

2022 추계원자력학회

Workshop : 경수로 부하추종운전 기술현황 및 현안

부하추종운전 적용을 위한 설계변경과 안전해석

2022.10.19

한국전력기술주식회사
원자로설계개발본부
안전해석실

송인호



한국전력기술주식회사
KEPCO ENGINEERING & CONSTRUCTION COMPANY, INC.

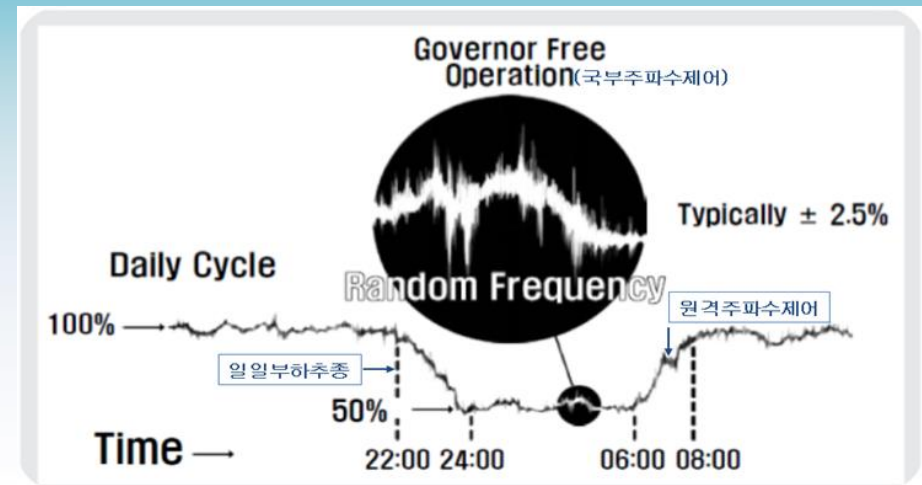
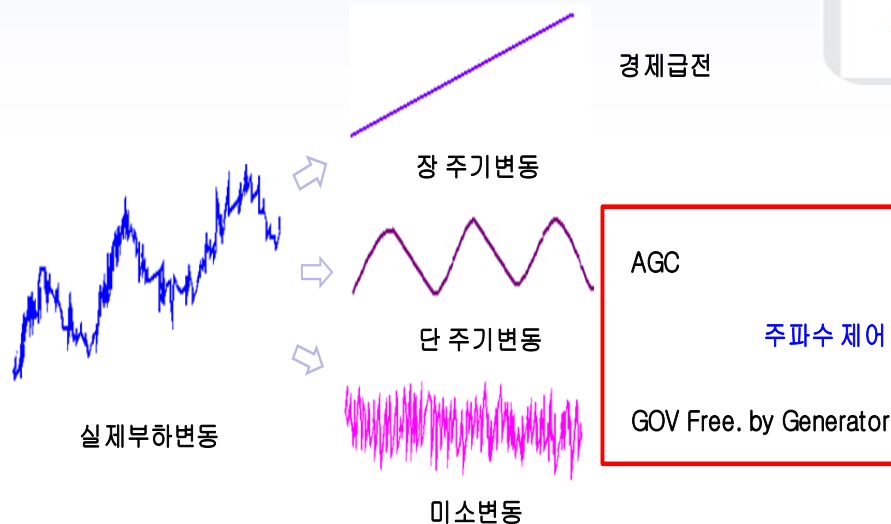
목 차

- I. 탄력운전의 종류와 요건
- II. 탄력운전을 위한 설계변경
- III. 탄력운전에 따른 안전해석 검토

I. 탄력운전의 종류와 요건

1. 탄력운전의 종류

◆ 탄력운전 (Flexible Operation)



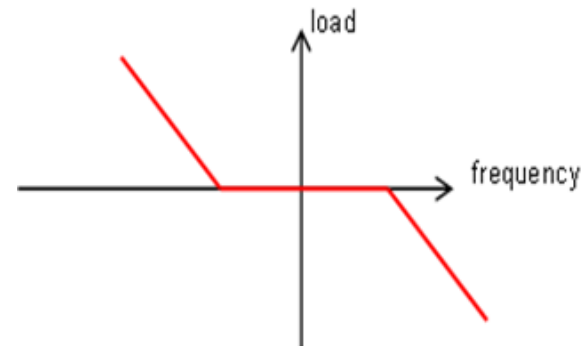
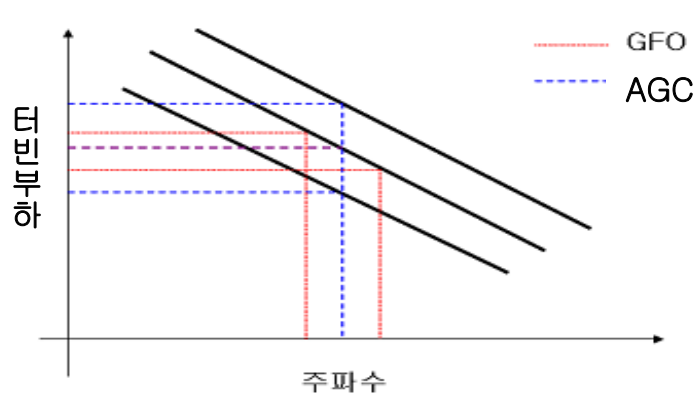
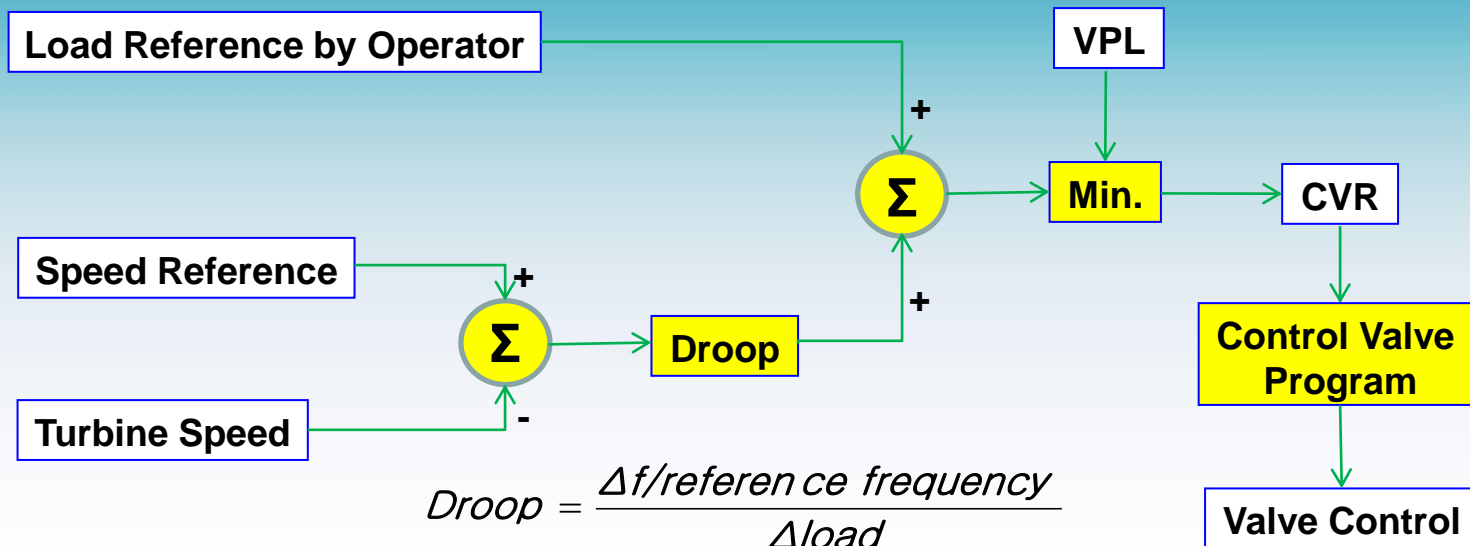
I. 탄력운전의 종류와 요건

1. 탄력운전의 종류

구분	명칭	출력변화형태의 예	터빈제어방식
(일일)부하 추종운전	<ul style="list-style-type: none"> Daily Load Follow Daily Load Cycling Scheduled and unscheduled Load follow 	(국내) 100-50-100(%) 14-2-6-2(hr)	Load reference 변화
주파수 제어운전	<ul style="list-style-type: none"> AGC (Automatic Grid Control) Remote Frequency Control Secondary Frequency Control 	약 5~10% 출력변화 하루 30 ~40회	Load reference 변화
	<ul style="list-style-type: none"> GFO (Governor Free Operation) Local Frequency Control Primary Frequency Control Frequency Sensitive Mode (FSM) (EUR rev. E) 	2~3% 출력변화 매우 작은 변화	Speed control 기능에 의한 자동조절

I. 탄력운전의 종류와 요건

2. 터빈부하변동 방식



I. 탄력운전의 종류와 요건

3. 탄력운전 요건

◆ 일일부하추종운전

- ❖ 주기말 90%까지
- ❖ 출력 20%까지 혹은 출력 50%까지
- ❖ 3%/min 출력변화율
- ❖ [국내] 100-50-100(%), 2-6-2-14(hr) 출력패턴

◆ 원격주파수제어운전

- ❖ 1%/min 출력변화율
- ❖ 봉소농도 조절 제외, 제어봉 조절에 의한 출력변화

◆ 국부주파수제어운전

- ❖ 제어봉 사용금지, 고유궤환효과 이용

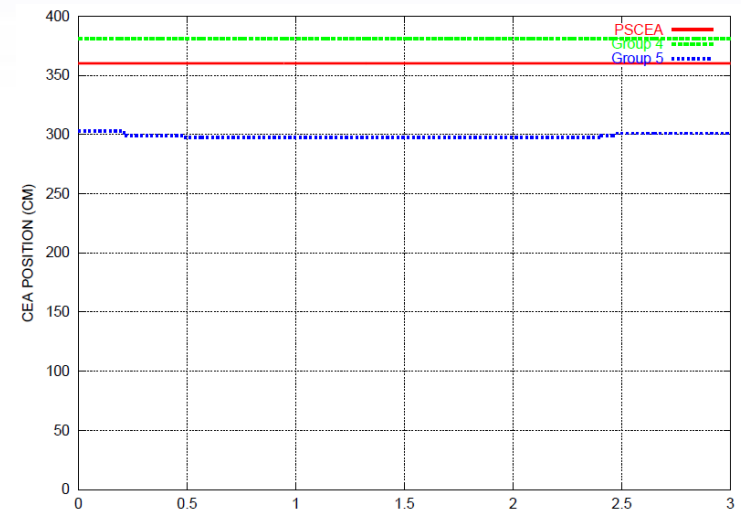
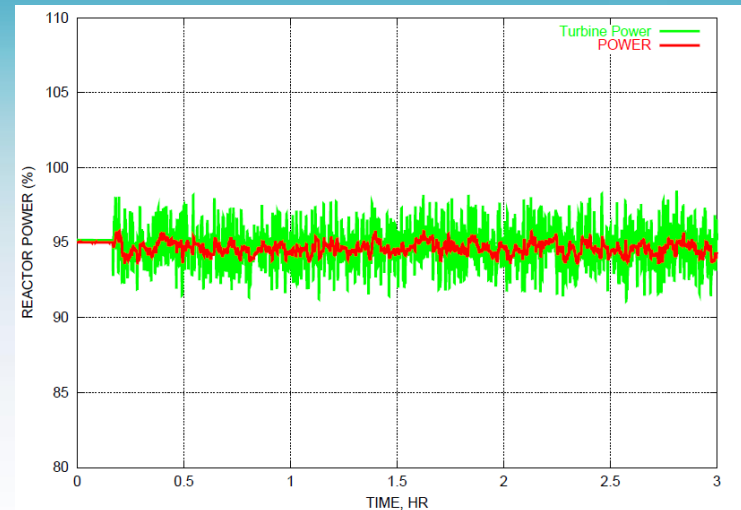
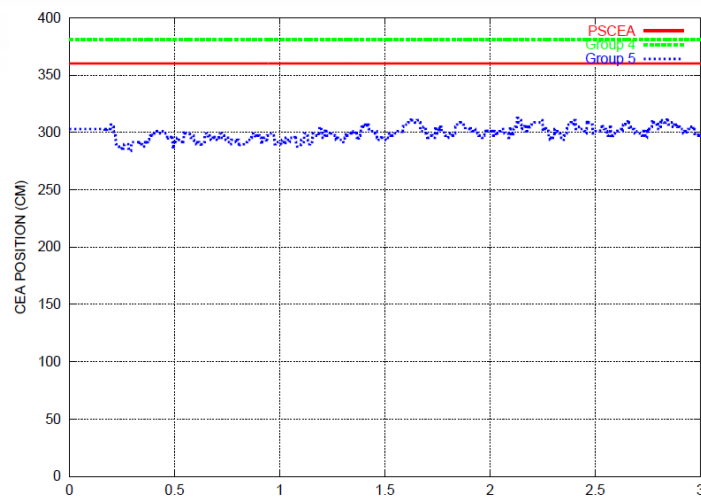
II. 탄력운전을 위한 설계변경

1. 국부주파수제어운전을 위한 설계변경

◆ RRS 설계변경

- ❖ 빈번한 제어봉 동작 완화
- ❖ Filter 설치 및 Filter 설정치 변경

RRS : Reactor Regulating System



II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ 일일부하추종운전을 위한 설계변경 방향

- ❖ 빠른 출력변화율 \Rightarrow 제어봉만으로 출력결손 (Power Defect) 보상 필요
- ❖ 출력분포
 - 제어봉삽입에 따른 출력분포 영향 최소화, or
 - 출력분포 자동 제어
- ❖ 제논반응도
 - 붕소농도 조절, or
 - 전출력조건 제어봉 삽입운전

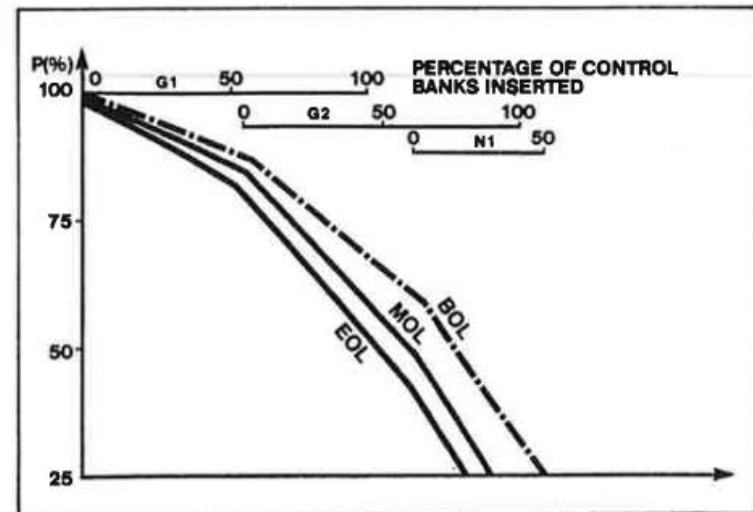
II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ 해외의 부하추종운전을 위한 설계변경

❖ Framatome Mode G 개념

- 제어봉 삽입에 따른 출력분포 영향을 최소화하기 위해 Gray bank 도입
- 출력 및 연소도에 따른 Power Defect bank 삽입
- 제논반응도는 붕소농도 조절로 보상
- T-avg 제어를 위한 bank로 fine tuning
- 단점 : 붕소사용량이 많음



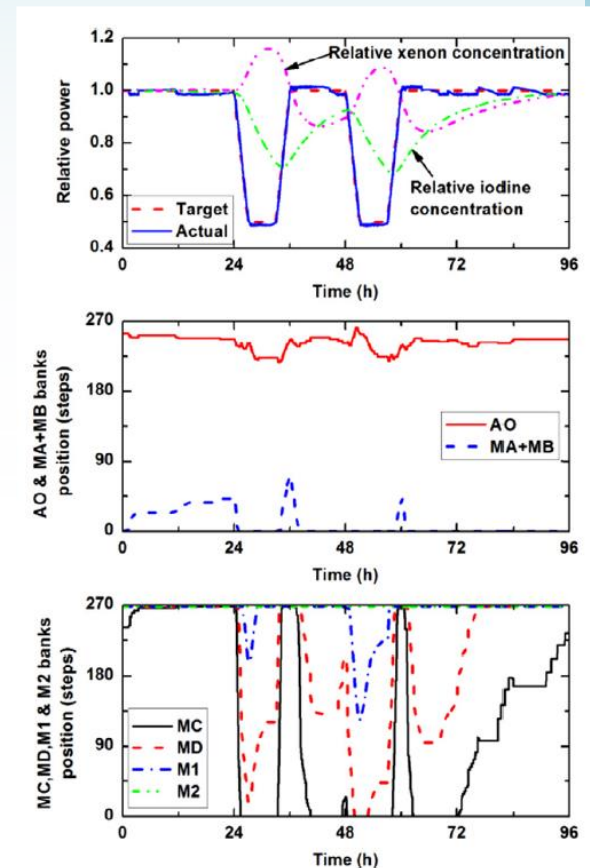
II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ 해외의 부하추종운전을 위한 설계변경 (계속)

❖ Westinghouse MSHIM 개념

- 반응도보상을 위한 M-bank
 - 16-gray RCCS : MA, MB, MC, MD
 - 12-black RCCS : M1, M2
- 출력분포제어를 위한 AO-bank
 - 9-black RCCS
- Gray bank가 많음
- 단점: 전출력조건 제어봉 삽입량이 많음



II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ OPR1000 및 APR1400 부하추종운전 운전 방식

- ❖ 제어봉 사용은 출력분포가 왜곡되지 않는 수준에서 삽입
 - 출력결손을 보상하기 위해 제어봉 삽입 시 Tech. Spec. 제어봉삽입제한치 위반 및 출력분포 제어 불가능
- ❖ 전반적인 반응도보상은 붕소농도 조절로 감당
- ❖ 출력변화시 붕소농도 조절이 필요하여 빠른 부하추종운전 불가능

◆ OPR1000 및 APR1400 부하추종운전을 위한 설계변경 평가

- ❖ Mode G 방식
 - 가능성 평가
 - 전면적인 노심 설계변경 필요
- ❖ MSHIM 방식
 - 정지여유도 (Shutdown Margin) 불만족
 - 적용 어려움

II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ 성능요건 만족을 위한 설계변경 방향

❖ P-bank

- 출력결손을 위한 제어봉 삽입
- 제어봉 삽입에 따른 출력분포 변화 5% 이내

❖ T-bank

❖ T-avg 제어

❖ 자동 출력분포제어는 사용하지 않음.

- 출력분포 하향을 원하면 봉소희석을 통해 T-bank 삽입 유도

❖ 봉소농도 조절은 수동

- 느린 응답특성으로 자동제어가 어려움.

II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ 성능요건 만족을 위한 설계변경 방향 [계속]

❖ 제어봉 설계

- ACEONED 코드 사용 : 임의로 제어봉가 변화 가능
- P-bank: P1, P2, P3, P4
- P-bank 및 T-bank 제어봉가(pcm)

	1 GWD/MTU		6 GWD/MTU		11 GWD/MTU		16 GWD/MTU	
P1	230	230	218	218	209	209	202	202
P1+P2	571	341	567	349	563	354	563	361
P1+P2+P3	1002	431	1072	505	1146	583	1250	687
P1+P2+P3+P4	2703	1701	2991	1919	3269	2123	3471	2221
T-Bank	1217		1277		1334		1373	

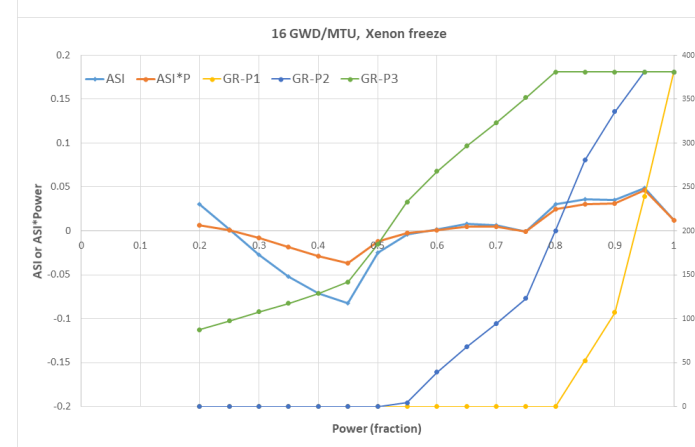
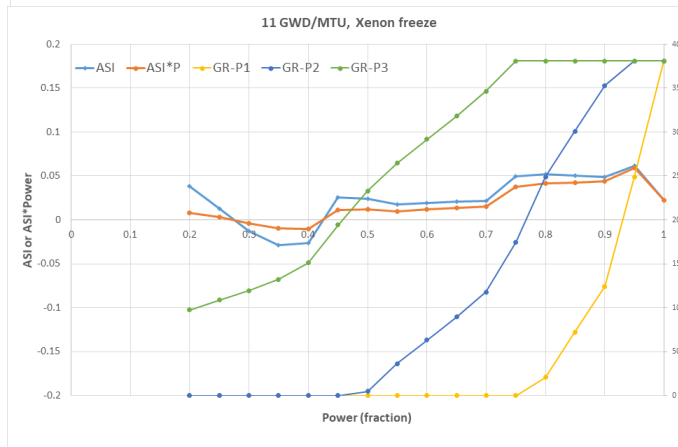
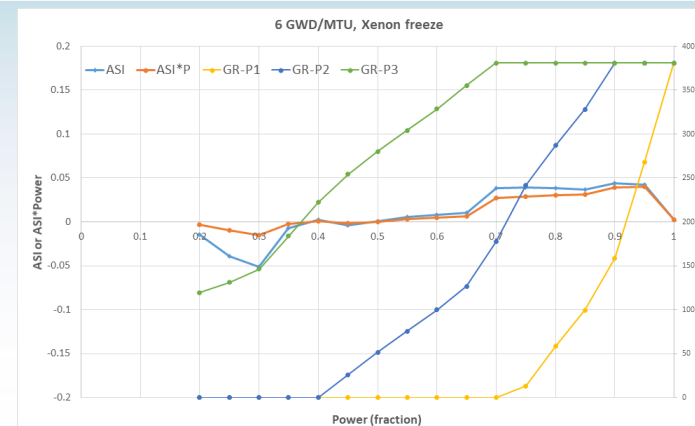
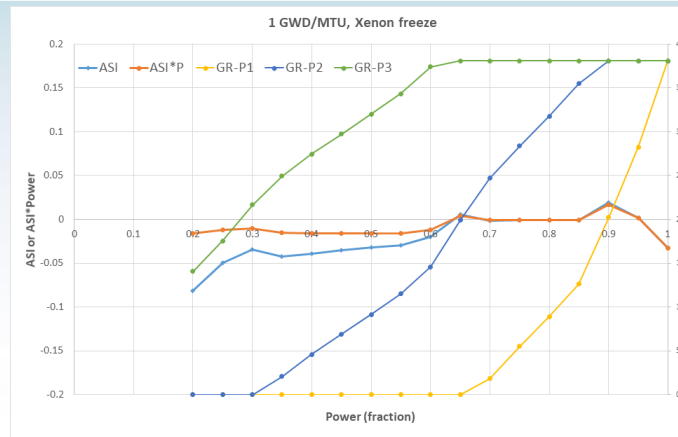
- P-bank overlap 40% 사용
 - 50% 이상 overlap은 출력분포가 전반적으로 하향

II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ 성능요건 만족을 위한 설계변경 방향 (계속)

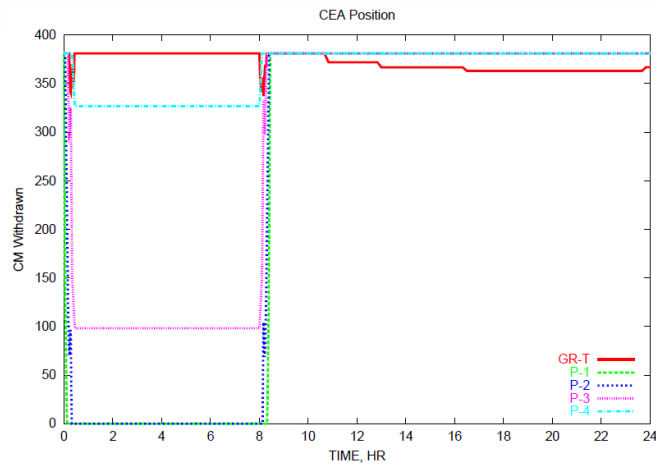
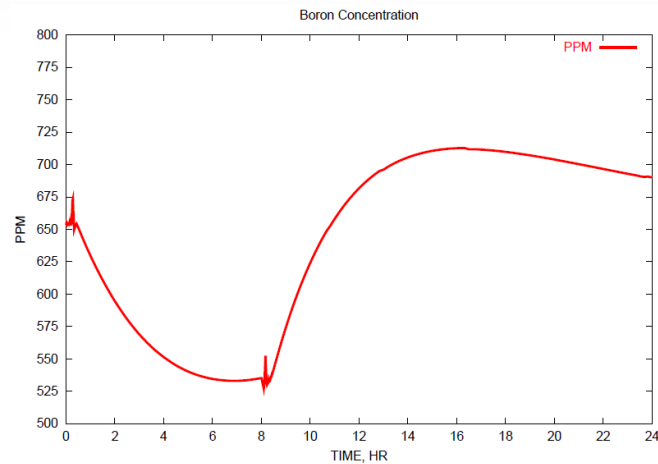
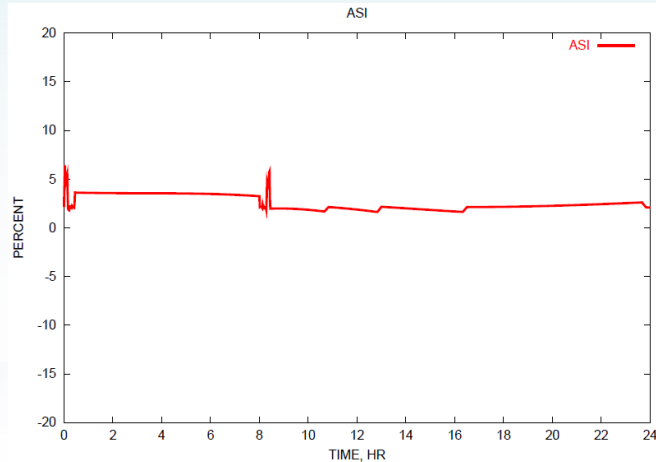
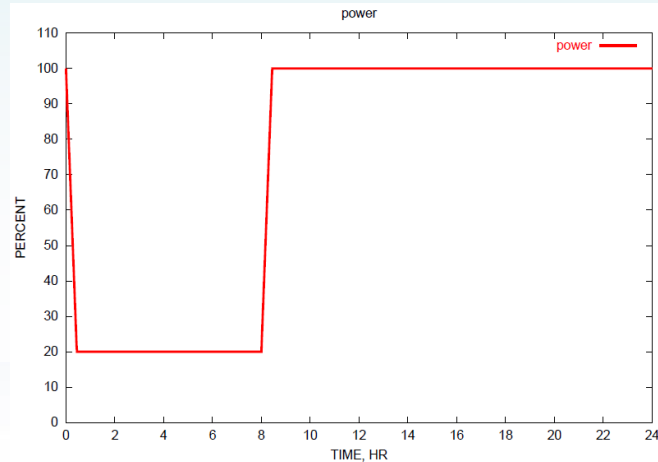
❖ 출력에 따른 제어봉 삽입과 출력분포 (Xenon freeze)



II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ 부하추종운전 평가 (11 GWD/MTU)



II. 탄력운전을 위한 설계변경

2. 부하추종운전을 위한 설계변경

◆ 설계변경 영향

- ❖ 제어봉 추가 설계 변경 필요
- ❖ 새로운 제어봉 운전개념 정립 필요
- ❖ 제어봉 제어논리 수립
- ❖ 안전해석
- ❖ 성능해석 (RPCS 제어봉 지정 필요)
- ❖ CPC 및 COLSS 설계변경
- ❖ 기타, ...



개념설계 연구 필요

RPCS : Reactor Power Cutback System

CPC: Core Protection Calculator

COLSS: Core Operation Limit Supervisory System

II. 탄력운전을 위한 설계변경

3. 원격주파수제어운전

◆ OPR1000 및 APR1400 현황

- ❖ PDIL 제한으로 $\pm 5\%$ 수준
- ❖ 제논반응도 보상
 - 제어봉 : 출력증가 시 ARO 도달 가능성(기존 출력복귀 불가) 및 출력감소 시 PDIL 위배 가능성
 - 붕소농도 : 출력분포에 악영향

◆ 부하추종운전을 위한 설계변경안 적용

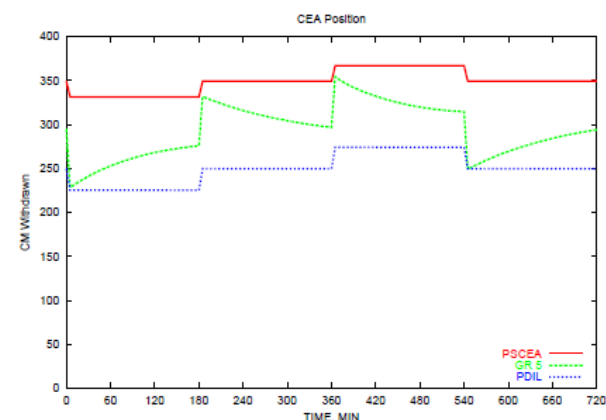
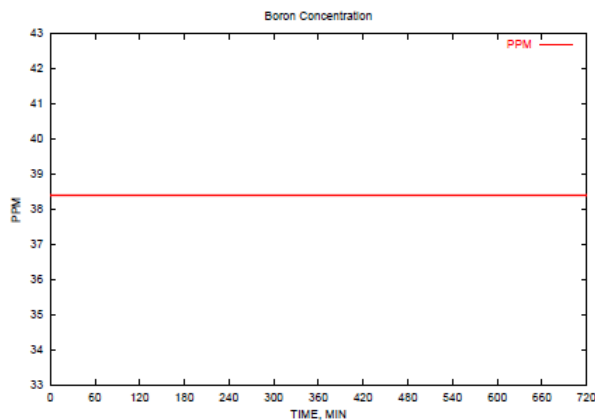
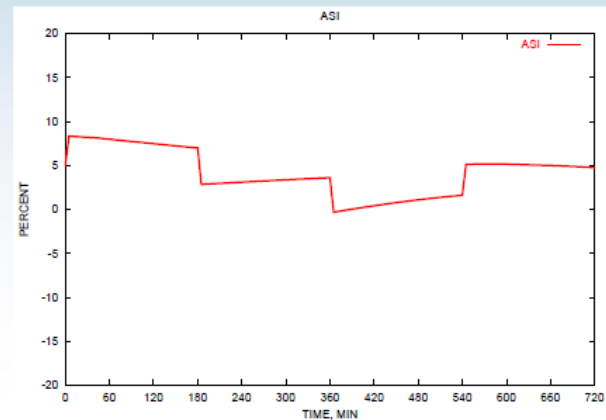
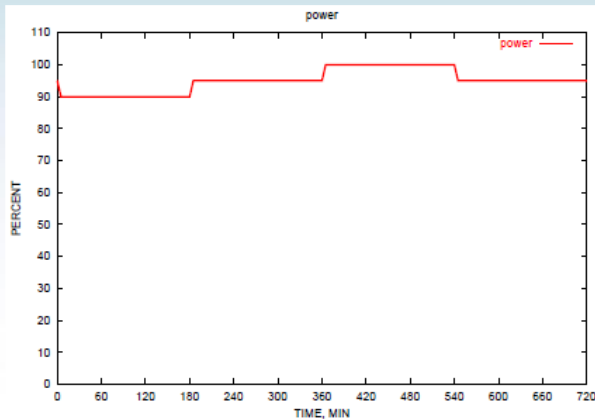
- ❖ 출력변화 : P-bank로 출력결손 보상
- ❖ 제논반응도 : T-bank로 보상
 - P-bank와 반대방향으로 움직임으로 출력분포에 유리
- ❖ $\pm 10\%$ 원격주파수제어운전 가능

II. 탄력운전을 위한 설계변경

3. 원격주파수제어운전

◆ OPR1000 및 APR1400 현황

❖ 제논반응도 제어봉으로 보상

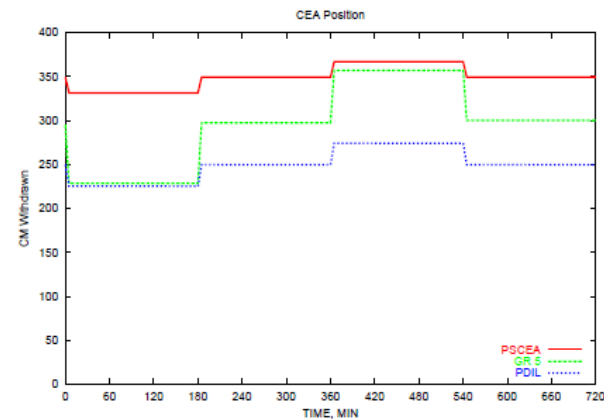
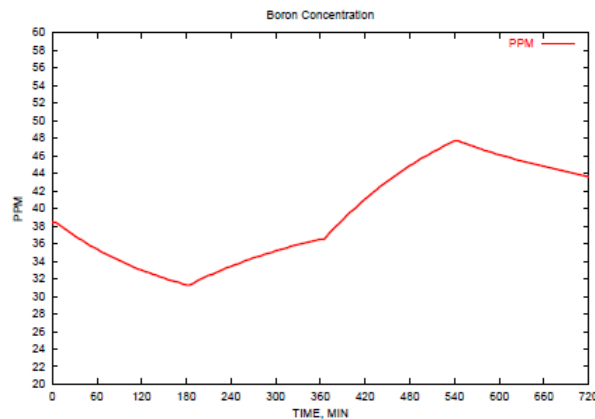
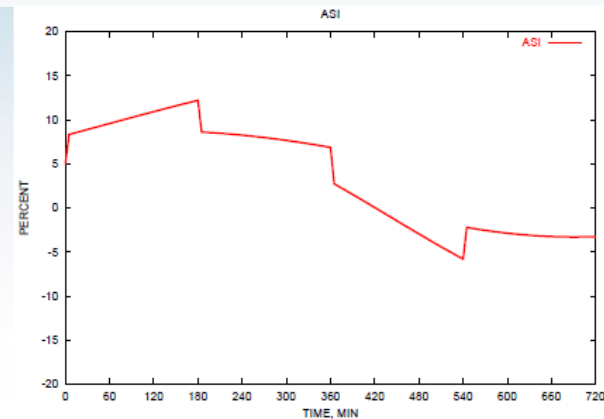
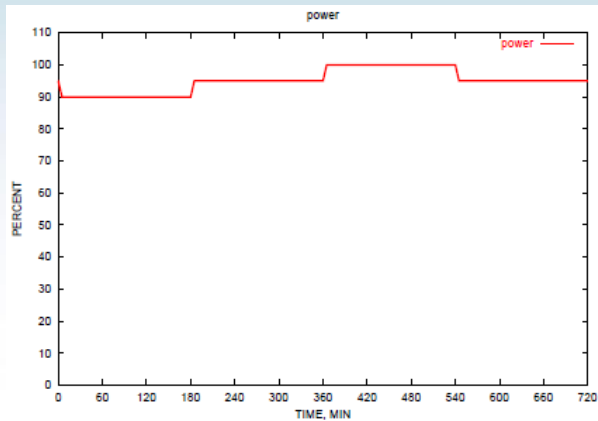


II. 탄력운전을 위한 설계변경

3. 원격주파수제어운전

◆ OPR1000 및 APR1400 현황

❖ 제논반응도 붕소농도로 보상

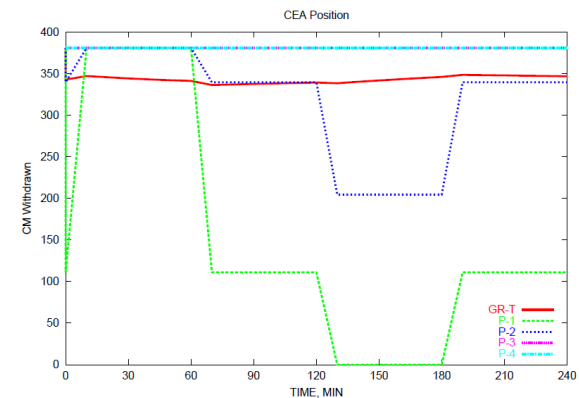
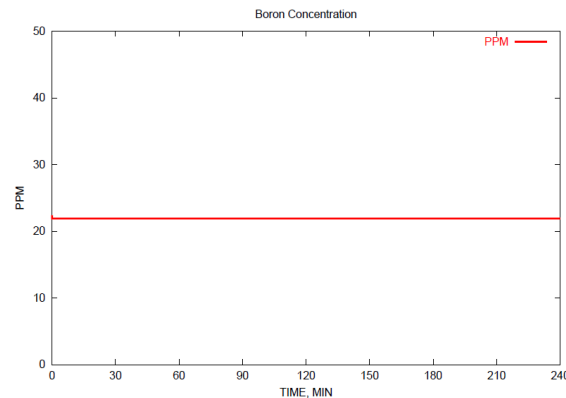
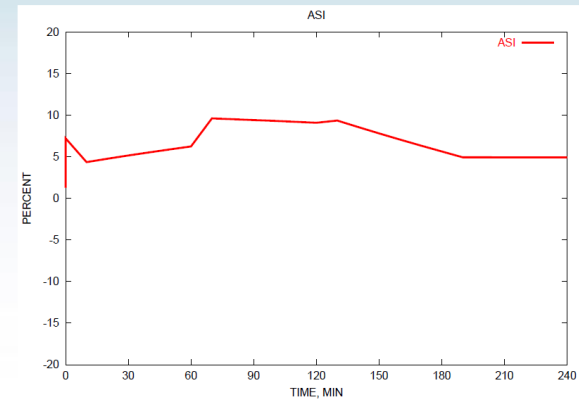
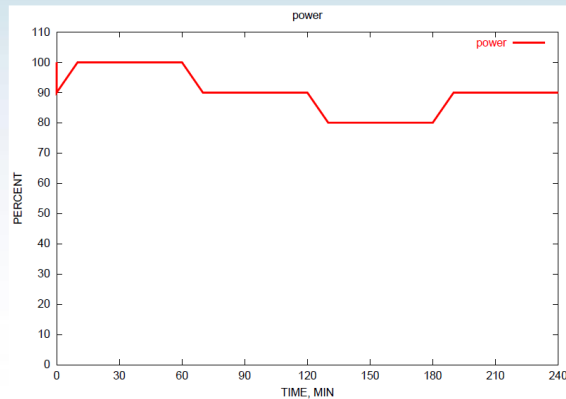


II. 탄력운전을 위한 설계변경

3. 원격주파수제어운전

◆ 부하추종운전을 위한 설계변경 적용

❖ $\pm 10\%$ 원격주파수제어운전 가능



II. 탄력운전을 위한 설계변경

4. PSCEA 자동운전 적용

◆ PSCEA 자동운전 배경

- ❖ 노심설계 변경이 아니므로 근본적인 부하추종운전 능력 확대는 아님
- ❖ 운전 편이성 측면에서 PSCEA 자동운전 구현

◆ PSCEA 삽입 평가

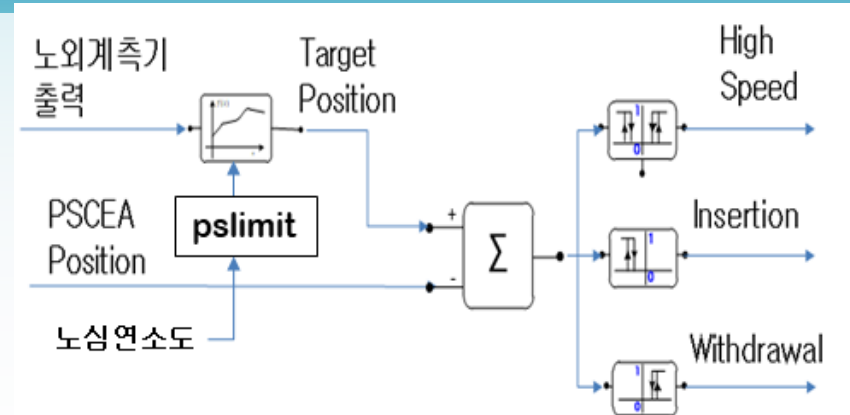
- ❖ 100-50-100(%), 2-6-2-14(hr) 출력패턴을 기준으로 평가
- ❖ 주기초 50% 출력조건에서 PSCEA 삽입량이 커지면 출력분포 하부편향이 커짐
- ❖ 주기말 50% 출력조건에서 PSCEA가 완전 삽입되면 상부편향이 커짐
- ❖ 노심연소도에 따라 삽입 제한 (pslimit)

II. 탄력운전을 위한 설계변경

4. PSCEA 자동운전 적용

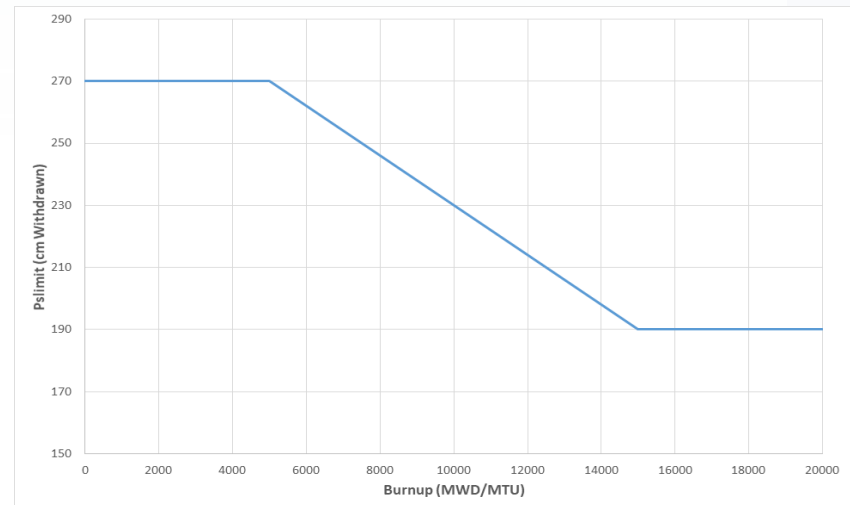
◆ PSCEA 자동운전 논리

- ❖ 노심연소도를 이용하여 pslimit 생산
- ❖ 출력과 pslimit을 이용하여 PSCEA target 위치 설정
- ❖ PSCEA 위치와 target 위치 편차를 이용하여 PSCEA 삽입/인출 및 속도 생산



◆ PSCEA 자동운전 ON/OFF

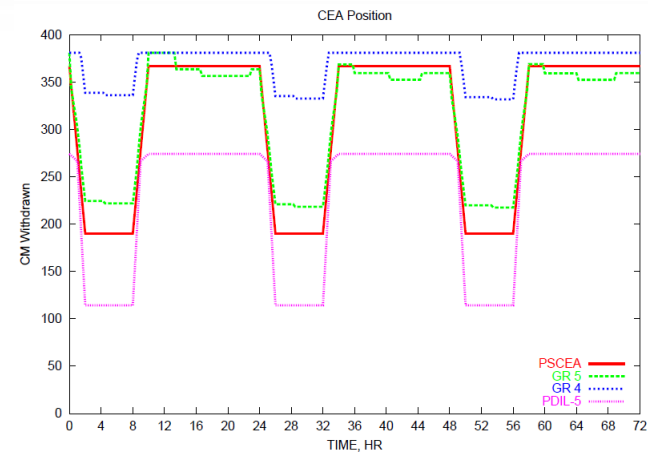
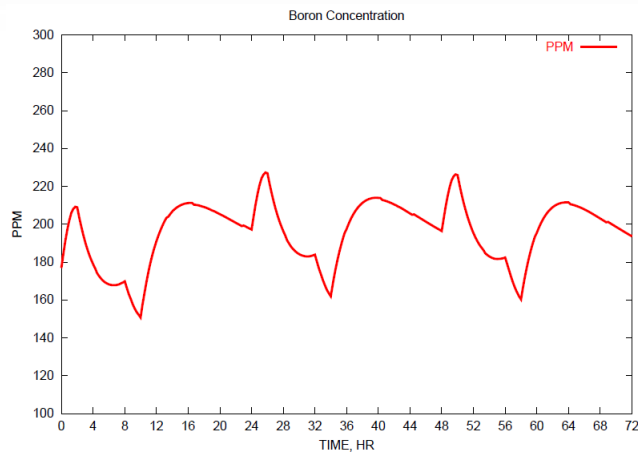
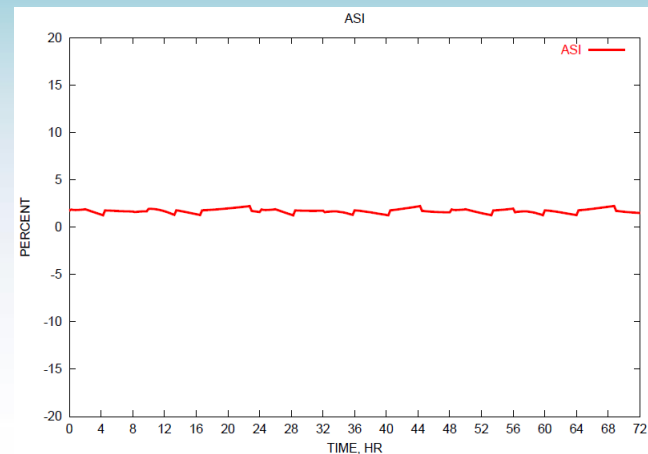
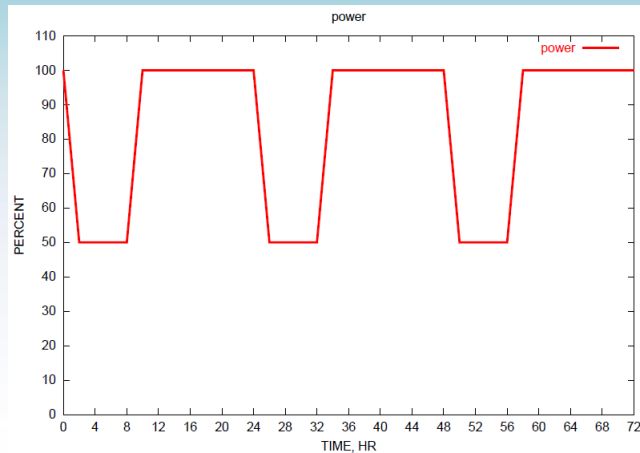
- ❖ 운전원에 의한 ON
- ❖ 자동 OFF 기능
 - 저출력
 - 부하상실과 같은 큰 과도사건



II. 탄력운전을 위한 설계변경

4. PSCEA 자동운전 적용

◆ PSCEA 자동운전 논리 분석 예 (주기말)



III. 탄력운전에 따른 안전해석 검토

1. 탄력운전에 따른 안전해석 영향 요소

◆ 안전해석 초기조건인 유효성

- ❖ 탄력운전에 따른 출력 및 계통 변수 변화
- ❖ 설계기준사건 및 설계기준초과사건 검토

◆ 노심연소 변화에 따른 안전해석 영향

- ❖ 현 핵설계자료는 제어봉 인출 조건에서 노심연소 수행
- ❖ 제어봉 삽입 운전으로 노심의 연소 변화에 따른 핵설계자료 변화 검토
- ❖ 핵설계자료 변화에 따른 안전해석 영향 검토

III. 탄력운전에 따른 안전해석 검토

2. 안전해석 초기조건의 유효성

◆ 탄력운전은 정상운전

- ❖ 운전변수가 Tech. Spec. LCO를 위배하지 않아야 함.
- ❖ LCO 이내이므로 설계기준사건은 영향 없음
- ❖ 설계기준초과 사건
 - CCF 제외 사건
 - 큰 영향 없음
 - CCF 사건
 - 현재 전출력 조건 분석
 - 저출력조건 영향 큰 사건 평가
 - 허용기준 만족

LCO : Limiting Condition for Operation

CCF : Common Cause Failure

III. 탄력운전에 따른 안전해석 검토

3. 노심연소 변화에 따른 안전해석 영향

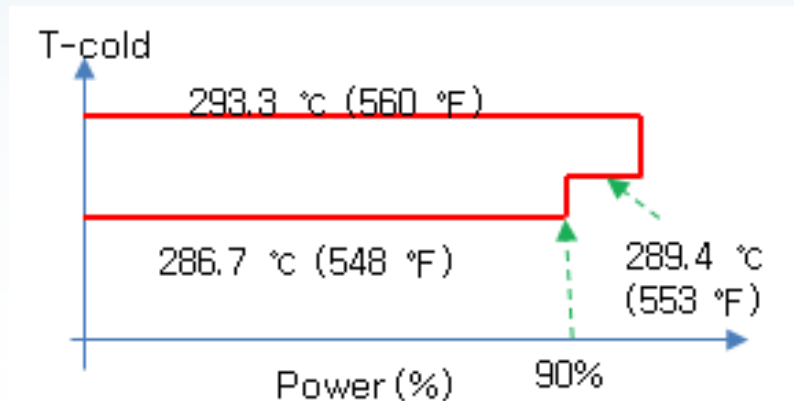
- ◆ 제어봉 삽입 노심 연소에 따른 핵설계자료 생산
 - ❖ 전반적인 노심 파라미터 변화는 미미함
 - ❖ 제어봉 삽입 운전에 따라 국부적인 영향 요소가 있는 사건 정량 평가
 - 단일제어봉 인출
 - 제어봉 이탈

III. 탄력운전에 따른 안전해석 검토

4. 탄력운전을 위한 저온관 LCO 변경 평가

◆ APR1400 저온관 온도 LCO

- ❖ 출력 90% 이상에서 허용 운전범위가 좁아짐.



- ❖ 일일부하추종운전 시 운전원의 붕소농도 제어의 어려움
 - 제어봉 사용 제한 시
 - 제어봉 인출 조건 및 삽입제한치 근접 시
 - 출력분포제어를 위한 제어봉 삽입/인출이 제한될 때

III. 탄력운전에 따른 안전해석 검토

4. 탄력운전을 위한 저온관 LCO 변경 평가

◆ APR1400 저온관 온도 LCO (계속)

- ❖ 국부주파수제어운전 시 주기초 $\pm 3\%$ 요건 불만족
 - 요건 만족을 위해 RRS deadband 확장 필요
 - $\pm 2^{\circ}\text{F} \Rightarrow \pm 3^{\circ}\text{F}$
 - 저온관 온도 LCO 확장이 요구됨
- ❖ 빠른 부하변동을 수용 불가능
 - 원격주파수제어 및 일일부하추종운전 빠른 부하변동을 수용 불가능
- ❖ 출력 90% 이상 조건도 저출력과 동일한 저온관 온도 LCO 적용 필요

III. 탄력운전에 따른 안전해석 검토

4. 탄력운전을 위한 저온관 LCO 변경 평가

◆ 저온관 온도 LCO 확장 안전해석 영향

- ❖ 대부분 안전해석은 높은 저온관 온도가 제한적
- ❖ 제한사건 : 과압사건
 - 낮은 저온관 온도 \Rightarrow 증기발생기 압력 감소 \Rightarrow 주증기안전밸브 개방시점 지연
- ❖ 평가 대상 사건
 - LOCV
 - MSIV 닫힘

LOCV : Loss of Condenser Vacuum

MSIV : Main Steam Isolation Valve

III. 탄력운전에 따른 안전해석 검토

4. 탄력운전을 위한 저온관 LCO 변경 평가

◆ 제한사건 평가 결과

❖ CESEC 코드와 SPACE 코드 차이

- CESEC 코드 : 증기배관의 체적 미고려
- SPACE 코드 : 증기배관의 체적 고려
- 증기배관 체적이 적은 MSIV 닫힘사건 분석

코드	사건	기존	확장
허용기준		2750 psia	
CESEC 코드	LOCV	2747	-
SPACE 코드	LOCV	2723.85	2729.39
	MSIV 닫힘 (0초)	-	2743.07
	MSIV 닫힘 (2.5초)	-	2688.35

◆ SPACE 코드 적용 시 저온관 온도 LCO 확장 가능



감 사 합 니 다.