 과도현상이 만족스럽게 제어되지 못할 경우에는 60% 이하에서 SBCS로부터 런백 요구신호가 발생되어 런백이 계속됨.(아래 그림 참조)

원자로출력과 터빈출력 불평형 발생시 터빈출력을 감소시키기 위하여 사용

- 터빈출력 60% 이상시 항상 발생
- 증기모관 압력 + $(0.506 \times T_{avg})$ 가 설정치(235.5 kg/cm^2) 보다 낮은 경우
 ☞ 3발설정치 : 223.7 kg/cm^2



[그림 2-10] 터빈트립 시 RPCS 동작 논리도

8. RPCS 동작 후 조치사항 요약

- 1차측, 2차측 출력 안정 확인
- RPCS Reset
- 정지여유도 확인 및 조치(필요시 붕소주입, 운영기술지침서 불만족시 조치요구 제한시간 1시간)

- 조절제어봉 삽입한계 제한치 이내로 복구하거나 허용 정격열출력 이하로 감소
(운영기술지침서 불만족상태 조치요구 제한시간 2시간)
- 조절제어봉 인출시에는 출력감소에 따른 Xe 생성분 고려하여 제어봉을 인출하고
부분강제어봉으로 ASI제어
- 불필요한 SG 수위제어밸브의 전환(E/V \Leftrightarrow D/V)을 방지하기 위해 Rx 출력은
18~20% 범위를 벗어난 출력 범위 유지

제 2절 ASI 개요

1. ASI 제어의 목적

- FSAR 사고해석에 사용된 초기조건 만족
- 운영기술지침서에 제한한 범위내 ASI 유지
- ASI영향인자를 파악하여 적합한 제어 방법 결정

2. ASI 정의 및 제한치

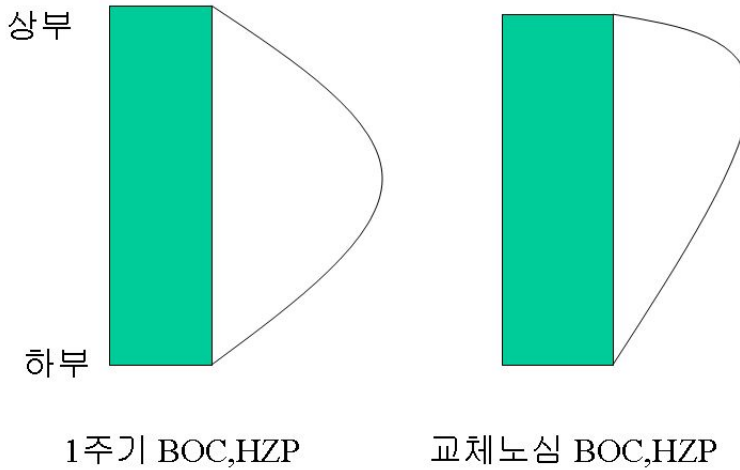
- 정의
 - Axial Shape Index
 - 노심의 축방향 출력분포가 상부 또는 하부쪽으로 어느 정도 편중되어 있는지 나타내는 지표. 즉, (+)시 출력 하부 편중, (-)시 출력 상부 편중
 - $$ASI = \frac{\text{노심 하부 출력} - \text{노심 상부 출력}}{\text{노심 평균 출력}}$$
- 제한치
 - 운영기술지침서 (LCO 3.2.5)
COLSS에서 계산된 ASI가 $-0.27 \leq ASI \leq +0.25$ 로 유지
→ ASI 제한치를 벗어날때 2시간 이내 복구하고, 아닐시 4시간이내 정격 열출력의 20% 이하로 감발
 - 노심보호연산기(CPC) 보조정지
출력증발시 Hotpin ASI : ± 0.5
출력감발시 HotpinASI : ± 0.5

3. ASI 진동 유발 요소

- 제어봉
 - ASI 제어 핵심 도구
 - 노심 중간 이하(약 230cm)는 효과가 미미함(출력에 따라 다름)
 - 노심 중간 이상 삽입시 출력 재분포 발생

○ 연소도

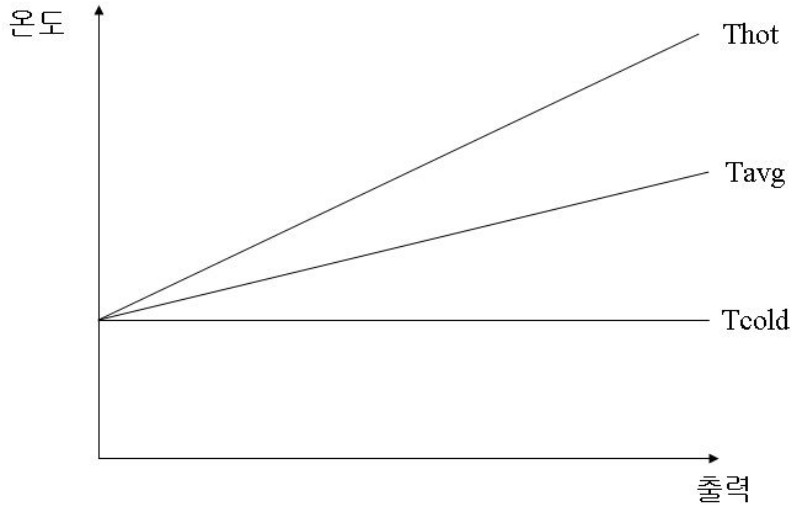
- 영출력상태에서 출력분포는 상부로 심하게 편중된 형상



[그림 2-11] 주기별 노심출력분포

○ 냉각재 온도(원자로 출력)

- T_{cold} 는 일정, T_{hot} 은 출력에 따라 증가하므로 MTC효과로 인해 원자로 상부의 중성자 분포에 영향을 줌.
- 출력 증발시는 원자로 상부에 부(-)반응도가 작용하여 하부로 중성자속 분포 유도
- 출력 감발시는 원자로 상부에 정(+)반응도가 작용하여 상부로 중성자속 분포 유도



[그림 2-12] 냉각재 온도/출력상관관계

○ **지논(Xe) 분포**

- 안정된 출력에서의 Xe 분포 : 출력 분포와 유사
- 출력변동시는 생성(직접생성, 간접생성)과 소멸(연소, 붕괴)의 특성 및 시간에 따라 변동됨.

○ **독물질농**

- 제어수단은 아니지만 장전수량이 ESI에 영향을 미침

○ **붕산 희석/주입**

4. 주기말 RPCS 동작시 ASI 제어시 고려사항

- 출력 유지기간, 출력 증발 계획을 적절히 고려하여 ASI 제어에 역점을 둘 것인지 아니면 붕소농도변화 최소화에 역점을 둘 것인지를 결정해야 한다.
 - RPCS 동작후에는 ASI 제어에 역점을 두면서 붕소농도 변화 최소화에도 신경을 써야함. 왜냐하면 주기말에는 붕소농도변화 요구에 대응 속도가 느리기 때문임.
- 제어봉 삽입제한 관련 초기에 과도한 붕소주입운전은 Xe 축적 시 원자로 출력 유지가 곤란할 수도 있다.

- RPCS 동작후 MTC 효과에 의해 출력분포가 상부로 극심하게 편중된다.
- 출력증발률을 크게하면 노심상부의 온도가 빨리 상승하여 상부쪽으로 치우쳐 있던 출력 분포를 하부로 빠르게 이동 시킬수 있는 장점이 있으나 제어봉 인출이 과다하면 효과가 줄어드는 결과를 초래한다.
- RPCS 동작 직후 또는 Xe 누적 최고치를 벗어난 시점에서의 원자로 출력증발이 저 출력에서의 출력 유지를 최소화 할 수 있다.
- 주기말로 가면서 제어봉 제어능은 약간 증가하지만 출력결손이 커지면서 상대적인 제어능이 감소되어 ASI 제어시 효과 감소하는 경향이 있다.

제 3절 RPCS 동작 이력

1. 2005년 이후 발전소별 RPCS 동작 현황

[표 2-1] 표준형발전소 RPCS 동작이력

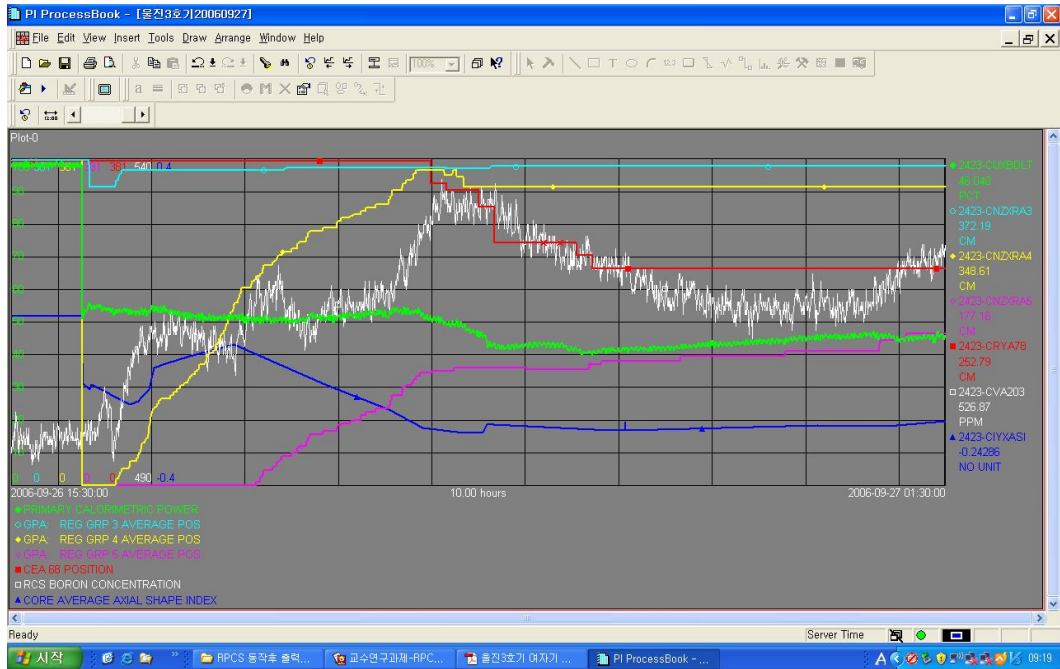
구 분	울진2발전소	울진3발전소	영광2발전소	영광3발전소	계
RPCS 동작횟수	8	2	1	2	13

2. RPCS 동작 현황 검토(발전소별 대표 1건씩 검토)

가. 울진 3호기 발전기 여자기 고장

- 동작일자 : 2006.9.26
- RCS 임계농도 : 499 ppm
- 고장 현황 : 주발전기 여자기 Follower#2 Bridge 및 Protection Bridge 고장으로 2/5 동시성 만족으로 여자기 고장에 의한 터빈/발전기 정지 발생
- 주요 운전변수 검토
 - 원자로 출력 : 100 → 50 → 40 → 50% (ASI 제어위해 PS 삽입시 출력감소)
 - ASI_{max} : - 0.27 (운영기술지침서 해당)

- 조절제어봉 그룹(이하 RG) 4로 ASI 제어 (조절 제어봉 중첩 위반)



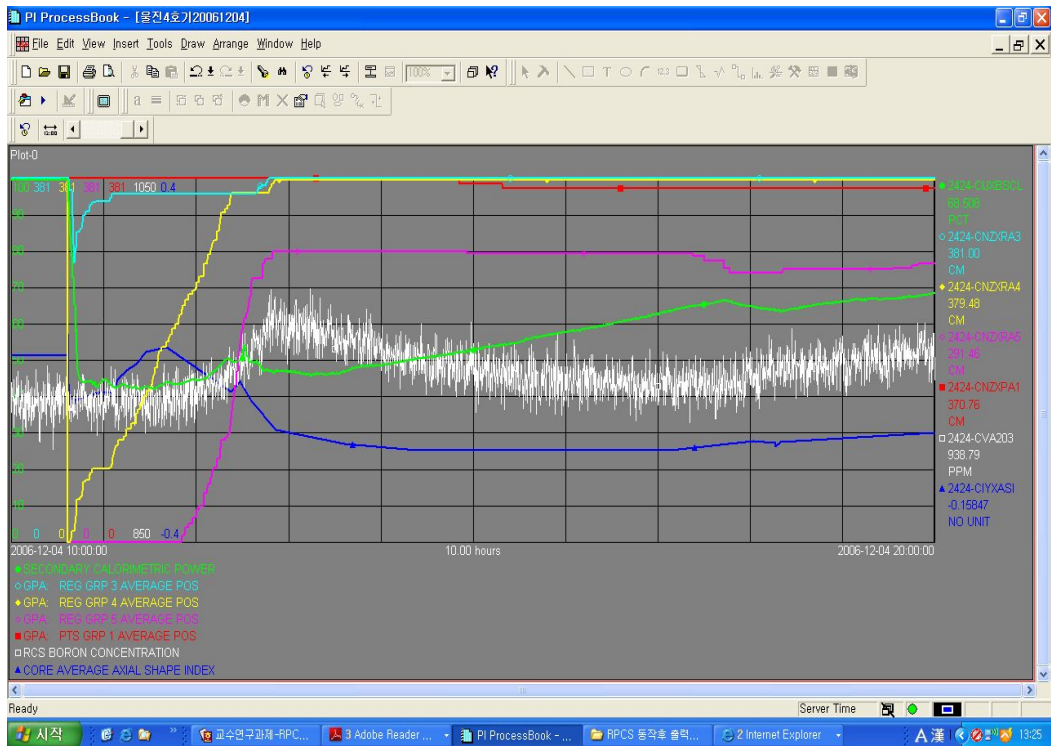
[그림 2-13] RPCS 동작시 PI 분석(울진3호기)

나. 울진 4호기 주급수 펌프 정지

- 동작일자 : 2006.12.4
- RCS 임계농도 : 934 ppm
- 고장 현황 : MFWP 01 조속기 Fail에 의해 RPCS 동작

○ 주요 운전변수 검토

- 원자로 출력 : 100 → 42 → 48% → 계속 증가
- ASI_{max} : - 1.92
- RG-4로 ASI 제어안함. 주기초여서 ASI 제어 비교적 양호
- 특이사항 : RPCS 동작후 출력증발중에도 붕소주입운전병행



[그림 2-14] RPCS 동작시 PI 분석(울진4호기)

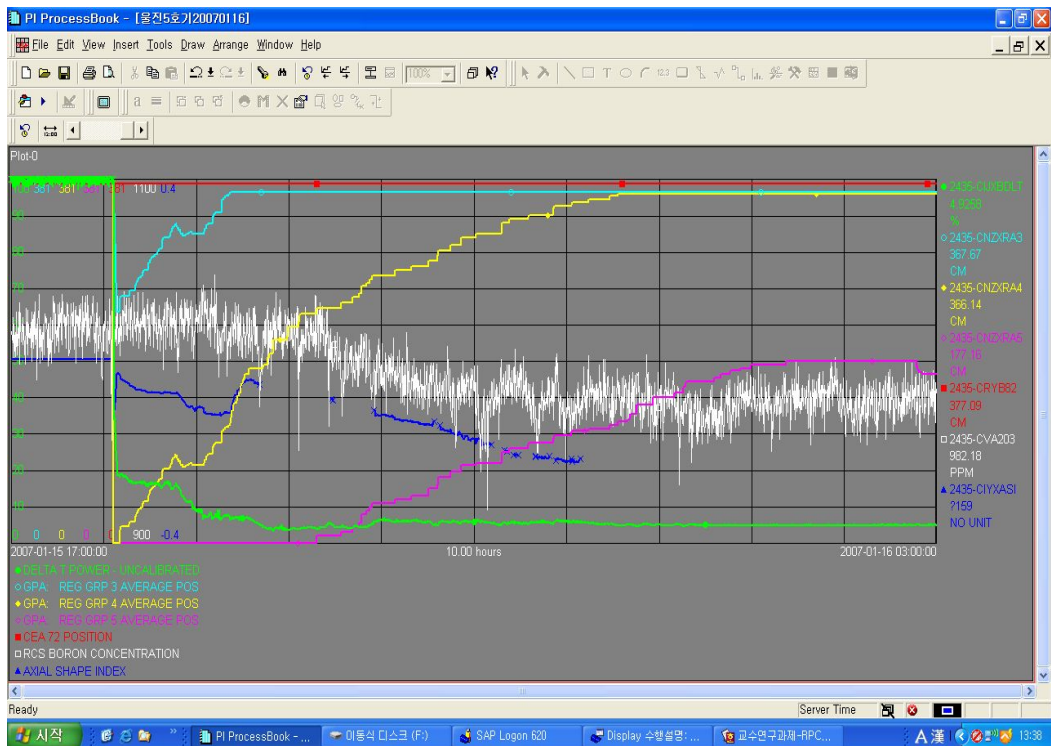
다. 울진 5호기 터빈 정지

- 동작일자 : 2007.1.15. 18:06
- RCS 임계농도 : 991 ppm
- 고장 현황 : 전출력 운전중 원자로 정지에 의한 터빈 트립 발생원인 제어봉구동장치(CEDM) 저전압계전기가 발전소제어계통(PCS) 전원상실로 오동작되어 터빈 트립되고 원자로 출력은 약 15%까지 자동 감발 후 안정됨. PCS 전원상실 원인은 순환수펌프(PP04) 출구밸브(V76) 점검 과정에서 48V DC 전원과 120V AC 전원이 혼촉되어 PCS 전원상실됨.

○ 주요 운전변수 검토

- 원자로 출력 : 100 → 20 → 8 → 5%
- ASI_{max} : - 0.22 (원자로 출력 20% 미만 유지하여 ASI 관련 없음)

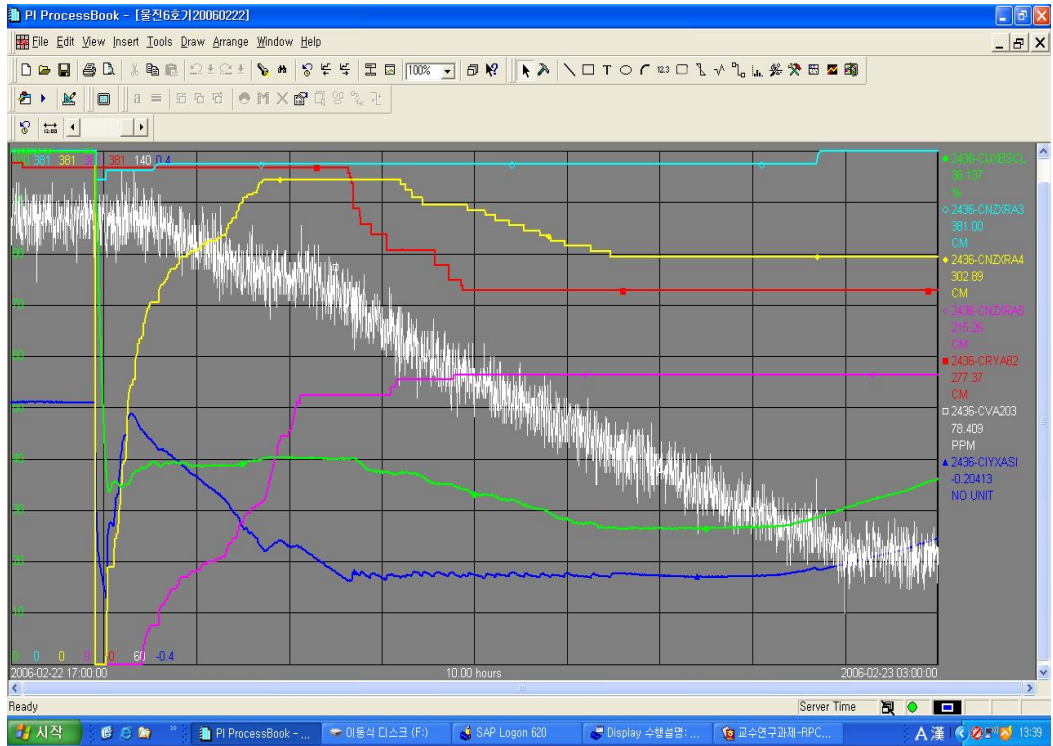
- RG-4로 ASI 제어안함



[그림 2-15] RPCS 동작시 PI 분석(울진5호기)

라. 울진 6호기 주급수 펌프 정지

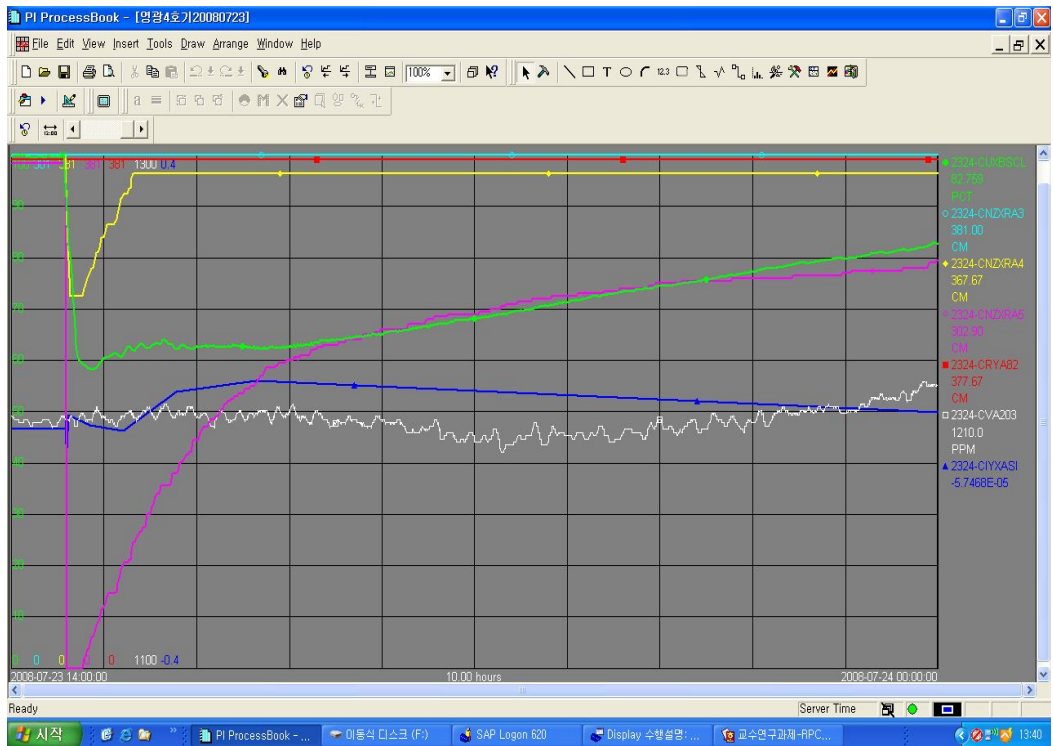
- 동작일자 : 2006.2.22
- RCS 임계농도 : 121 ppm
- 고장 현황 : 전출력 운전중 주급수펌프 02 트립에 의한 RPCS 동작
- 주요 운전변수 검토
 - 원자로 출력 : 100 → 35 → 40 → 27%(출력감소)
 - ASI_{max} : - 0.26 (약 6시간 지속)
 - RG-4로 ASI 제어 (조절 제어봉 중첩 위반)



[그림 2-16] RPCS 동작시 PI 분석(울진6호기)

마. 영광4호기 주급수 펌프 정지

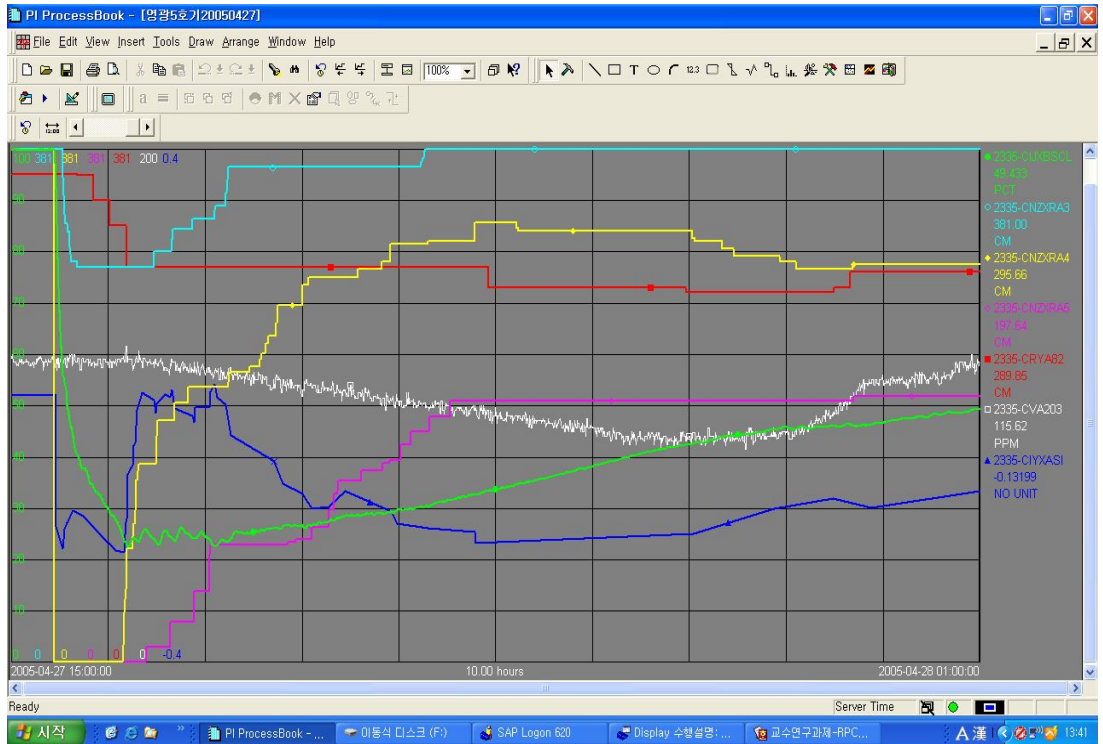
- 동작일자 : 2008.7.23
- RCS 임계농도 : 1195 ppm
- 고장 현황 : 주급수펌프 정지에 의한 RPCS 동작
- 주요 운전변수 검토
 - 원자로 출력 : 100 → 60 → 65 → 80%
 - ASI_{max} : + 0.06
 - RG-4 정상 제어



[그림 2-17] RPCS 동작시 PI 분석(영광4호기)

바. 영광5호기 송전선로 비정상

- 동작일자 : 2005.4.27
- RCS 임계붕소 농도 : 116 ppm
- 고장 현황 : 100%운전중 송전선로 산불로 지락계전기 동작되어 전력계통 고장파급 방지시스템에 의해 소내부하 운전으로 전환
- 주요 운전변수 검토
 - 원자로 출력 : 100 → 25 → 30 → 45%
 - ASI_{max} : - 0.22
 - RG-4로 ASI 제어 (조절 제어봉 중첩 위반)



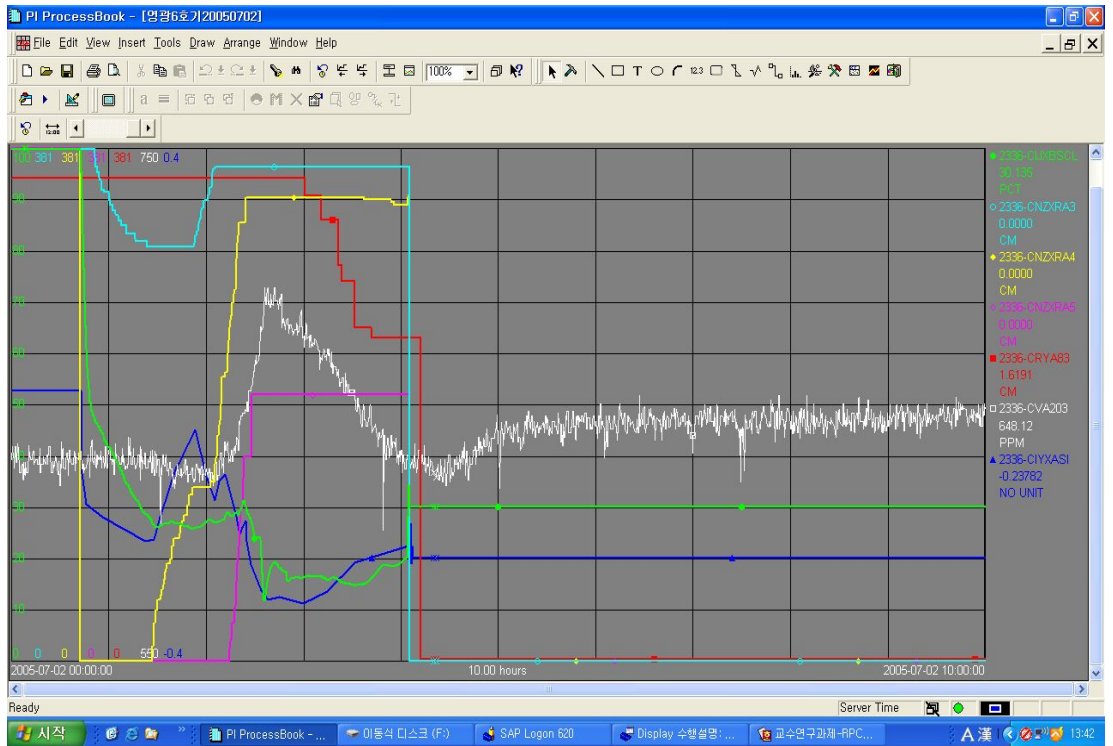
[그림 2-18] RPCS 동작시 PI 분석(영광5호기)

사. 영광6호기 송전선로 비정상, 출력증발과정에 Trip

- 동작일자 : 2005.7.2 04:05
- RCS 임계농도 : 628 ppm
- RPCS 제어봉 선택 : RG-4, RG-5 선택
- 고장 현황 : 영광#2 T/L에 발생한 낙뢰로 송전선로 보호계통 및 고장파급 장치 동작으로 소내부하 운전으로 전환됨. RPCS 동작후 출력을 유지중 봉산수 주입 및 출력 급감발에 따른 지논축적의 영향으로 원자로 출력이 18% 이하로 감발됨.

○ 주요 운전변수 검토

- 원자로 출력 : 100 → 47 → 14 → 16 %(출력감소)
- ASImax : - 0.309 (원자로출력이 20% 미만이어서 운영기술지침서 위반아님)
- RG-4로 ASI 제어 (조절 제어봉 중첩 위반)



[그림 2-19] RPCS 동작시 PI 분석(영광6호기)

제 4절 문제점 검토

1. ASI 제어 문제점 검토

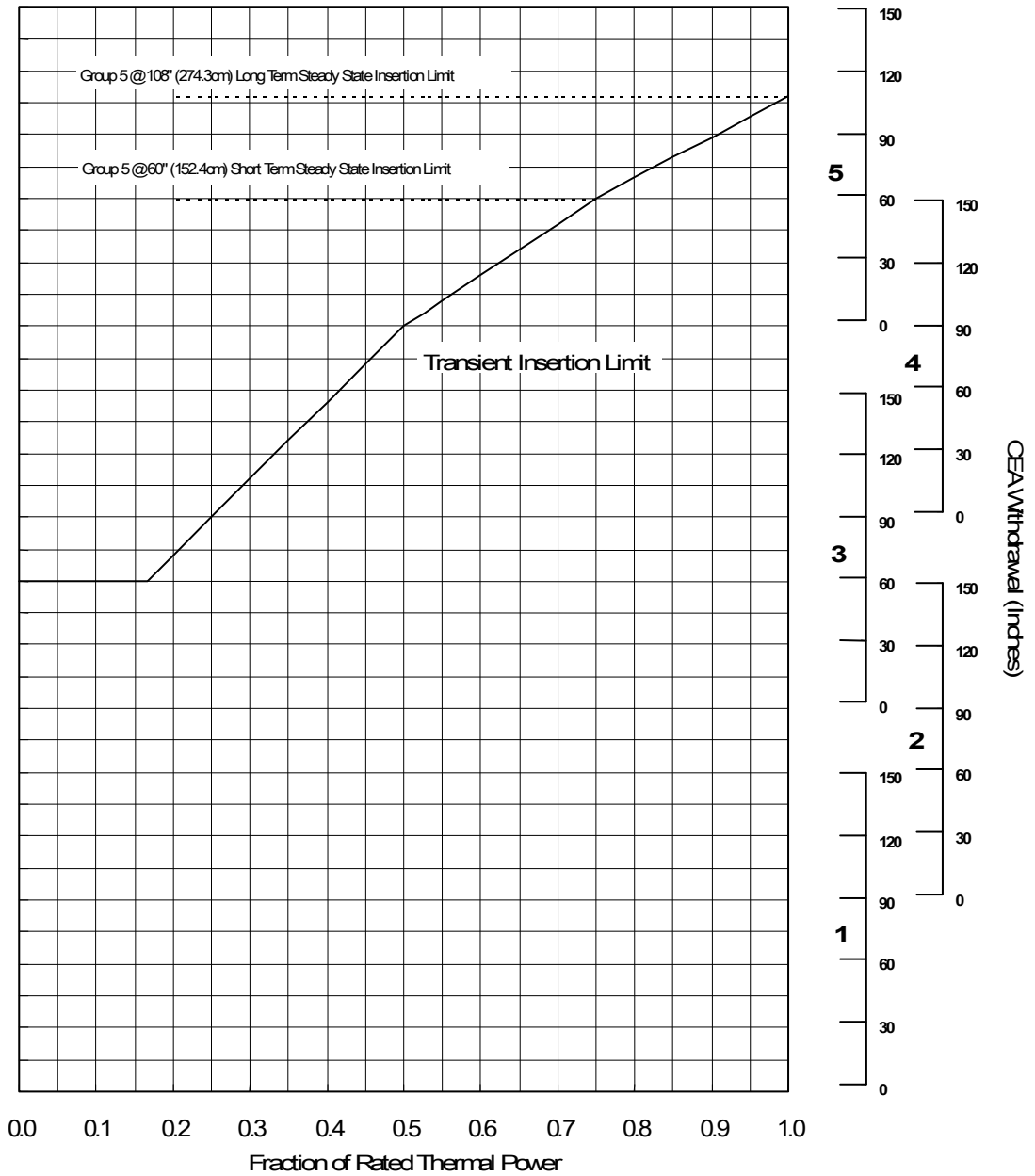
- 앞의 발전소별 대표 RPCS 동작이력 검토 결과 주기초(BOC)인 경우를 제외 ASI가 운영기술 지침서의 제한치를 초과하려는 경향이 있어, 이를 제어하기 위해 제어봉 중점을 위반하여 RG-4를 사용한 내용을 확인할수 있었다.
- 중간 주기(임계 붕소농도 737ppm) 이후부터 RPCS 동작 시 ASI가 운영기술지침서 상부제한치(-0.27) 위협

2. 조절제어봉 삽입한계 검토

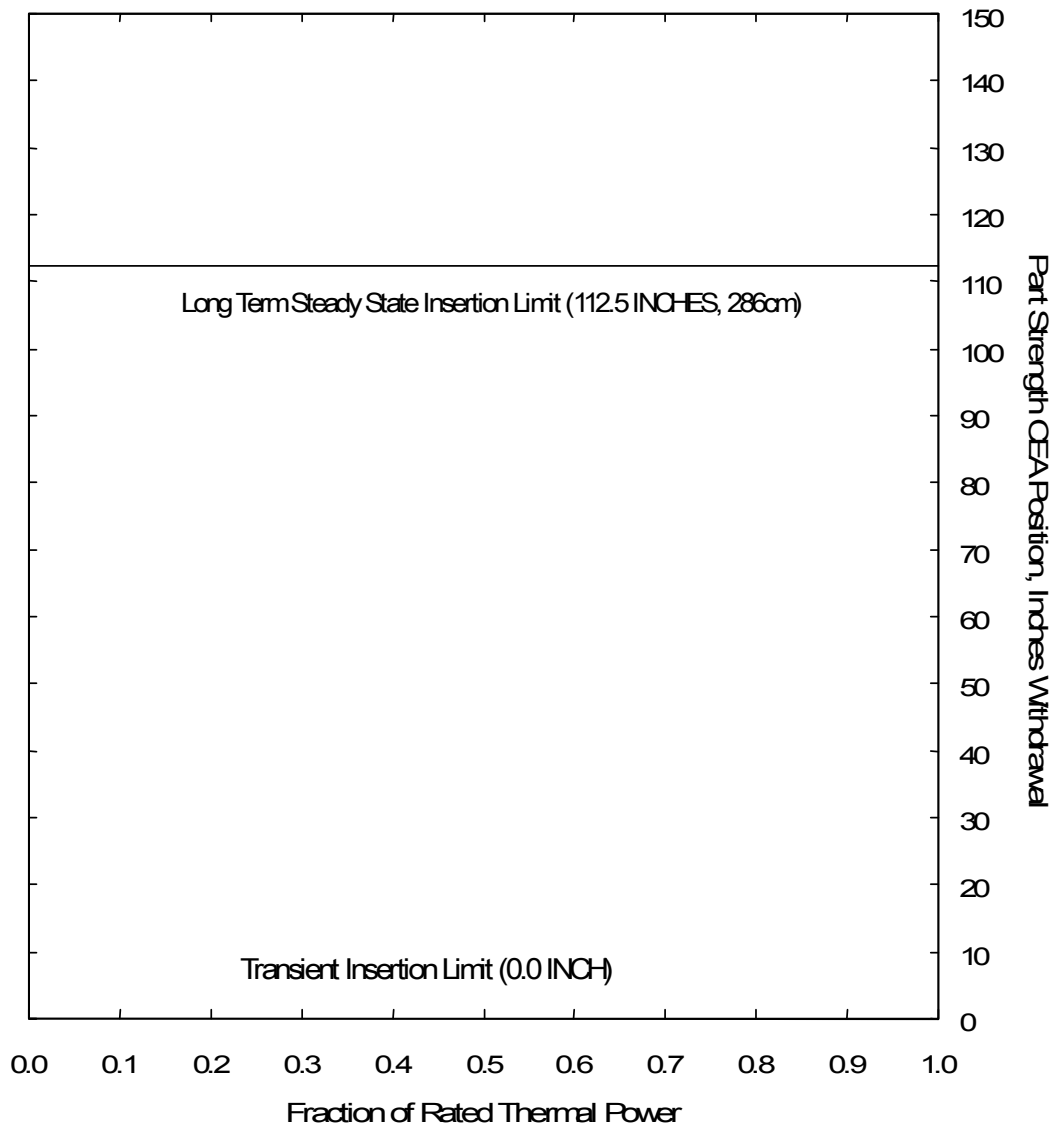
- 모든 사례가 2시간이내에 조절제어봉을 과도상태 삽입한계 이내로 복구하였으며 단기안정상태 삽입한계 이상 유지되어 삽입한계에 문제가 없었음을 확인했다.
- 많은 사례가 부분강제어봉을 장기안정 삽입한계 이상으로 삽입하였으나 제한시간을 초과하지 않아 삽입한계 문제가 없었음을 확인했다.
- 삽입한계 운영기술지침서 내용
 - 운전제한조건 LCO 3.1.7 조절제어봉 삽입한계(COLSS가 운전중인 경우)
 - 1) 과도상태 삽입한계 초과시 2시간 이내 제한치 이내로 복구한다.
 - 2) 장기안정상태~단기안정상태 삽입한계 사이에서 4시간 초과시 30EFPD 동안 5EFPD를 초과하지 않는지 확인한다.
 - 운전제한조건 LCO 3.1.8 부분강제어봉 삽입한계 :

장기 안정상태 삽입한계(284cm)초과하여 30 EFPD 동안 7 EFPD 이상시 2시간 내에 삽입한계 이내로 복구 (부분강제어봉은 7EFPD 동안 삽입한계 아래로 제어 가능)

[표 2-2] 제어봉 COLSS 운전시 조절제어봉 삽입한계



[표 2-3] 부분강 제어봉 삽입한계



3. 원자로 출력 유지 검토

- 총 13건중 5건이 RPCS 동작 이후 원자로 출력 유지에 어려움을 겪었으며, 특히 2008.2.29 울진 3호기 터빈 트립의 경우는 55%에서 20%까지 원자로 출력이 감발되었음을 확인했다.
- 지논이 축적되는 시점에서 ASI 제어를 위한 RG-4 삽입과 부분강 제어봉 삽입으로 많은 부반응도가 인가되는 결과를 초래한다.
- 지논 축적과 ASI 제어를 위한 제어봉 삽입으로 인한 부반응도를 붕소 희석운전으로 극복하지 못함을 확인했다.

[표 2-4] 주기별 제어봉 제어능(3호기 9주기 NDR, 전출력운전시)

비 고	BOC(pcm)	EOC(pcm)	비고
RG-4	486	580	
RG-5	411	403	
부분강제어봉	170	296	

- 주기별 지논 축적율

[표 2-5] 주기별 지논 축적율(3호기 9주기 NDR, 100→40%)

비 고	MOC	EOC	비고
2시간후 반응도*	-250 pcm	-220 pcm	
분당 반응율	-2.08 pcm/min	-1.83 pcm/min	

* RPCS 동작후 제어봉 조작이 완료되고, 붕소농도로 부반응도를 투입하는 시점이 대개 2시간쯤부터임.

○ 붕소희석운전을 통한 주기별 정반응도 삽입율

[표 2-6] 붕소농도별 희석율(울진2발전소 계통-3451A CVCS 보충수표)

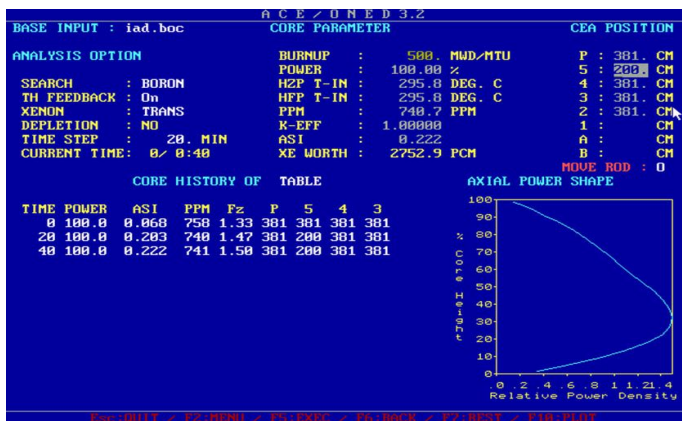
RCS Cb	1ppm 희석시 필요 순수량	충전펌프 2대 운전시	충전펌프 3대 운전시	비고
100 ppm	2278 litter	0.93 pcm/min	1.50 pcm/min	
200 ppm	1106 litter	1.92 pcm/min	3.10 pcm/min	
300 ppm	733 litter	2.89 pcm/min	4.67 pcm/min	
400 ppm	547 litter	3.88 pcm/min	6.25 pcm/min	
500 ppm	435 litter	4.88 pcm/min	7.87 pcm/min	

- 충전펌프 2대 운전시 보충유량 272lpm(VCT 회수유량 16gpm제외)
 - 충전펌프 3대 운전시 보충유량 439lpm(VCT 회수유량 16gpm제외)
 - 붕소 미분제어능 7.8pcm/ppm
- 주기말의 경우(임계붕소농도 200ppm), 단순히 지논 축적율만 고려해도 정상 보충을 통한 부반응도를 극복하기 어렵다는 결과를 확인할 수 있었다. 이때 ASI 제어를 위해 제어봉(RG-4, 부분강제어봉)까지 삽입하게 되면 원자로 출력은 감소될 수 밖에 없게 된다. (실제 발전소에서 붕소희석 운전을 할 때는 연속적이 아닌, 노심 반응도 상태를 보고 단속적으로 운전을 하므로 실제 붕소희석을 통한 정반응도 부가율은 계산값 보다 적음.) 따라서 지논 축적율을 사전고려한 붕소희석운전과 충전펌프 3대 운전하여 희석하면 효과적인점을 확인 할 수 있었다.

제 5절 해결방안

1. ACEONED 프로그램

- “ACEONED” 란?
 - Adaptive Core Emulator ONE Dimensional code
 - 1D 2-Group Diffusion Code
- 개발 : KNFC/KAERI
- 유사 Code
 - BEACON(W), OASIS(W), APOLLO(W)
 - FLAIR(CE), HERMITE(CE), QUIX (CE)
- 이용
 - 축방향 출력편차(ASI) Search
 - Xenon 변화에 대응하기 위한 CR 전략
 - 노심 추적 계산, 부하 추종 모사
 - 출력 증.감발 및 재기동운전 모사
- 검증
 - 설계치와의 비교를 통한 검증 : 모델 생산시 3-D코드를 기준으로 설계값을 일치 시키므로, 설계치와의 오차는 무시할 정도이다.
 - 측정치와의 비교를 통한 검증

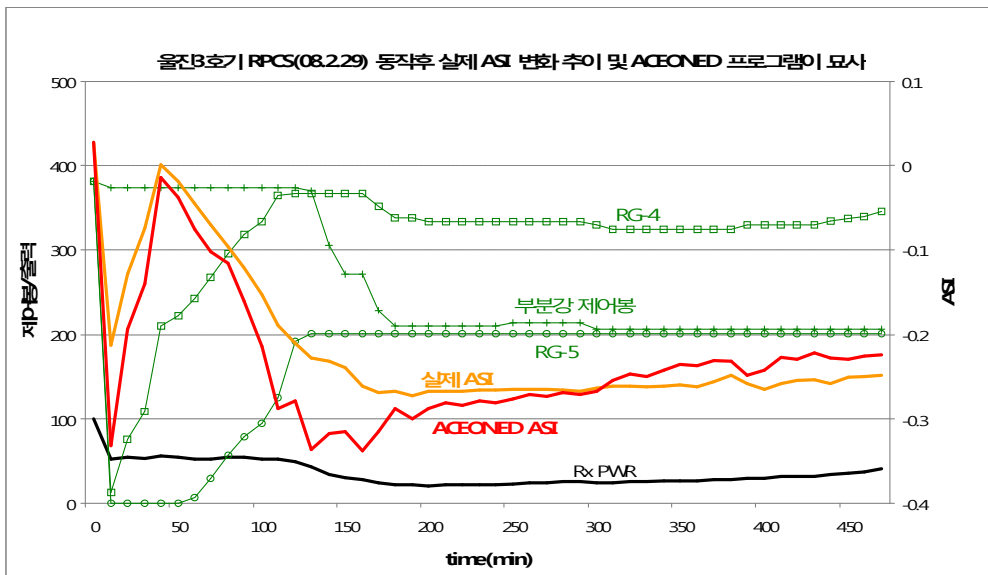


[그림 2-20] ACEONED 초기화면

2. ACEONED 프로그램 검증

○ RPCS 동작시 실제 ASI와 ACEONED ASI 비교 검증 1

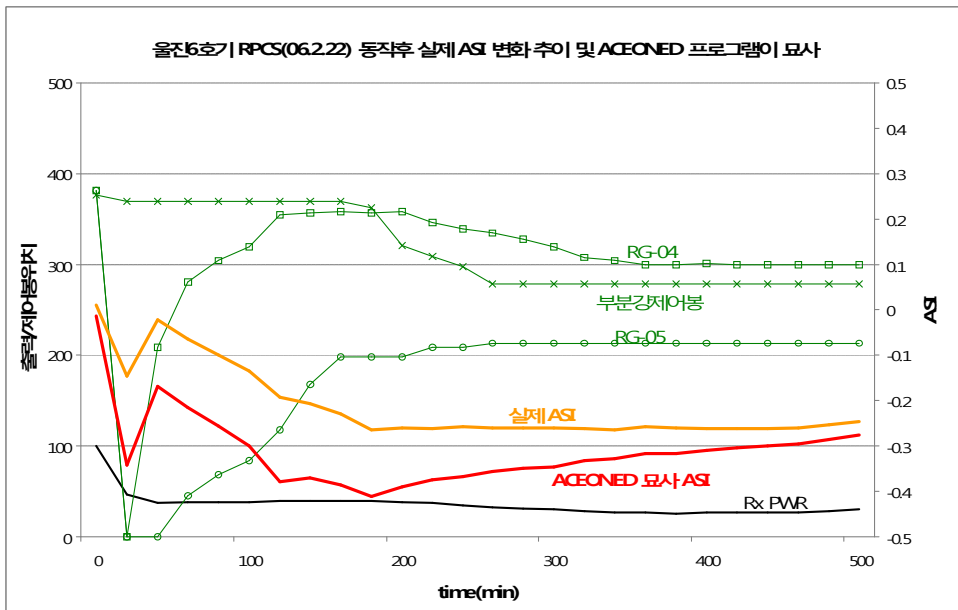
- 대상 : 울진3호기 RPCS 동작 사례 ('08.2.29)
- 주요 운전변수를 ACEONED 프로그램에 대입하여 실제 ASI와 ACEONED가 묘사한 ASI를 비교하여 최적점을 찾아낸다.
- 실제 ASI와 일치하지는 않으나 추이가 유사하고 실제값보다 보수적인 경향을 보임을 확인 할 수 있었다.



[그림 2-21] ACEONED 모사화면(울진 3호기)

○ RPCS 동작시 실제 ASI와 ACEONED ASI 비교 검증 2

- 대상 : 울진6호기 RPCS 동작 사례 ('06.2.22)
- 주요 운전변수를 ACEONED 프로그램에 대입하여 실제 ASI와 ACEONED가 묘사한 ASI를 비교 비교하여 최적점을 찾아낸다.
- 실제 ASI와 일치하지는 않으나 추이가 유사하고 실제값보다 보수적인 경향을 보임을 확인 할 수 있었다.

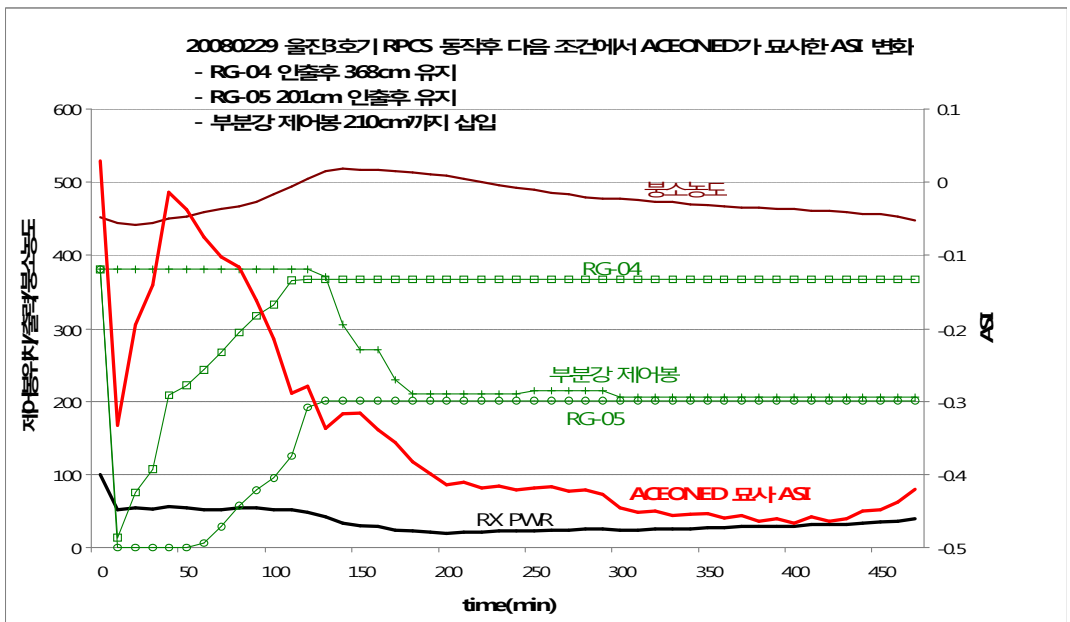


[그림 2-22] ACEONED 묘사화면(울진 6호기)

3. ACEONED 프로그램을 이용한 다양한 ASI 거동 분석

가. 조건 1

- 대상
 - 울진3호기 RPCS 동작 사례 ('08.2.29)
- 방법
 - 원자로출력은 실제와 동일
 - RG-4 모두 인출후 유지
 - RG-5 201cm 인출
 - RG-4 인출완료후부터 부분강 제어봉 210cm 까지 삽입



[그림 2-22] ACEONED 모사화면(울진 3호기)

- 분석결과
 - ASI 최대 -0.46에 도달하여 운영기술지침서 제한치 초과
 - 부분강 제어봉 만으로 ASI 유지 곤란

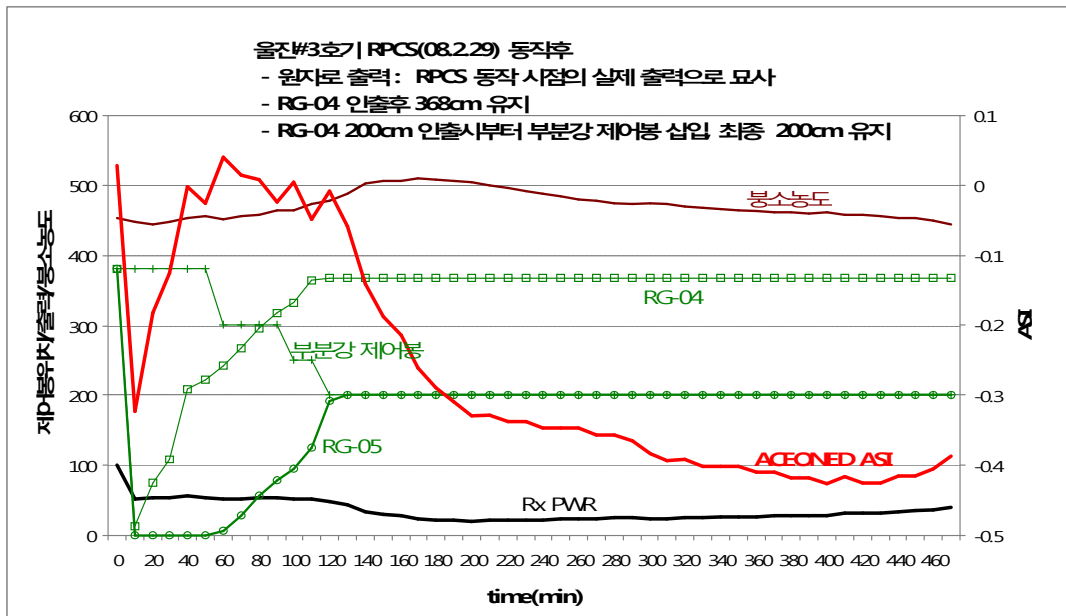
나. 조건 2

○ 대상

- 울진3호기 RPCS 동작 사례 ('08.2.29)

○ 방법

- 원자로출력은 실제와 동일
- RG-4 모두 인출후 유지
- RG-5 201cm 인출
- RG-4 200cm 인출시부터 부분강 제어봉 삽입하여 최종 200cm 유지



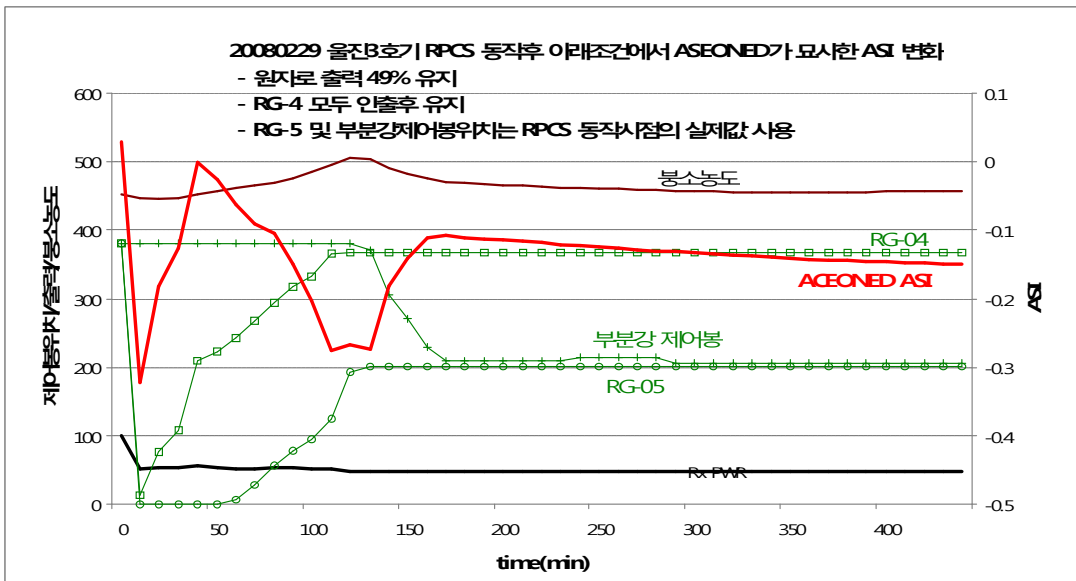
[그림 2-23] ACEONED 모사화면(울진 3호기)

○ 분석결과

- ASI 최대 -0.42에 도달하여 운영기술지침서 제한치 초과하는 결과를 확인했다.
- 조건 1과 다른점은 부분강 제어봉을 삽입하는 시점. 결과는 조건1과 유사한 경향을 보이거나 최대 ASI가 약간 개선됨을 확인 할 수 있었다.
- 하지만 여전히 부분강 제어봉 만으로 ASI 유지 곤란함을 확인 할 수 있었다.

다. 조건 3

- 대상
 - 울진3호기 RPCS 동작 사례 ('08.2.29)
- 방법
 - 원자로출력은 49%로 유지
 - RG-4 모두 인출후 유지
 - RG-5 및 부분강 제어봉은 실제값 사용



[그림 2-24] ACEONED 묘사화면(울진 3호기)

- 분석결과
 - ASI 최대 -0.15에 도달하여 운영기술지침서 제한치 이내임을 확인 할수 있었다.
 - 원자로 출력유지가 ASI에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

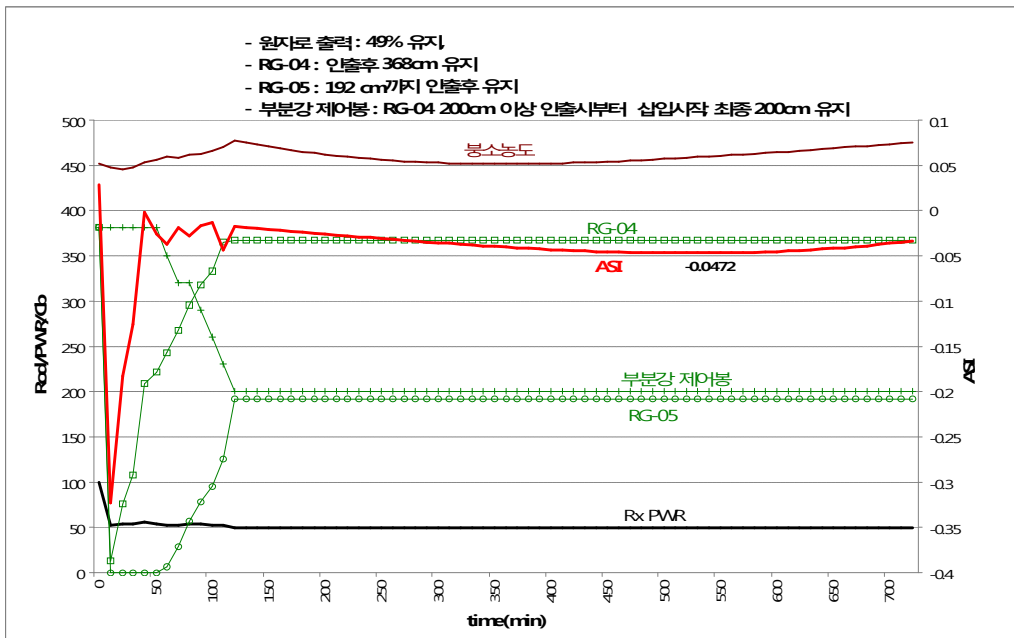
라. 조건 4

○ 대상

- 울진3호기 RPCS 동작 사례 ('08.2.29)

○ 방법

- 원자로출력은 49% 유지
- RG-4 모두 인출후 유지
- RG-5 201cm 인출
- RG-4 200cm 인출시부터 부분강 제어봉 삽입하여 200cm에서 유지



[그림 2-25] ACEONED 모사화면(울진 3호기)

○ 분석결과

- ASI 최대 -0.0472에 도달하여 운영기술지침서 제한치 이내임을 확인했다.
- 조건 3의 경우보다 ASI가 0.1 정도 개선됨을 확인 할 수 있었다.
- 원자로 출력유지가 ASI에 큰 영향을 주는 것이 다시 한 번 확인할수 있었다.
- 조건2에서는 출력유지없이 부분강 제어봉 삽입시점만 조절하는 것보다 출력

유지와 병행시 ASI에 더 큰 영향을 주는 것이 확인되었다.

- RG-4 인출중 200cm 부근에서 부분강제어봉을 조기에 사용시 RG-4인출을 위한 붕소주입 부하를 줄일수 있음을 확인 할 수 있었다.
- 실제 사례에서처럼 나중에 ASI 제어를 위해 부분강제어봉을 삽입하면 지논축적 부반응도에 부분강제어봉 부반응도가 더해져 더많은 붕소를 희석해야하는데, 이경우에서처럼 부분강제어봉에 대한 부반응도 부담이 줄어들어 붕소희석량도 감소되는 결과를 확인 할 수 있었다.

○ RPCS 동작후 최적 복구절차 제안

- 3호기 08.2.29 사례기준 (미분붕소제어능 : 8.8pcm/ppm)

[표 2-7] RPCS 동작 후 최적복구 제안(울진 3호기 08.2.29)

시간	구 분	주입반응도	상쇄반응도(운전원조치)	비 고
~20분	발전소 안정상태 확인(약 50%)	-910pcm	출력결손 약 2100pcm/100%	
~50분	RG-4 200cm 인출 지논 축적	+ 500pcm -120pcm	-380pcm (43ppm 붕소주입)	부분강제어봉삽입시작
~120분	RG-5 200cm 인출 PS 200cm 삽입 지논 축적	+ 360pcm -290pcm -50pcm	-20pcm (2.3ppm 붕소 주입)	
~180분	지논 축적	-50pcm	-160pcm 18ppm 붕소 희석	
~10시간	지논 소멸	+ 220pcm	-220pcm 25ppm 붕소 주입	

- 제어봉은 RG-4를 인출하되, RG-4가 200cm 근처가 되면 부분강제어봉을 삽입하여 RG-4의 부반응도를 보상하도록 한다.
- 부분강제어봉 삽입 시 RG-4 및 RG-5 인출에 대한 반응도를 상당부분 감당하여 붕소주입량을 줄일 수 있음을 확인 했다.

*부분강제어봉 제어능은 3호기 9주기 NDR 자료임(이전 NDR에는 자료없음)

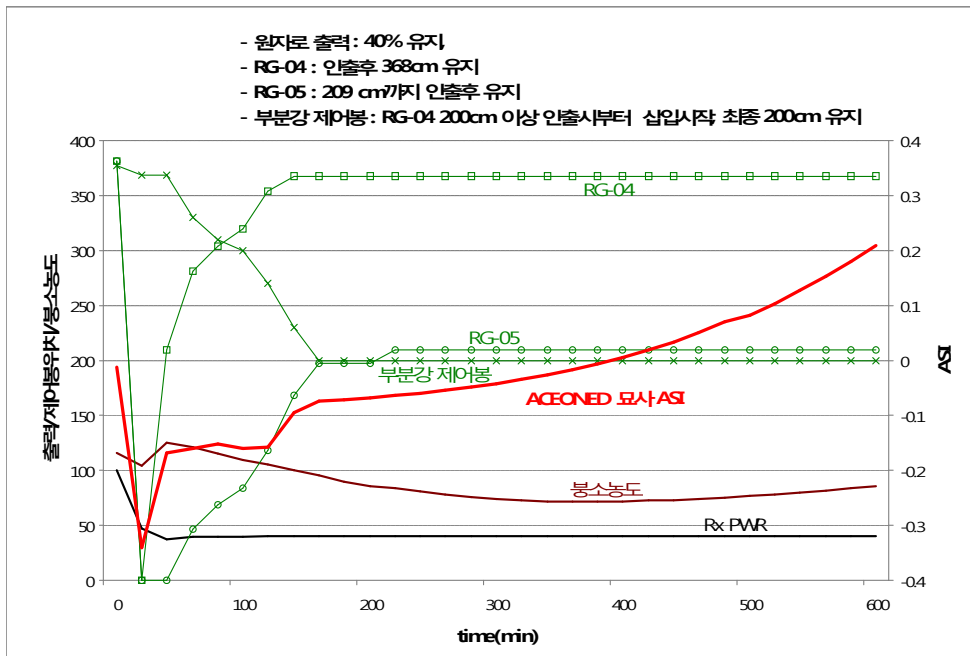
마. 조건 5

○ 대상

- 울진6호기 RPCS 동작 사례 ('06.2.22)

○ 방법

- 원자로 출력은 40% 유지
- RG-4 모두 인출후 유지
- RG-5 209cm 인출
- RG-4 200cm 인출시부터 부분강 제어봉 삽입하여 200cm에서 유지



[그림 2-26] ACEONED 모사화면(울진 6호기)

○ 분석결과

- ASI 최대 -0.16에 도달하여 운영기술지침서 제한치 이내임을 확인 할 수 있었다.
- 200분 이후 ASI 증가 시 부분강 및 RG-5 인출로 평탄하게 유지가 가능함을 확인 할 수 있었다.

4. 원자로 출력유지

- RPCS 동작 후 출력 유지 범위 검토
 - RPCS 계통 절차서상 20% 이하는 급수전환시점으로 출력유지 하한치이다.
 - 부하상실 비정상 절차서상 RPCS 동작 후 유지출력은 35~55%를 권고한다.
 - 출력결손과 제어봉 제어능을 고려한 RPCS 동작 후 초기 출력은 35~70%이다.
 - 제어봉동작금지신호(AMI) 설정치 및 증기우회제어계통(SBCS) 용량은 55%이다.
 - 13건의 사례 및 위 다.항 “ACEONED” 프로그램으로 분석한 결과 출력 감소 시 ASI가 급격히 상부로 치우침을 확인 할 수 있었다.
- 앞에서 언급한 바와 같이 ASI에 제어에 주요한 요소가 원자로 출력이며, 위 3.항 “ACEONED” 프로그램으로 분석한 것과 같이 원자로 출력 유지는 ASI 제어에 긍정적인 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 따라서 RPCS 동작 후 발전소가 안정되면 원자로 출력 유지 여부를 신속히 결정한 후 가능한 RPCS 동작 직후의 출력을 유지하며 경우에 따라서는 제한율 이내에서 출력을 증발하여 55%까지 출력을 높게 유지하는 것이 좋다는 결과를 확인 할 수 있었다. 특히 주급수펌프트립에 의한 RPCS는 전동기구동 펌프 1대가 여유분으로 있으므로 펌프만 기동하면 즉시 출력을 증발가능하므로 원자로 출력을 최대한 높게 유지하고(55%이내), 가능하면 제한치내에서 원n 자로출력을 55%로 증발하는 것이 바람직함을 확인 할 수 있었다.
- 출력을 가능한 높이(55%이내에서) 유지 하면 부가적으로 터빈 출력 증발 시 폐기물 감소, 이용율 향상, 제어봉 삽입한계에도 부가적인 이점을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있었다.

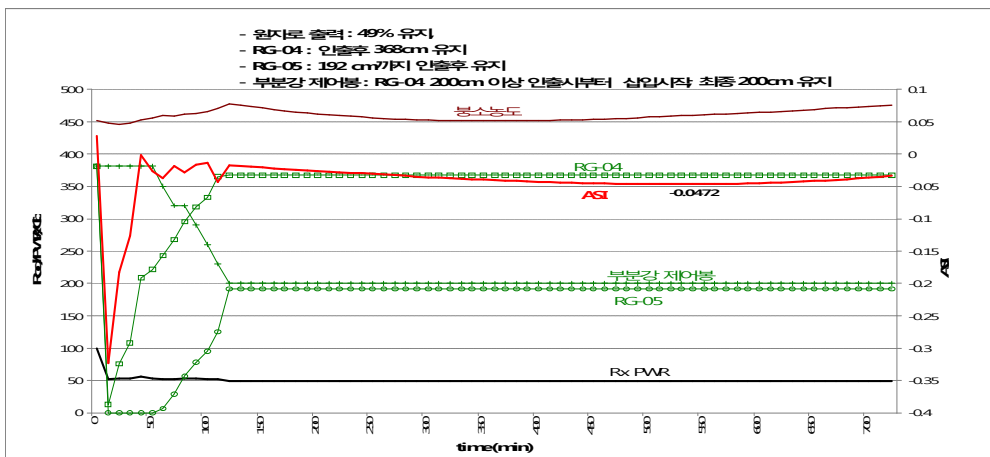
제 3 장 결론

제 1절 조절제어봉 중첩위반

- 주기초를 제외한 대부분의 기간 중 RPCS가 동작되면 ASI 제어의 어려움을 겪으며, RG-4를 사용하여 ASI를 제어함으로써 조절제어봉 중첩을 위반하고 있으므로 시정 조치 되어야 한다.
- 이러한 문제점을 해결하기 위해 표준형발전소 선행제어군 확장중첩이 허용되는 원자로출력 75% ~ 42% 출력범위 이내에서 ASI 제어가 이루어져야한다는 결론을 얻을 수 있었다.

제 2절 RPCS 동작 후 ASI 최적제어

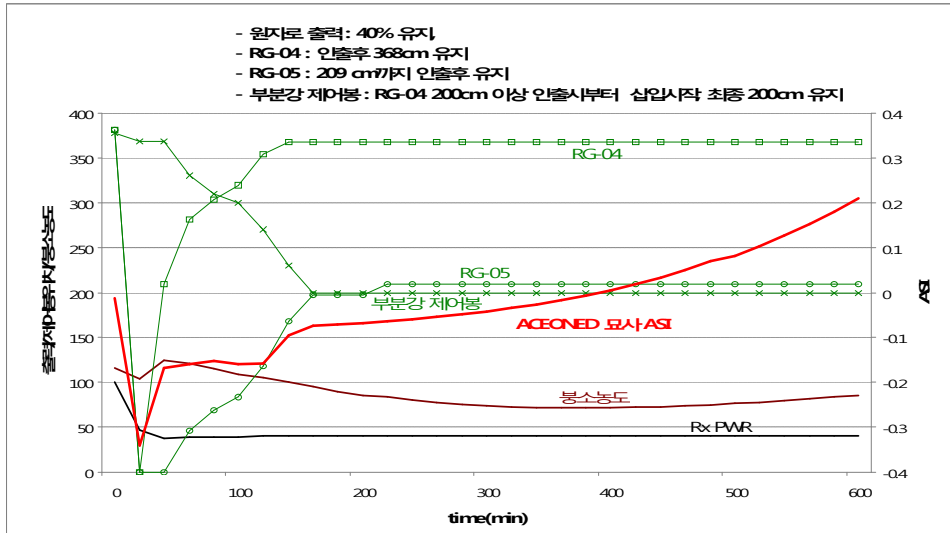
- 노심 거동을 분석하는 프로그램인 "ACEONED" 프로그램을 이용하여 분석한 결과 RPCS 동작 후 원자로출력을 허용가능한 범위내에서 높이 유지하고 부분강 제어봉을 조기에 사용함으로써 ASI를 제한치내에 유지할 수 있음. 부분강제어봉 조기사용 시 잇점은 RG-4를 인출하기위해 사용되는 붕소주입 양을 줄일 수 있으며, 이후에 나타나는 지논축적 시 붕소 희석하는 양도 줄일 수 있다는 결론을 얻을수 있었다.
- ACEONED 프로그램 이용 최적 ASI 제어 분석 사례 1



[그림 3-1] 울진3호기 RPCS 동작 사례 ('08.2.29) 분석결과 그래프

→ 분석결과 ASI 최대 -0.0472에 도달하여 운영기술지침서 제한치 이내임

○ ACEONED 프로그램 이용 최적 ASI 제어 분석 사례 2



[그림 3-2] 울진6호기 RPCS 동작 사례 ('06.2.22) 분석결과 그래프

- ASI 최대 -0.16에 도달하여 운영기술지침서 제한치 이내이다.
- 200분이후 ASI 증가시 부분강 및 RG-5 인출로 평탄하게 유지가능함을 확인 할 수 있었다.

제 3절 RPCS 동작 후 원자로 출력유지

- RPCS 동작 후 부적절한 반응도 제어로 인해 지논 축적 시 원자로 출력 유지에 어려움을 겪었으며, 출력 감소는 ASI가 악화되는 방향으로 되어 ASI 제어의 어려움을 가중시키고, ASI를 제어하기 위해 제어봉을 삽입하여 출력이 감소되는 악순환을 야기하는 결과를 초래한다.
- 이때 정반응도 삽입은 붕소희석으로만 가능한데, 지논 축적과 ASI 제어를 위한 제어봉 삽입에 의한 부반응도를 극복하지 못하여 출력이 감소되게 된다.

따라서 RPCS 동작 후 제어봉 인출과정에서 부분강제어봉을 삽입하여 ASI를 사전 제어하고, 원자로출력을 35~55% 범위내에서 가능한 높게 유지하면 해결되는 것으로 분석되었다.

- 출력결손과 제어봉 제어능을 고려한 RPCS 동작 후 초기 출력은 35~70%이다.
- 비정상 절차서상 RPCS 동작 후 유지출력은 35~55%를 권고한다.
- RPCS 계통 절차서상 20% 이하는 급수전환시점으로 출력하한치 이다.
- 제어봉동작금지신호(AMI) 설정치 및 증기우회제어계통(SBCS) 용량은 55%이다.
- ACEONED 프로그램으로 시뮬레이션 결과(울진6호기 임계봉소농도 132 ppm) 원자로출력 40%유지시에도 ASI를 만족시킴을 확인 할 수 있었다.
- 지논에 의한 부반응도 인가시에는 충전유량을 최대로 하여 신속히 부반응도를 상쇄시켜야한다는 결론을 얻을수 있었다.

[참조 문서]

1. 운영기술지침서 : 한빛 2발전소, 울진 2발전소
2. 운영기술지침서 : 한빛 2발전소, 울진 3발전소
3. 핵설계보고서(NDR), 울진 3호기, 7주기/8주기/9주기
4. 출력급감발계통 계통설명서, 한빛 2/3발전소, 울진2/3발전소
5. ACEONED manual, 원전연료주식회사, 1998
6. 운전 및 정비경험보고서-노심말기 RPCS 동작 시 ASI 제어 :
울진6호기, 2006
7. 원자로출력급감발계통 강의안
8. ASI 특성 및 제어 강의안

감사의 글

논문을 마치고 ‘감사의 글’을 접하다 보내 지난 대학원 생활이 주마등처럼 떠오릅니다. 회사와 학교, 두 마리 토끼를 놓치지 않으려고 무던히도 발버둥 쳤던 제 모습과 그 모습에 지지와 격려를 아끼지 않으셨던 지인들과 더불어 감사에 마음으로 2015년 뜻깊은 한해를 마감하고 있습니다.

우선 바쁜 회사일정과 대학원일정을 위해 가정에 신경쓰지 못한점을 이해하며, 옆에서 묵묵히 응원해주던 아내에게 감사한 마음을 전합니다.

대학원 1년차부터 수업을 지도해주시고, 마지막학기 까지 지도교수님으로서 아낌없는 지도와 후원을 해주신 송종순 교수님에게 진심으로 존경과 감사에 마음을 올립니다. 더불어 회사일정과 대학원일정을 고려한 수업과 지도로 이끌어주셨던 정운관 교수님, 이경진 교수님에게 감사의 글로 존경하는 마음을 전합니다.

또한, 대학원관련 일이라면 언제든지 흔쾌히 승인해주시고, 길을 잃어 답답해 하고있을 때에 대학원선배이자 팀장님으로서 아낌없는 후원을 해주신 김한점 팀장님에게 감사한 마음을 이글로 대신합니다.

그리고 언제나 힘이 되어주고 아빠를 최고로 여기는 큰아들 도원이, 항상 애교어린 모습으로 가족을 즐겁게 해주는 둘째딸 가은이에게 항상 사랑하는 마음을 전합니다.

끝으로 항상 묵묵히 자식을 뒤에서 바라보시던 어머니, 오늘 제가있게 해 주시고, 버팀목이 되어주신 어머니께 이 논문을 바칩니다.

2016년 02월

유 문 철