2022년 한국원자력추계학술발표회(창원컨벤션센터)
워크숍 C : 경수로 부하추종운전 기술현황 및 현안

SMR 부하추종능 평가 및 부하추종 고려 노심장전모형 최적화 설계

박동규

2022. 10. 19

FNC 주|미래와도전
FNC Technology Co., Ltd.

CONTENTS

1 개요

2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

5 결론 및 제언

1 개요

1 개요

배경지식

일일 부하추종 운전 (Daily Load-Follow Operation)

- 미리 예측된 전력 수요의 주기적 변화(Daily, Weekly, Seasonal)에 대하여 정해진 유형에 따라 발전소의 출력 변동을 요구

주파수 제어 운전 (Frequency Control)

- 전력망의 주파수가 정격 주파수를 유지하도록 발전소의 출력을 매순간의 수요 변화에 맞추기 위한 운전

출력변동 확보 능력 (Spinning Reserve)

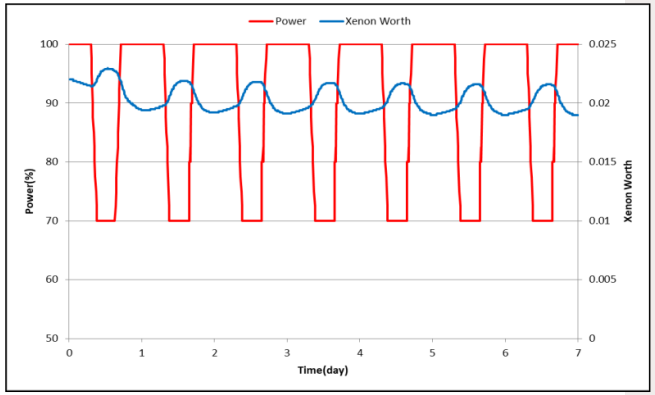
- 예상치 못한 전력망의 과도 상태에 대한 발전소의 빠른 출력 변화 능력

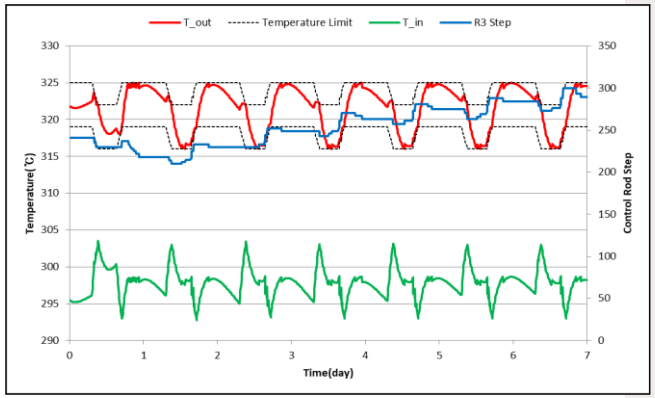
부하 급감발 능력 (Load Rejection Capability)

- 갑작스럽게 부하가 상실되었을 경우 노심 및 계통이 원자로 정지 및 안전 밸브 등의 작동을 일으키지 않고 출력을 감발할 수 있는 능력

전력망 요구사항

- 전력공급의 안전성 : 설비 고장이나 사고에서도 전력공급의 중단 없음
- 전력공급의 연속성 : 매순간 전기사용을 위한 무정전 공급
- 전력공급의 실시간성 : 수요와 공급의 일치
- 전력공급의 경제성 : 비용측면에서 경제적 발전





SMR의 일일부하추종운전 해석 결과 예시

1 개요

발표 내용 및 결론

발표에 앞서

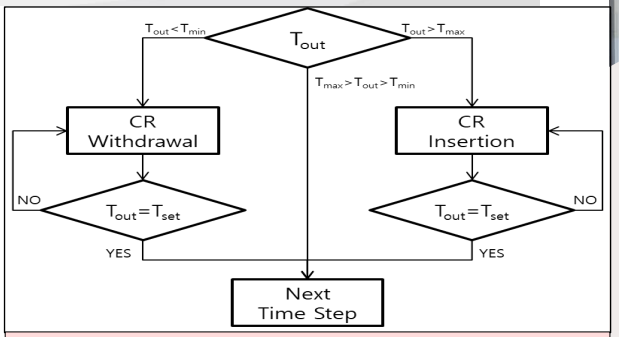
- Q1. 부하추종을 고려한 설계는 무엇인가?
  - 노심, 계통, 기계적 건전성, 핵연료 성능 및 안전성
- Q2. 부하추종능은 설계 or 설계 후 제어전략에 관한 사항인가?
  - 설계고려 사항 (기능충족), 제어전략 (성능향상, 기능구현)
- Q3. 부하추종능을 갖추고 있다는 점은 어떻게 평가하여야 하는가?
  - M&S 수행 필요
- Q4. 설계완료 원전의 부하추종 성능 향상 방법은 무엇인가?
  - 노심 : 제어전략별로 부하추종 성능지표에 대한 비교 가능

오늘 발표는

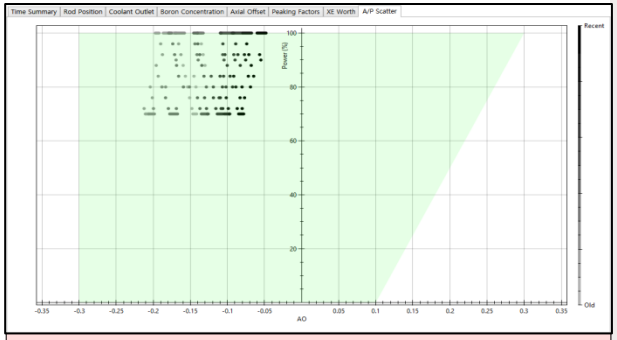
- 1. 부하추종을 위한 제어 알고리즘 개선 내용 소개 : 부하추종 성능 향상
- 2. 설계완료 국내 중소형원자로의 부하추종 시뮬레이션 수행 결과 소개
- 3. 탄력운전 및 부하추종 시 노심장전모형 최적화 결과 소개

결론적으로

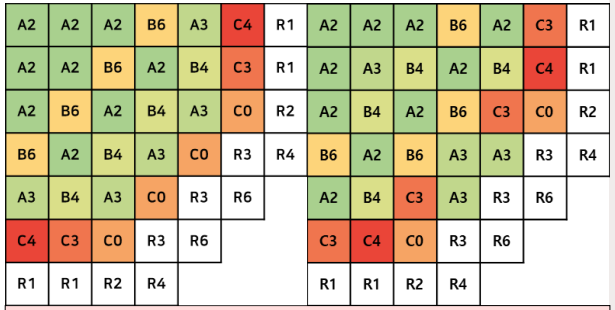
- 1. 국내 SMR은 적어도 노심 측면에서는 부하추종능을 갖추고 있다.
- 2. 제어전략에 따라 부하추종 성능은 변하게 된다.
- 3. 부하추종 시뮬레이션 분석 결과가 설계에 반영되어야 한다.



SMR의 출력제어 알고리즘 예시



부하주종 평가에 따른 AO 변화 예시



부하추종 고려 최적장전모형 생산 예시

1 개요

부하추종 관련 연구 소개

위탁과제명† : 혁신 SMART 부하추종 전략 및 AI 기반 노심연구 ('20.04 ~ '22.12, 총 2억원)

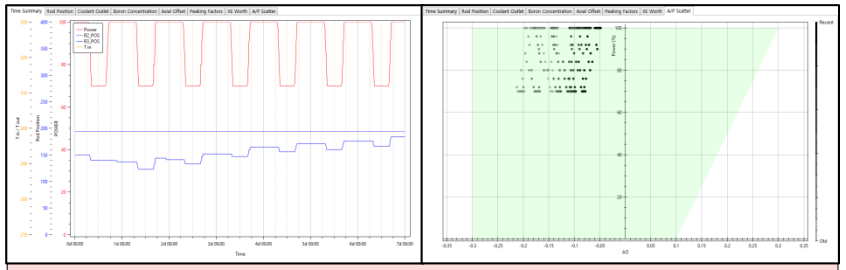
- 설계완료된 국내 중소형원자로가 노심(과 계통) 측면에서 부하추종능을 갖추고 있는지를 확인
- 부하추종 성능 향상을 위한 효과적인 부하추종 전략(제어알고리즘 등)을 수립
- 부하추종이 고려된 노심 핵연료집합체 장전모형 자동 생산 알고리즘 도출

주요 성과물

- LF_TRACER : SMR의 부하추종능 평가 프로그램
- A_GENRE-LP†† : 모의냉각법 기반의 부하추종 고려 노심장전모형 최적화 프로그램
- GENRE-CNN : CNN(Convolutional Neural Network) 기반 장전모형별 노심특성인자 평가기

추가 개발 프로그램 (진행중)

- GENRE-FA : 부하추종 고려 (BP 배치, 연료농축도) 핵연료집합체 최적화(생산) 프로그램
- GENRE-RCD : A_GENRE-LP와 GENRE-FA 연계 부하추종 고려 노심최적화 프로그램



LF_TRACER을 통한 부하추종능 평가 예시

GENRE-CNN을 통한 임의의 장전모형 특성인자 예측결과†††

구분		평균오차	최대오차	3% 초과	1% 초과
2D	Fr	0.43%	3.91%	0.06%	6.40%
	주기길이	0.96%	3.41%	0.70%	41.30%
	붕산농도	0.61%	5.98%	0.02%	14.20%
	MTC	0.52%	4.33%	0.04%	10.05%
3D	Fq	1.73%	10.92%	1.34%	28.4%

† 총괄 (SMART혁신기술개발, 강한옥) – 세부(혁신 SMART 노심 및 자율운전 요소기술 개발, 구본승)
†† GENRE-LP : SMART 노심장전모형 최적화 프로그램 (2011 개발완료)
††† 박기범 외, "Concept of Advanced Core Optimizer in Consideration of Load Following Operation with Simulated Annealing Algorithm," 2022년 한국원자력춘계학회 논문집.

2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

부하추종 요건 및 제어수단 별 요건

EPRI† 요건 (SMR)

- 24시간 출력 변동 운전 가능 : 100% - 20% - 100%
- Ramp 출력 변동 : 시간당 40%
- 원자로 주기의 90% 이내에서 부하추종능 보유
- Step 출력 변동 : 10분 안에 20%
- 일일부하추종운전 및 주파수제어

URD Requirement	Rev.12 Description	Rev.13 (SMR) Description
3.4.1.1	24 hour load cycle: 100% → 50% → 100%	24 hour load cycle: 100% → 20% → 100%
3.4.1.1	Ramp rate of 25% per hour	Ramp rate of 40% per hour
3.4.2.1	Capable of automatic frequency response	Capable of automatic frequency response
3.4.3	Step change of 20% in 10 minutes	Step change of 20% in 10 minutes

Pre-Planned
100 - 70 -100% Power
- >12 hour duration - daily basis
- Ramp rate 0.5-1% per minute

Most frequent mode of FPO in the US to manage high renewable integration

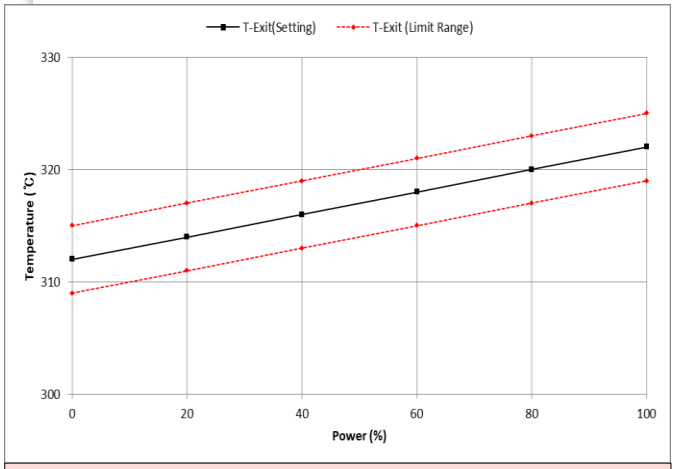
Pre-Planned
50% Power
- 2-8 week duration
- Seasonal

Extended low power operation under consideration by some plant operators

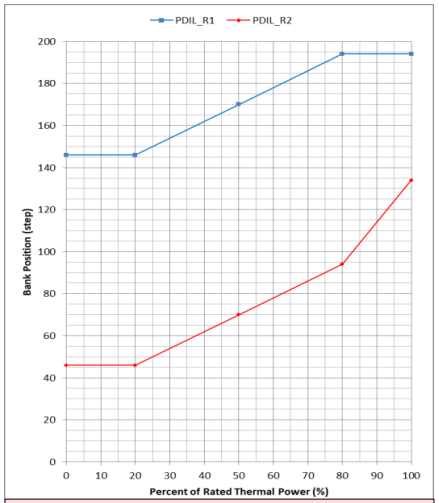
Extreme
100-30-100%
- Ramp rate 2-5% per minute
- Response to Grid - short notice, no defined duration

EXTREME - Response to grid transient; requires modification to plant and design basis (R&D needed)

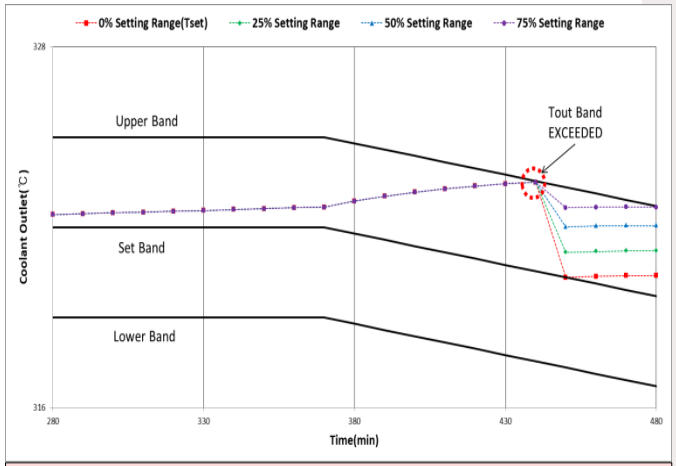
설계요건 및 제어전략(현행)††



출력준위별 노심출구온도 허용범위



제어봉 삽입한계(가정)



제어전략(현행)

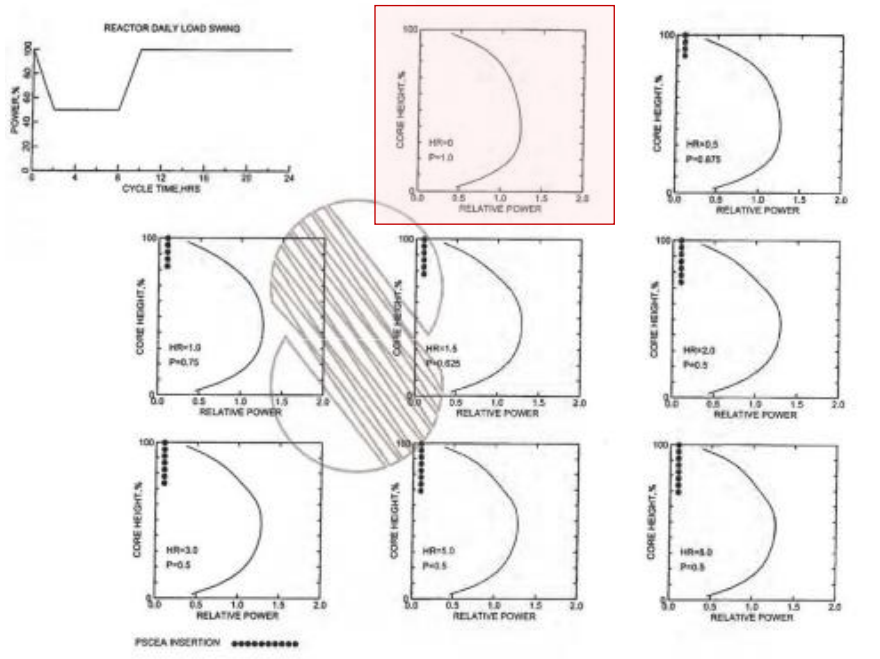
† Andrew Sowder et. al., "Electric Power Research Institute : Expanding Concept of Nuclear Flexibility for the Current Fleet and the Next Generation of Advanced Reactors," EPRI.
†† 송재승 외, "냉각재 출구온도 제어방식의 SMART 노심 일일부하추종운전 능력 평가," 2001 KNS 춘계학술대회 논문집

2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

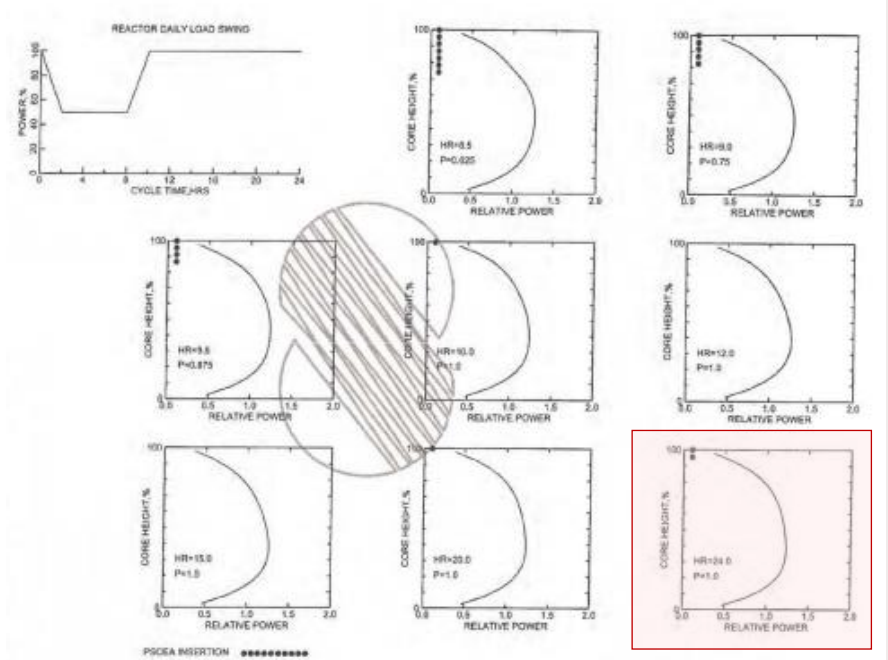
부하추종에 대한 노심측면에서의 기능평가 및 성능평가 방법

부하추종 기능(Capability) 평가 방법

- 출력변화요구에 대해 "어떤 수단"(붕산, 제어봉, 입구온도)으로 "어떻게"(전략) 반응도 삽입/인출을 할 것인가?
- 운전기간동안 노심해석을 위한 원자로 상태는 출력이 동일하다면 같은가?
  - 부하추종능 평가를 위한 대표상태를 정의하여 노심상태를 평가하면 해당 원자로는 부하추종능을 갖추고 있는 것인가?
  - 신고리1,2호기 최종안전성분석보고서(공개용) 내용 발췌
    - 일일부하추종운전모사(주기초, 100-50-100% 출력) : 동일 출력일 때 원자로의 상태(제어봉 위치 등)는 동일하지 않다.
- 접근방법 : 임의의 원자로 상태에 대하여 임의의 출력변동을 고려하였을 때 반응도 삽입/인출이 가능한지 확인하자.



[0-8]시간 모의



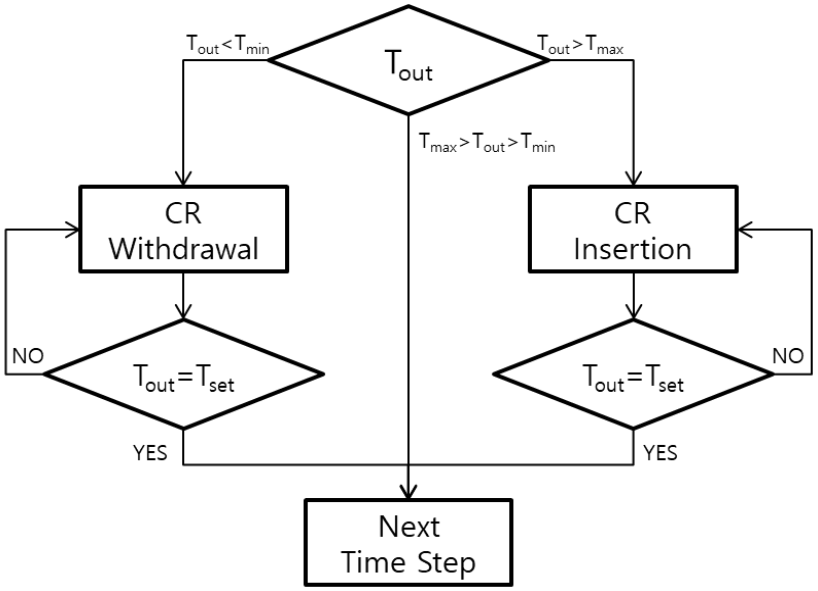
[8-24]시간 모의

2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

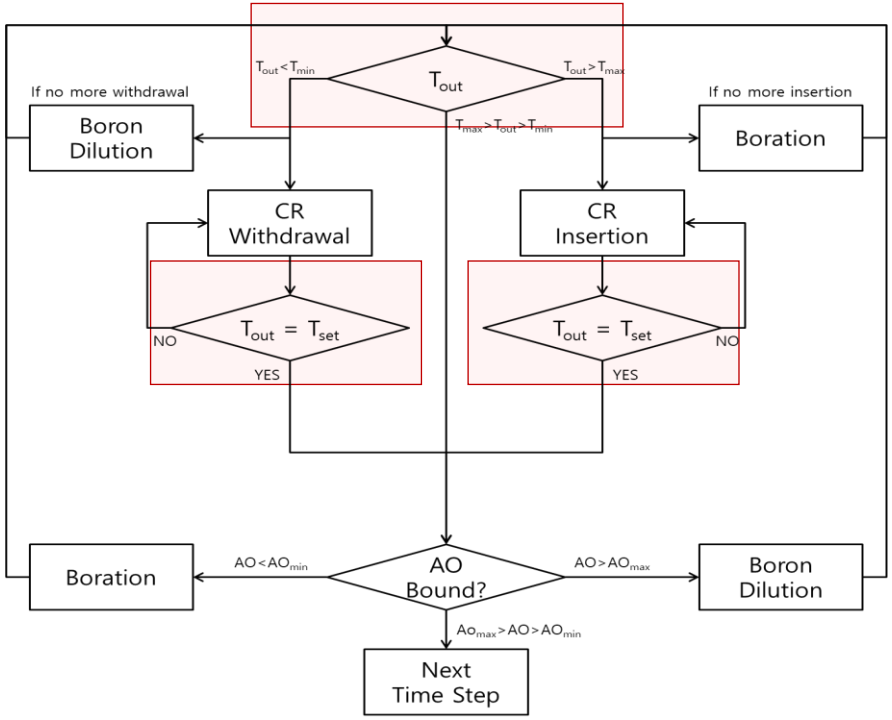
부하추종에 대한 노심측면에서의 기능평가 및 성능평가 방법

부하추종 성능(Performance) 평가 방법

- 접근방법: 부하추종 기능을 갖췄다면, 성능지표를 제시하여 성능지표를 최적화하는 제어전략을 수립하자.
  - 성능지표 : 제어봉 이동거리 최소화 , 제어수단 활용 횟수 최소화, 붕산을 통한 제어 최소화
  - 참고 : 붕산 주입/희석으로는 시간지연으로 인해 AO를 제 시간에 제어할 수 없음. AO 마진을 고려한 해석 수행 필요
- 제어전략 개선 및 제어파라미터 민감도 평가
  - 출구온도 허용경계 및 설정범위에 따른 민감도 평가
    - 출구온도 허용경계 : ±3℃ (Tmin, Tmax)
    - 설정값 : Tset



기본 제어전략



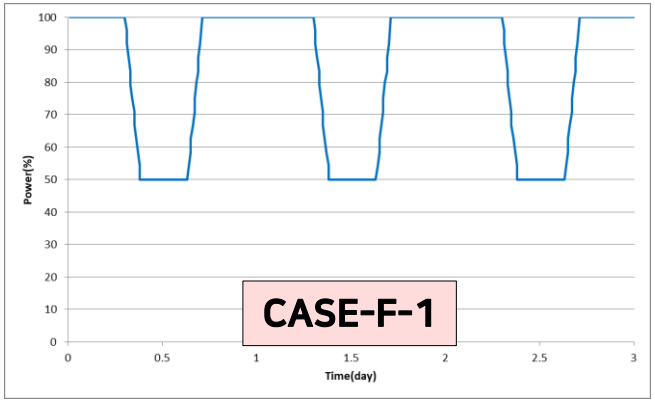
개선 제어전략

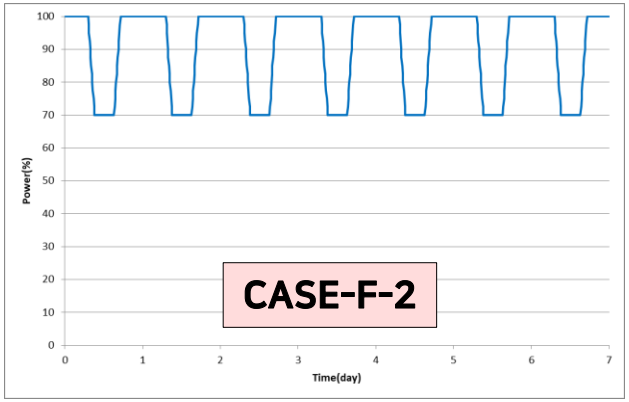
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

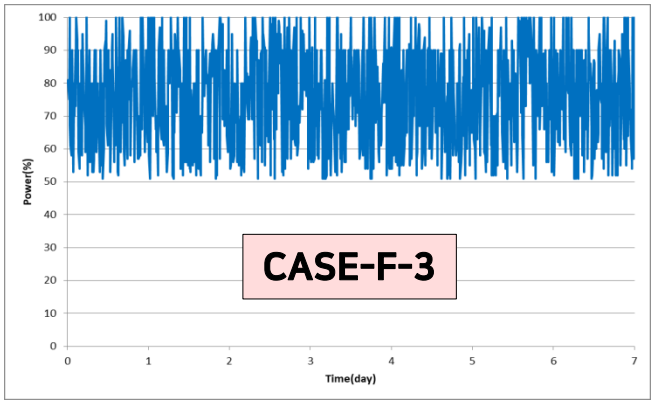
SMR의 부하추종 기능 평가

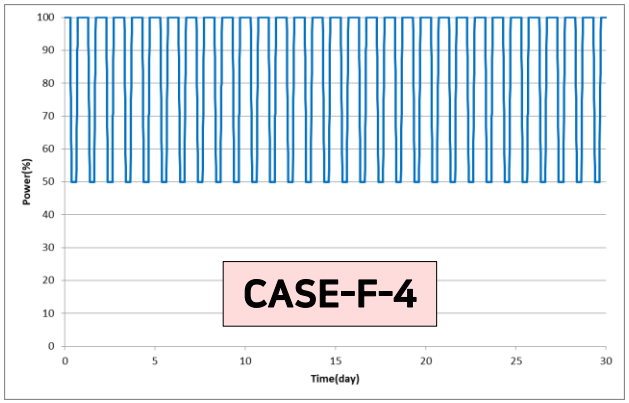
기능 평가 시나리오

- CASE-F-1 : 100%-50%-100% 출력 변동 72시간 부하추종 평가
- CASE-F-2 : 100%-70%-100% 출력 변동 7일 부하추종 평가
- CASE-F-3 : 100~50% 사이 임의의 출력 7일 부하추종 평가 (10분마다 임의출력 생성, 그 사이 출력은 선형)
- CASE-F-4 : 100%-50%-100% 출력 변동 30일 부하추종 평가(노심 연소도 고려 매일 CBC1.5 ppm 감소)









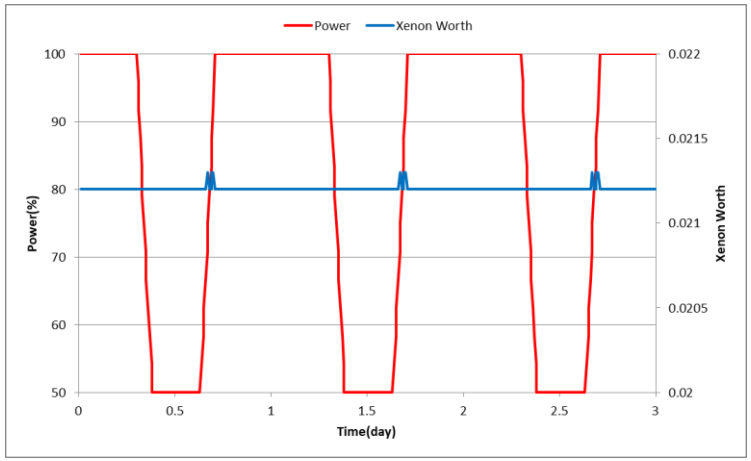
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

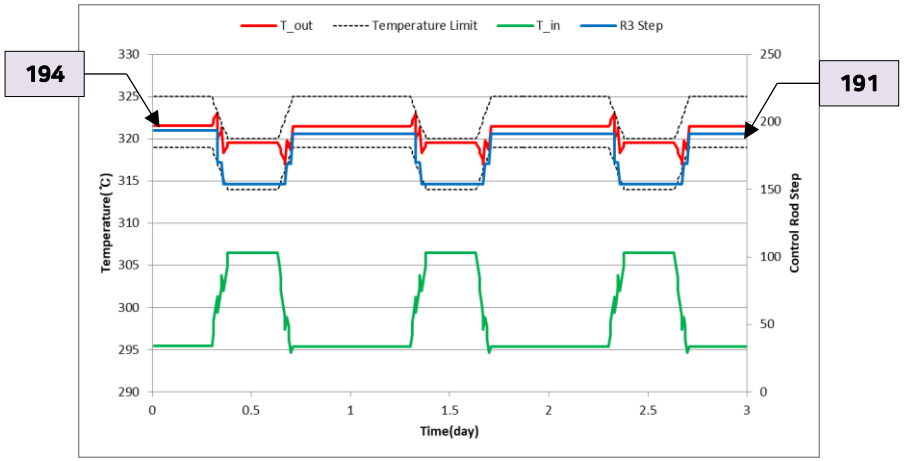
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

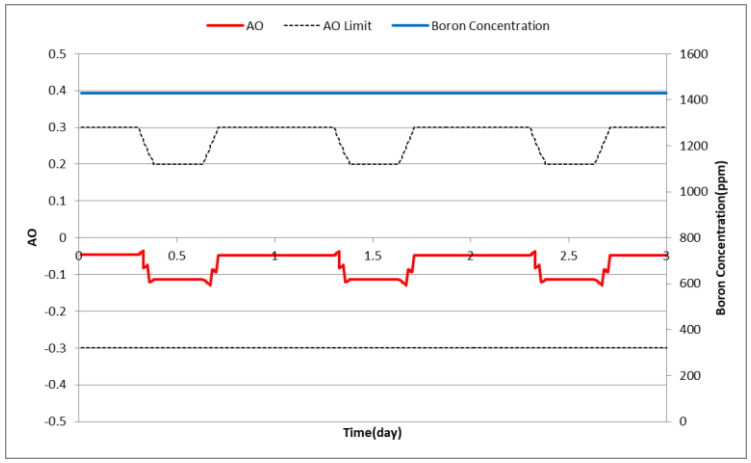
[CASE-F-1] 초기 ARO 조건, 출력 변동에 따른 제어 수행

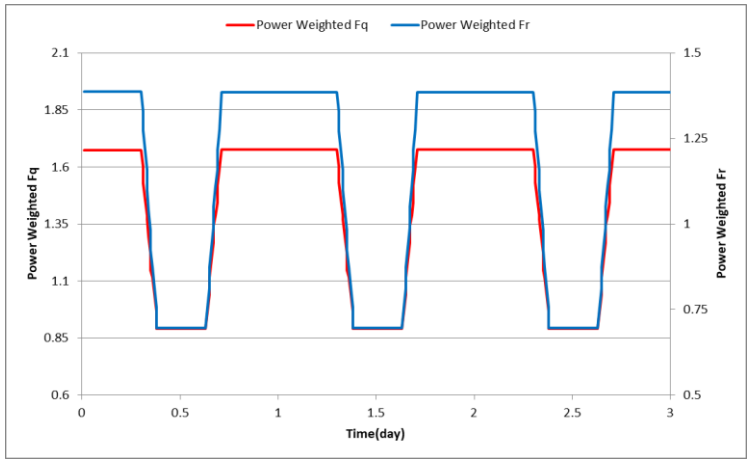
SMART100 | 혁신SMART

- 출력 변동 이후 초기온도 대비 약간 차이가 발생하여 제어봉 위치 변화 발생









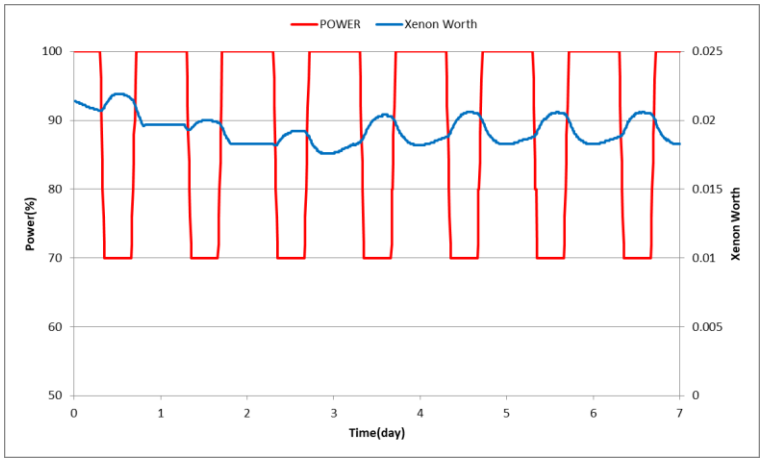
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

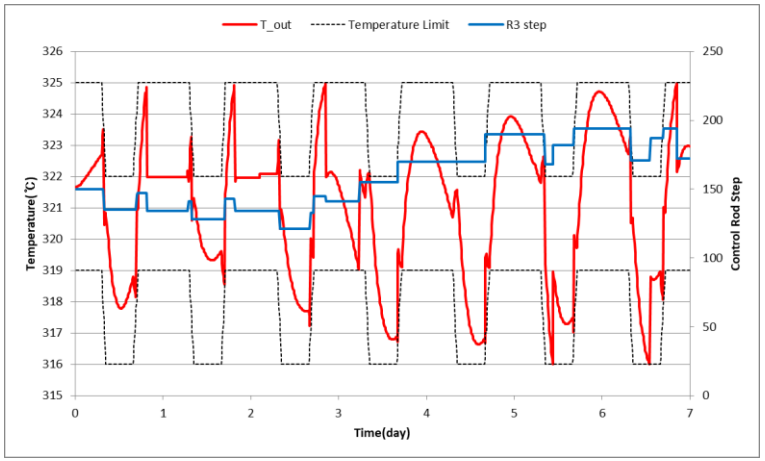
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

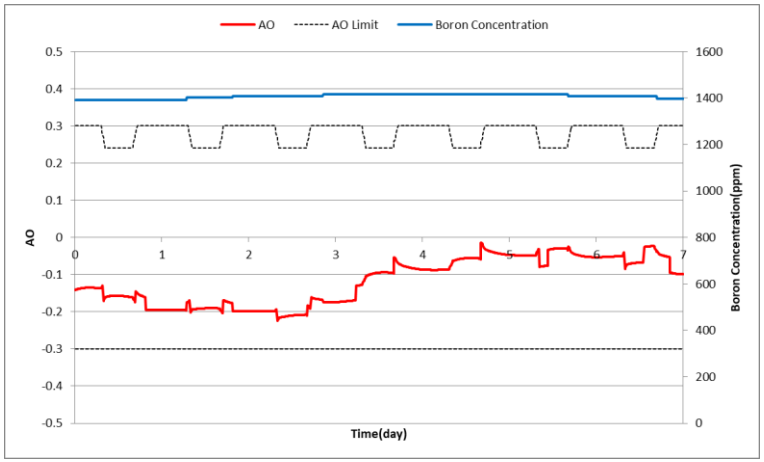
[CASE-F-2] 초기 제어봉 위치 변경에 따른 시뮬레이션 수행

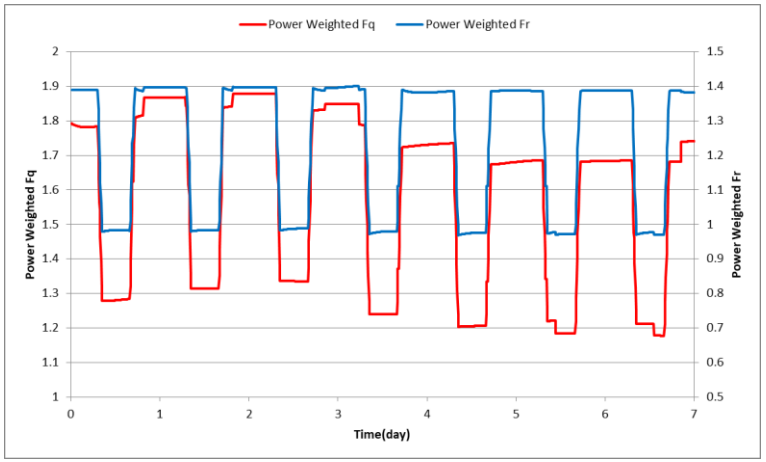
SMART100 | 혁신SMART

- CBC 변경됨









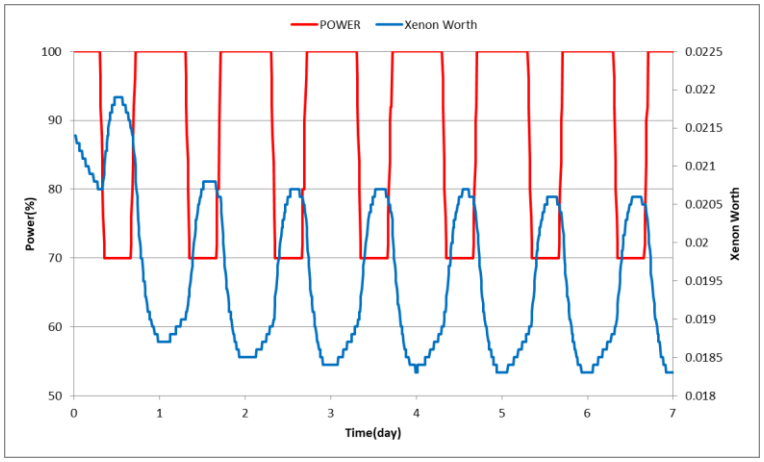
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

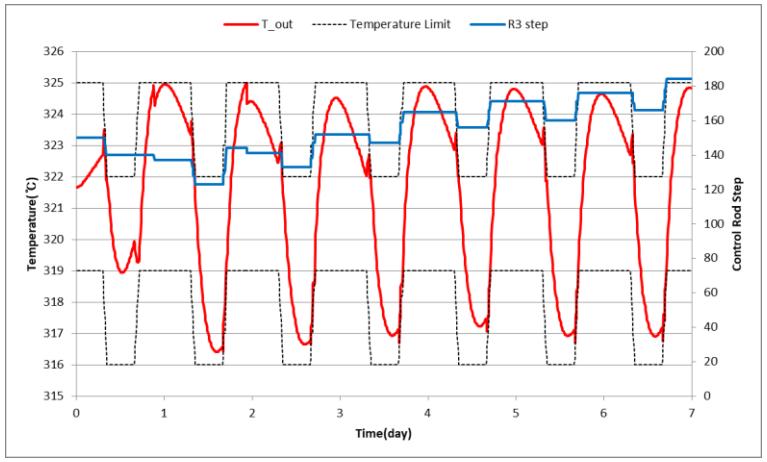
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

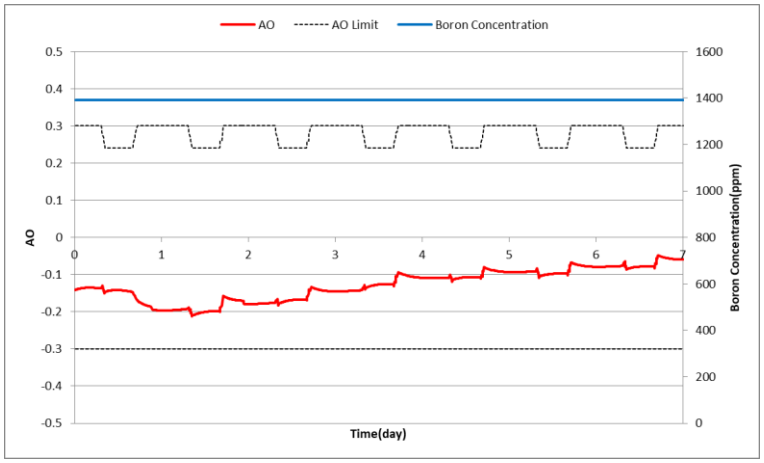
[CASE-F-2] 초기 제어봉 위치 변경에 따른 시뮬레이션 수행

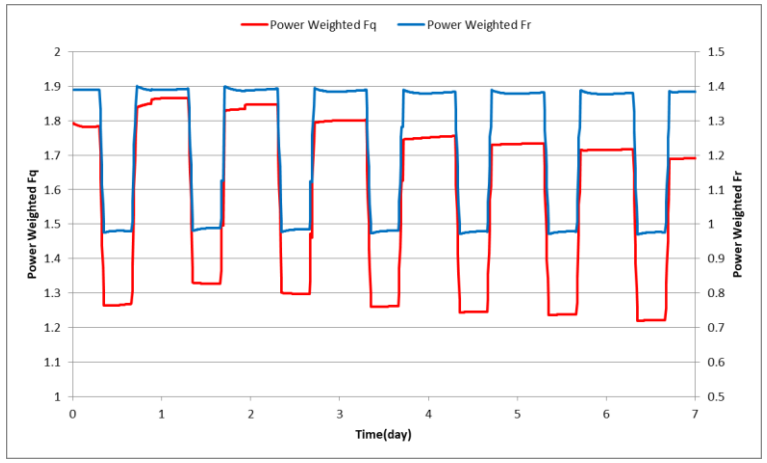
SMART100 혁신SMART

- 출구 온도 설정값 (75%) 수정 후 CBC 변동 없는 시뮬레이션 가능함 확인









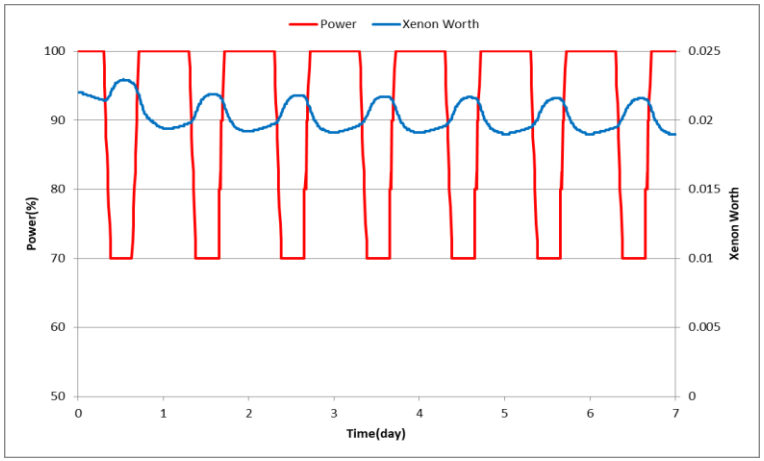
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

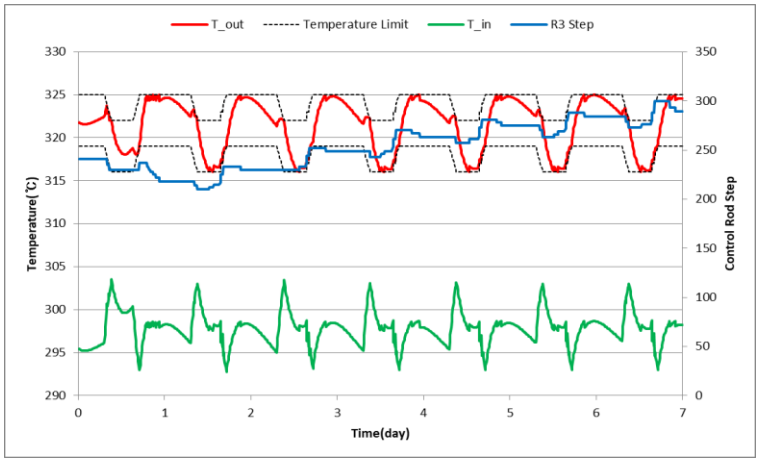
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

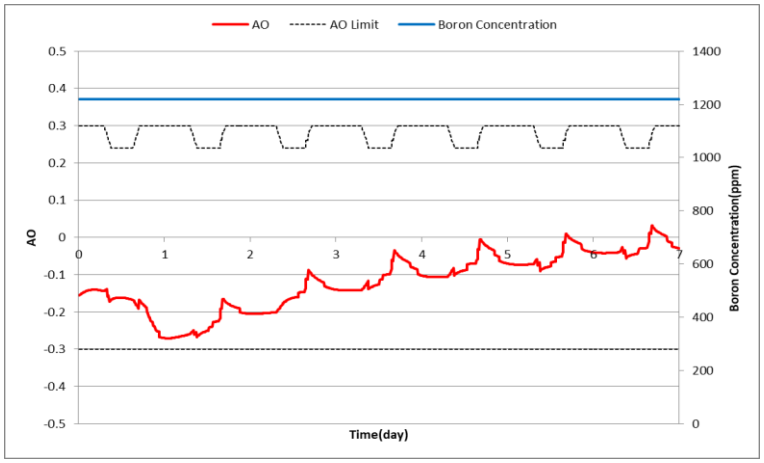
[CASE-F-2] 초기 제어봉 위치 변경에 따른 시뮬레이션 수행

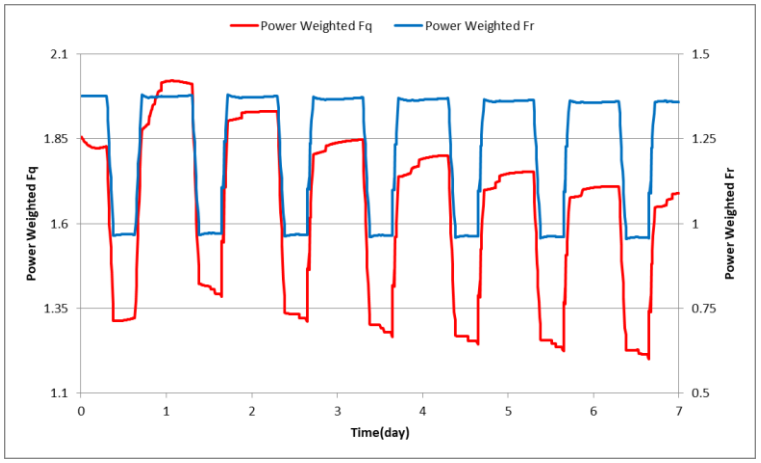
SMART100 | 혁신SMART

- 출구 온도 설정값 (75%) 수정 후 CBC 변동 없는 시뮬레이션 가능함 확인









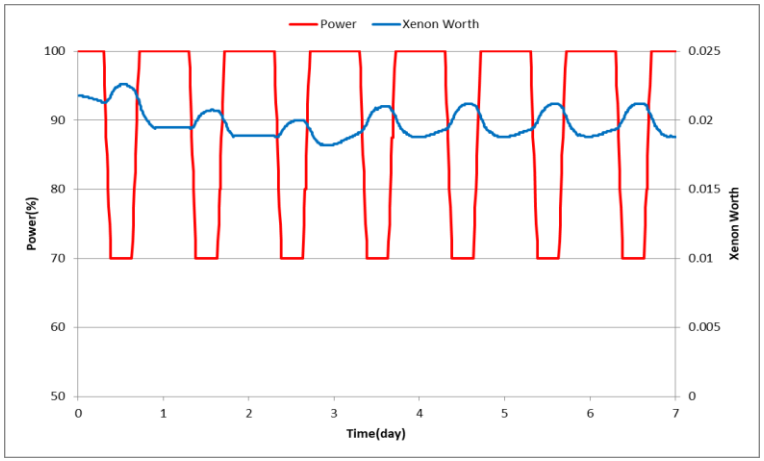
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

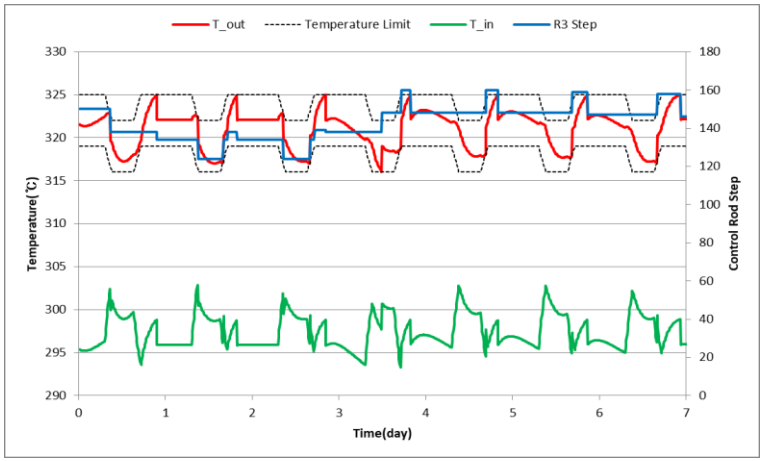
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

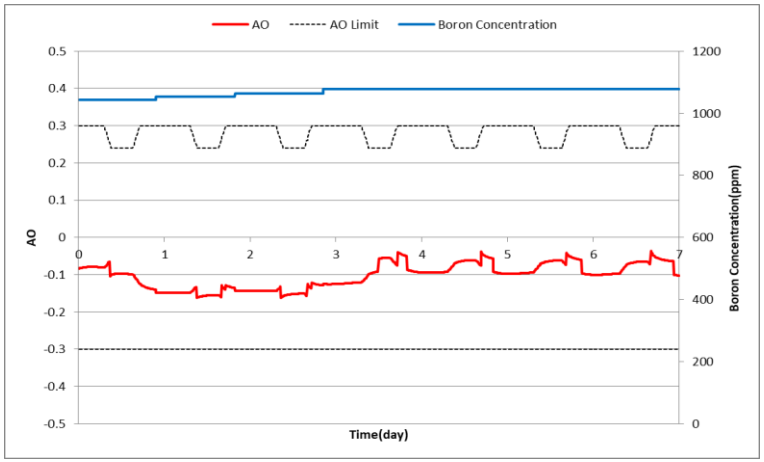
[CASE-F-2] 초기 제어봉 위치 변경에 따른 시뮬레이션 수행 (MOC)

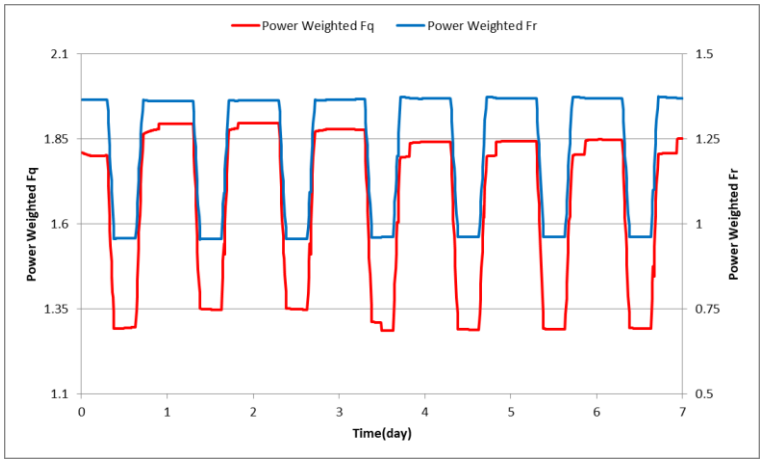
SMART100 | 혁신SMART

- 출구 온도 설정값 (75%) 수정하더라도 CBC 변동 발생, 추가 제어 필요









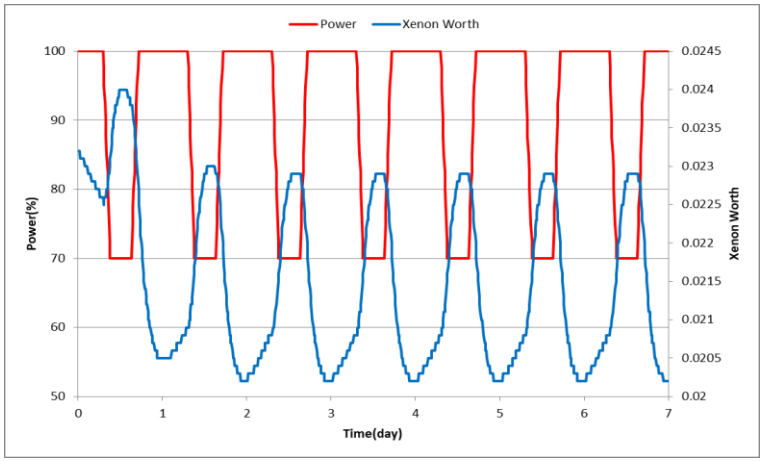
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

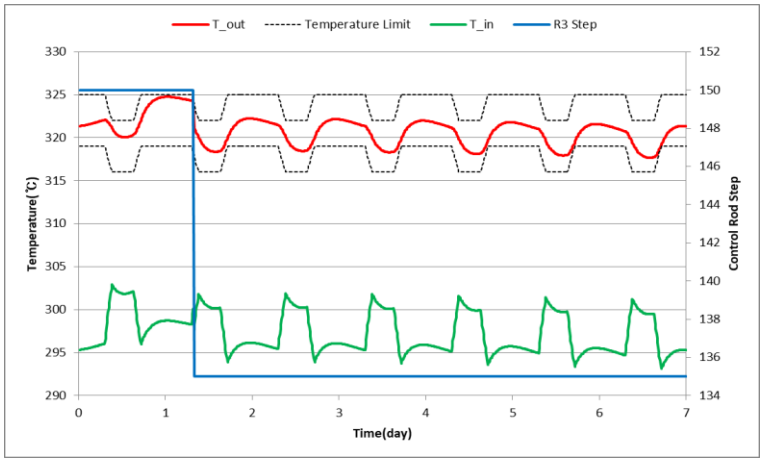
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

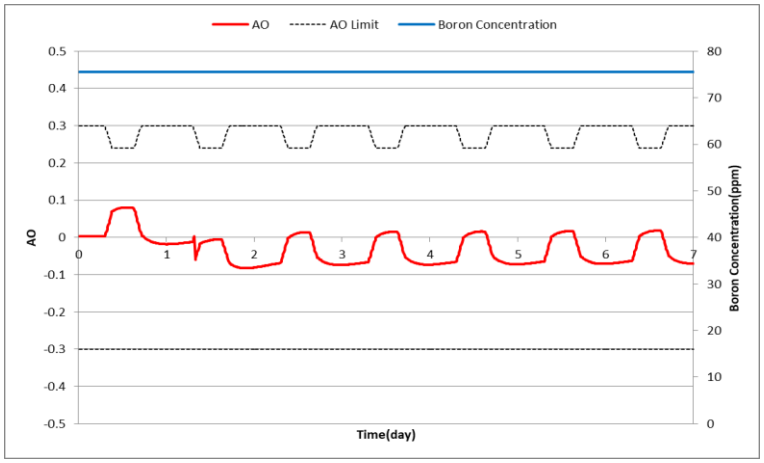
[CASE-F-2] 초기 제어봉 위치 변경에 따른 시뮬레이션 수행 (EOC)

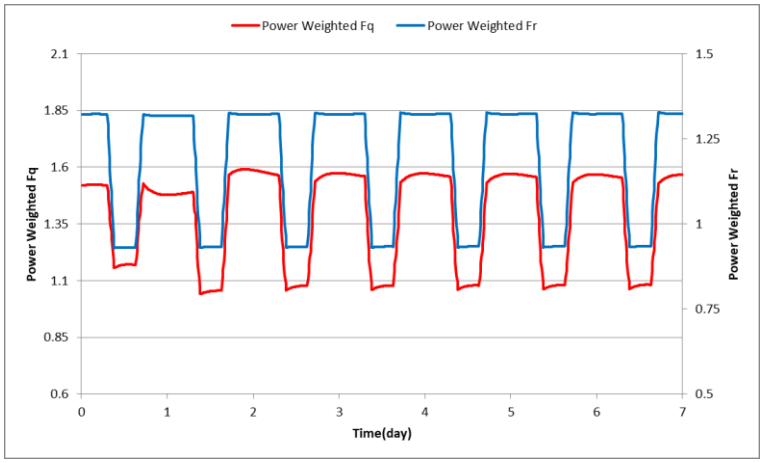
SMART100 | 혁신SMART

- 출구 온도 설정값 (75%) 수정 후 CBC 변동 없는 시뮬레이션 가능함 확인









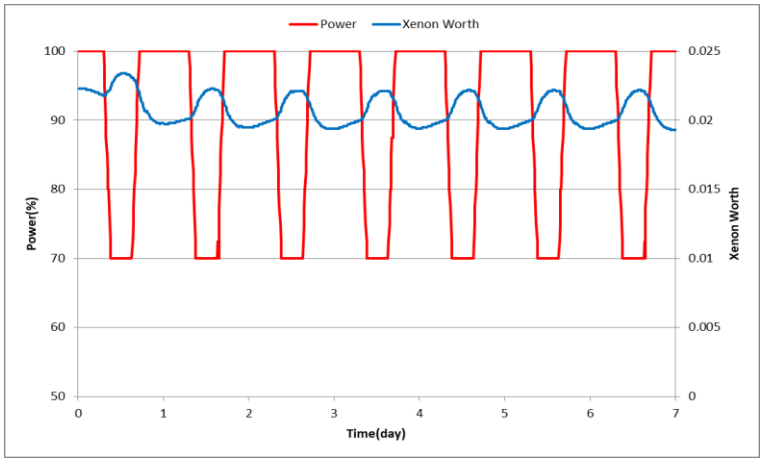
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

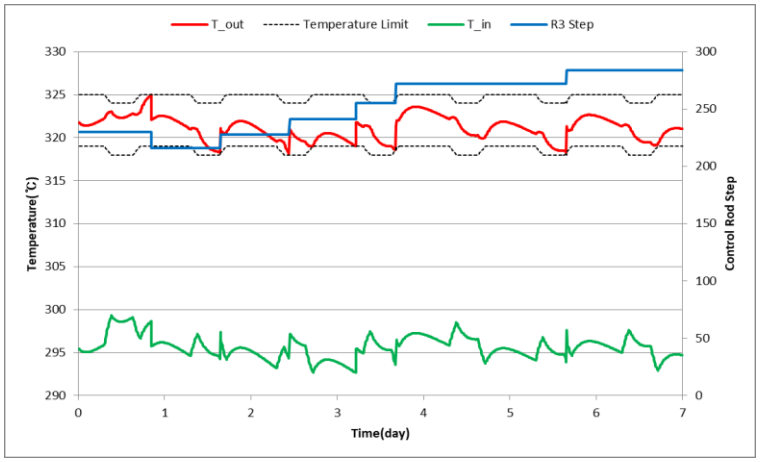
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

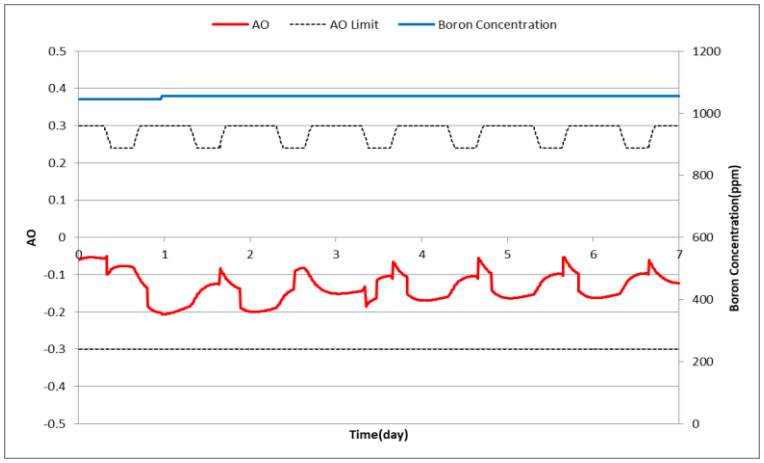
[CASE-F-2] 초기 제어봉 위치 변경에 따른 시뮬레이션 수행 (MOC)

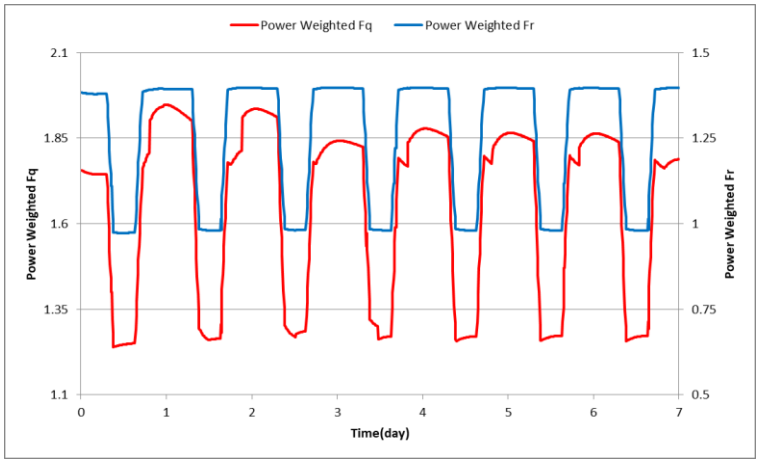
SMART100 | 혁신SMART

- 출구 온도 설정값 (75%) 수정하더라도 CBC 변동 발생, 추가 제어 필요









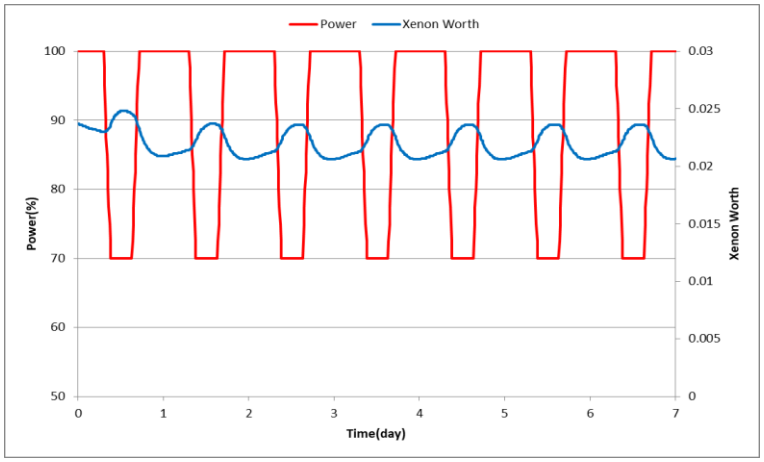
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

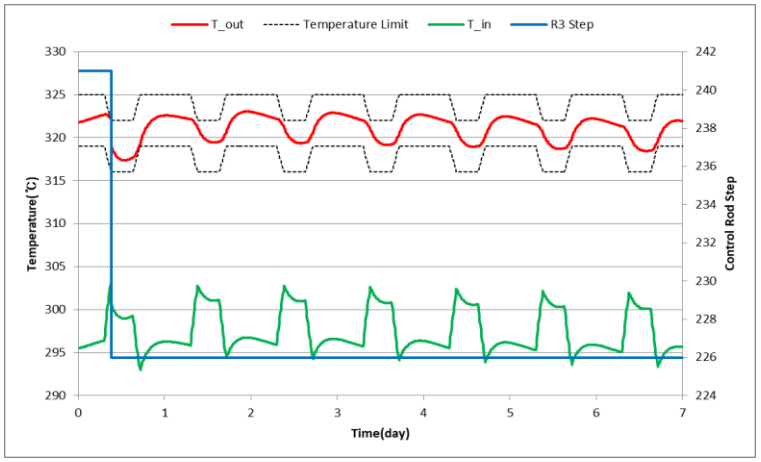
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

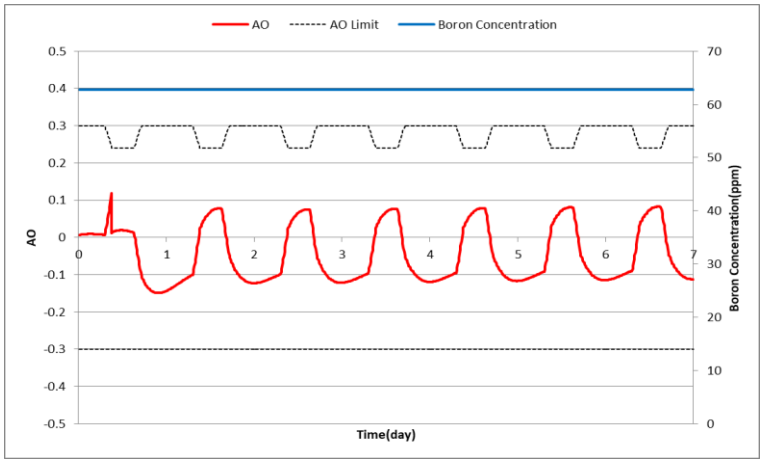
[CASE-F-2] 초기 제어봉 위치 변경에 따른 시뮬레이션 수행 (EOC)

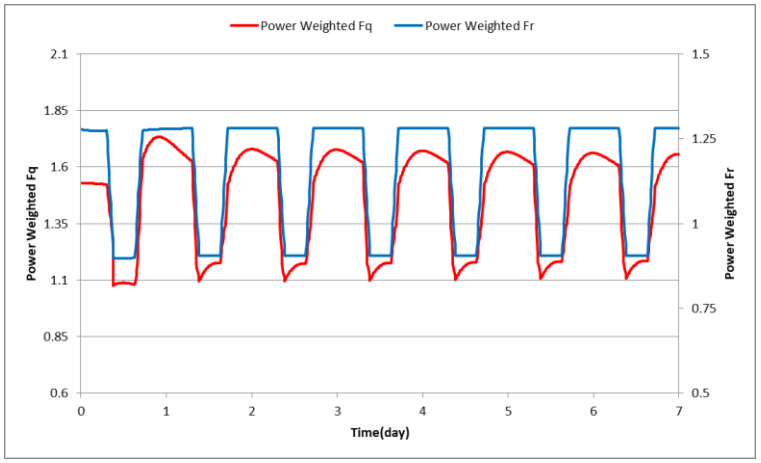
SMART100 | 혁신SMART

- 출구 온도 설정값 (75%) 수정 후 CBC 변동 없는 시뮬레이션 가능함 확인









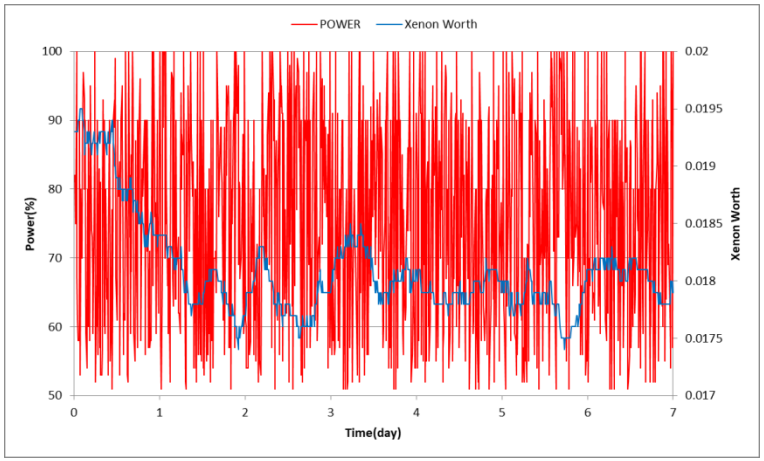
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

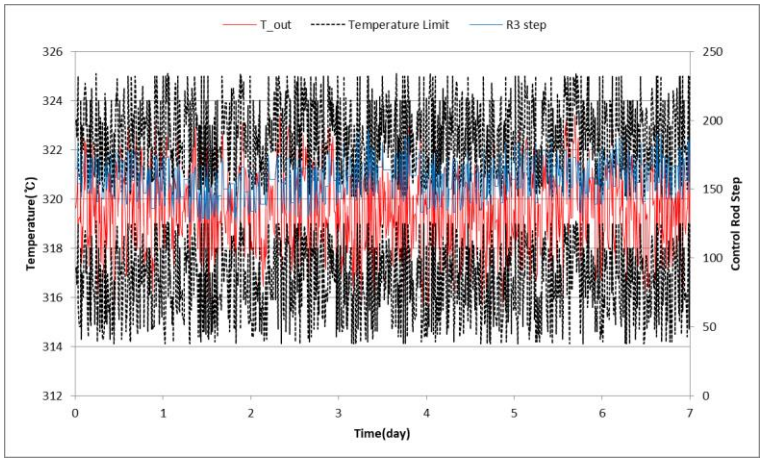
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

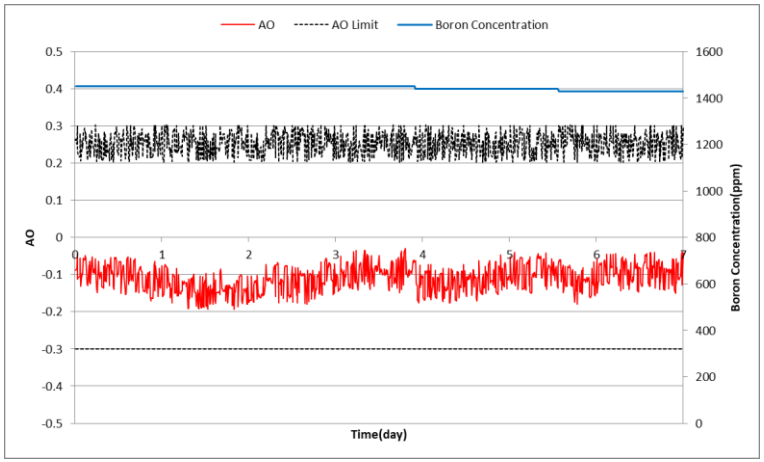
[CASE-F-3] 100~50% 사이 임의의 출력 7일 부하추종 평가

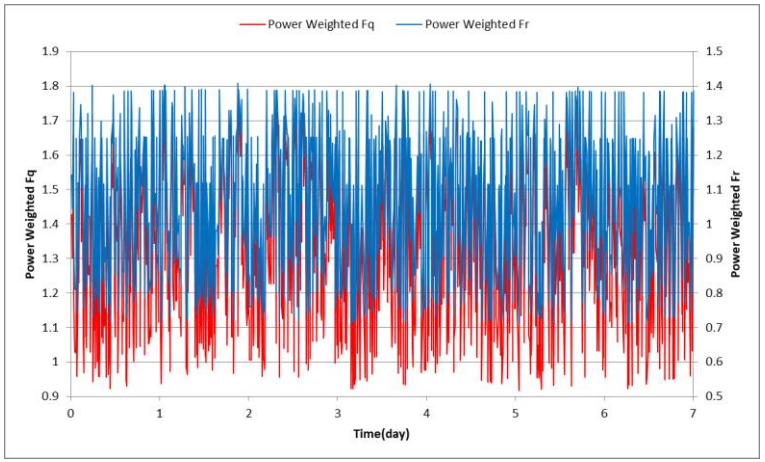
SMART100 | 혁신SMART

- 무작위 출력에 대한 시뮬레이션 진행









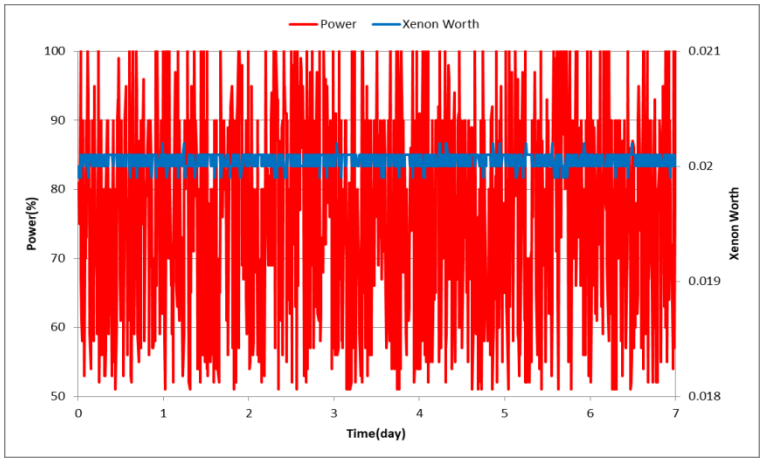
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

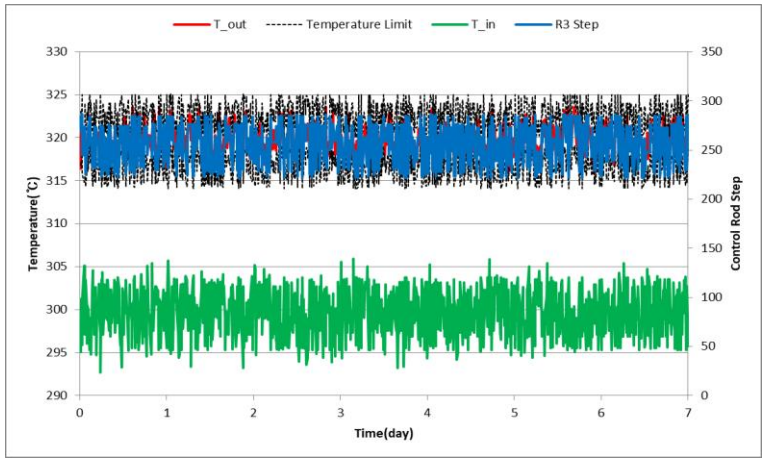
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

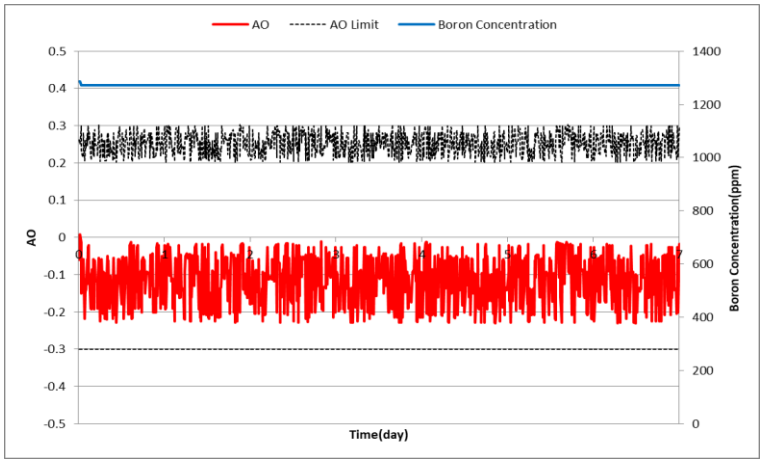
[CASE-F-3] 100~50% 사이 임의의 출력 7일 부하추종 평가

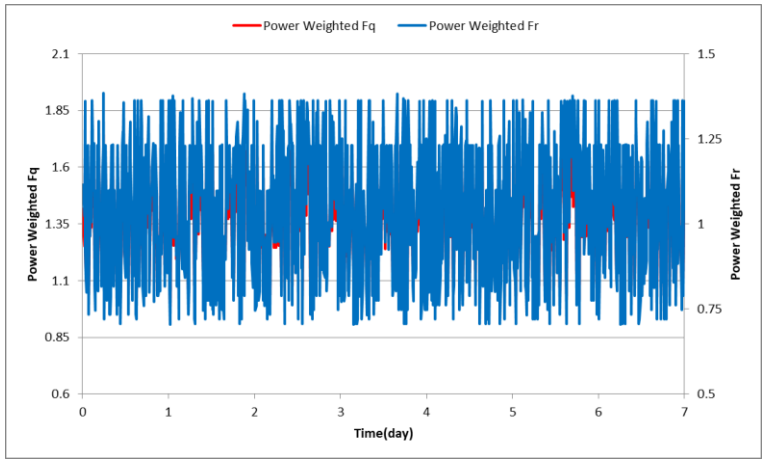
SMART100 | 혁신SMART

- 무작위 출력에 대한 시뮬레이션 진행









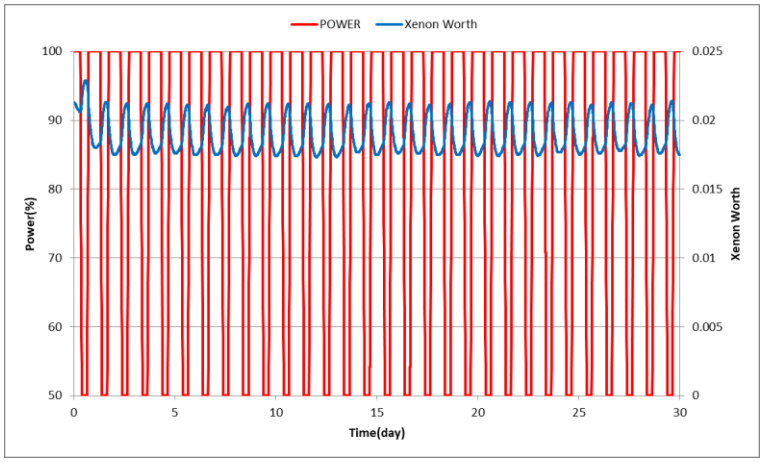
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

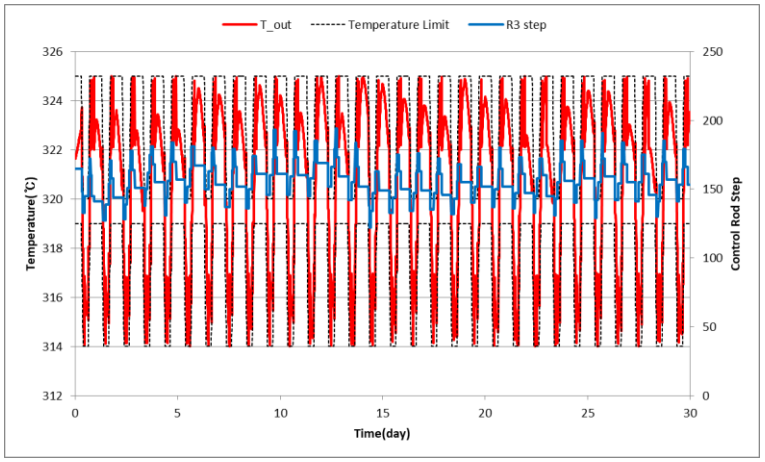
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

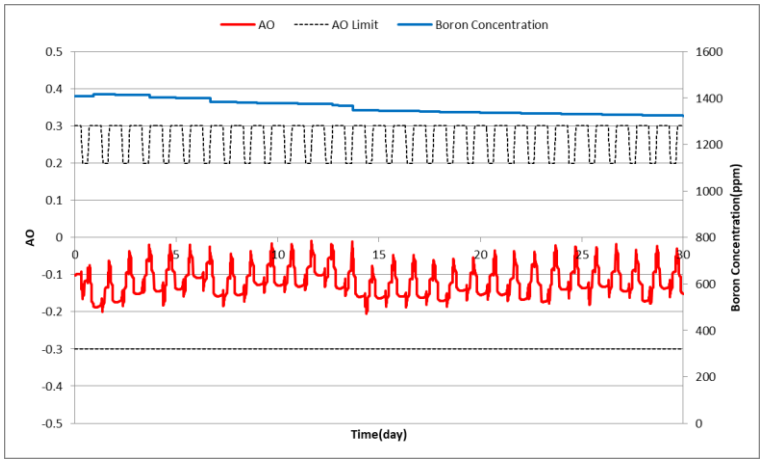
[CASE-F-4] 100%-50%-100% 출력 변동 30일 부하추종 평가

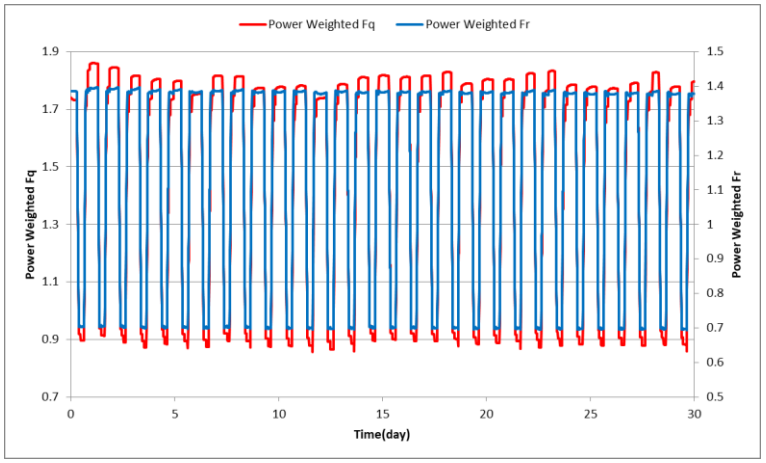
SMART100 | 혁신SMART

- 연소에 따른 일일 CBC 변화 반영









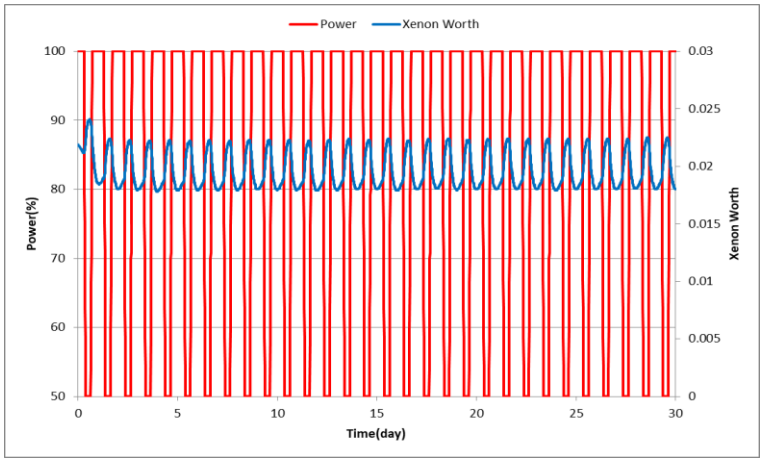
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

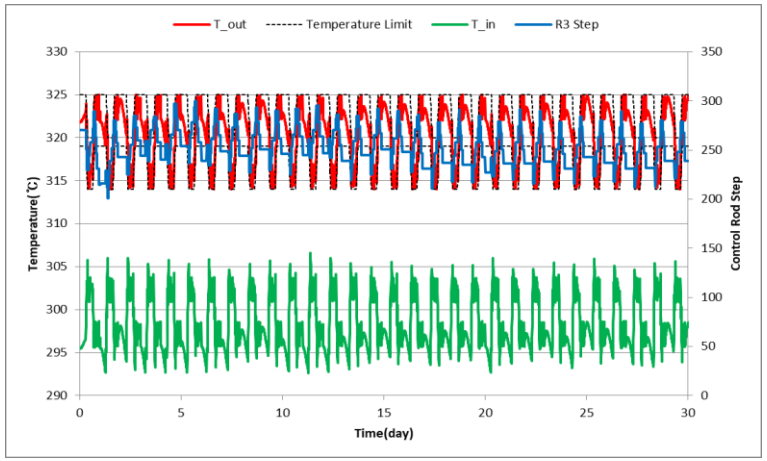
부하추종 시나리오에 따른 노심 시뮬레이션

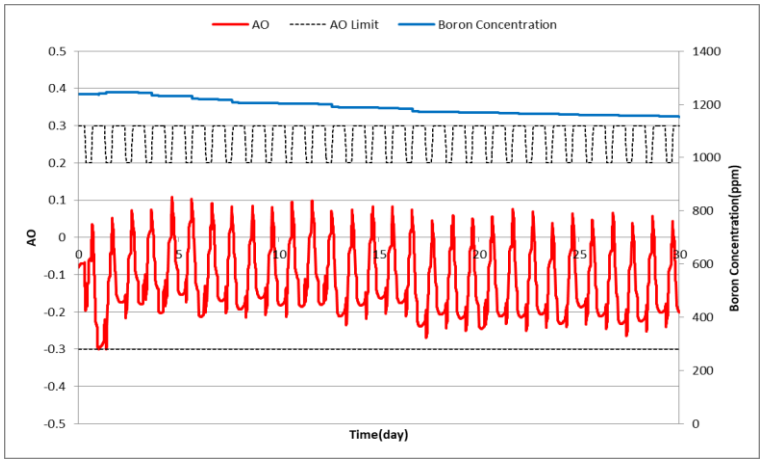
[CASE-F-4] 100%-50%-100% 출력 변동 30일 부하추종 평가

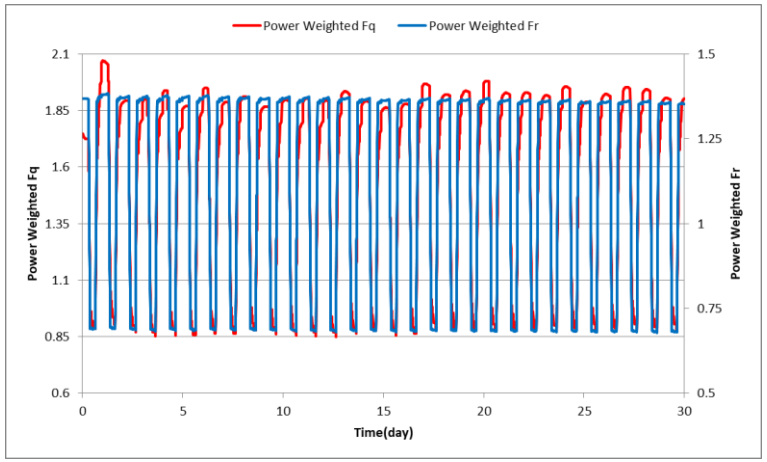
SMART100 | 혁신SMART

- 연소에 따른 일일 CBC 변화 반영







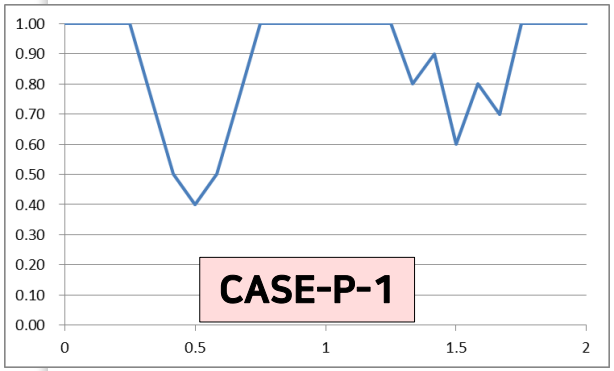


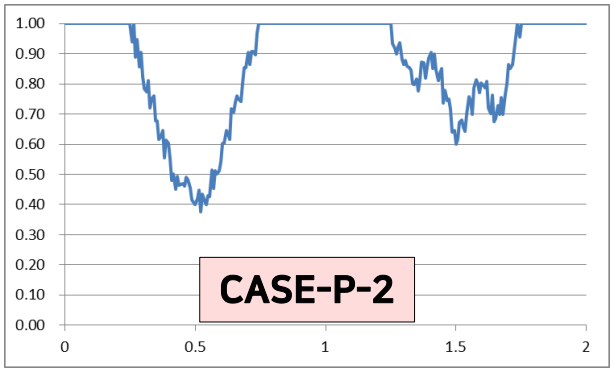
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

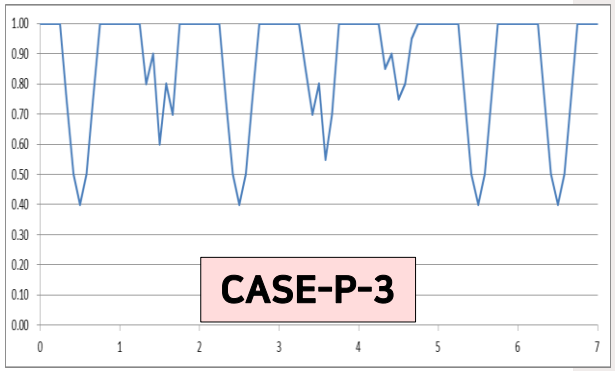
SMR의 부하추종 성능 평가

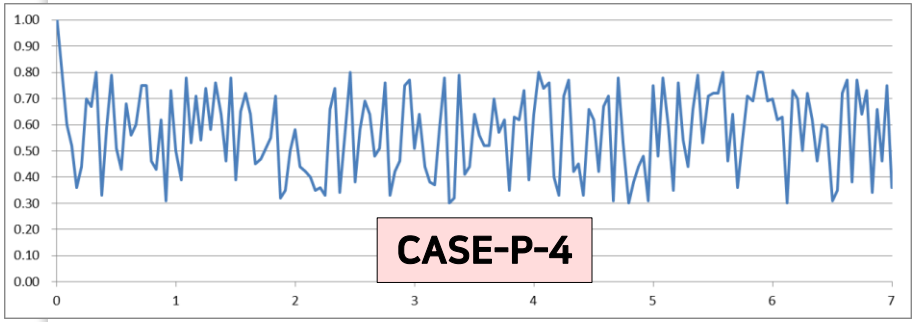
성능평가 시나리오

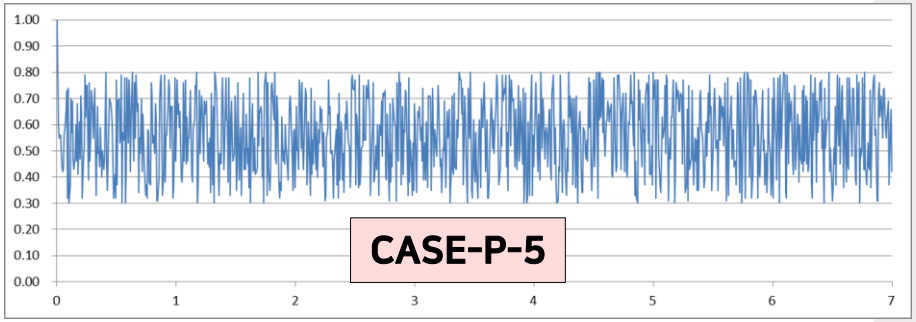
- CASE-P-1 : 맑은 날 하루와 흐린 날 하루 총 2일의 부하추종 평가
- CASE-P-2 : CASE-P-1에서 5%의 불확도를 추가한 출력의 부하추종 평가
- CASE-P-3 : CASE-P-1에서 맑은 날 및 흐린 날 5일을 추가한 7일의 부하추종 평가
- CASE-P-4 : 30~80% 사이 임의의 출력 7일의 부하추종 평가 (60분마다 임의출력 생성, 그 사이 출력은 선형)
- CASE-P-5 : 30~80% 사이 임의의 출력 7일의 부하추종 평가 (10분마다 임의출력 생성, 그 사이 출력은 선형)









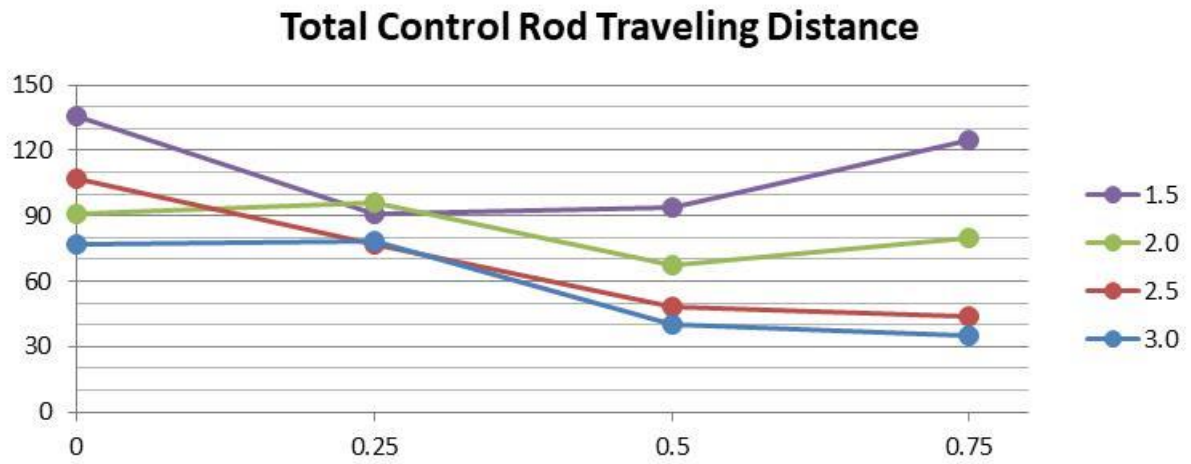


2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

제어전략에 따른 부하추종 성능 비교

[CASE-P-1] 성능평가 시나리오 결과

허용범위	설정범위	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리	허용범위	설정범위	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리
±3.0 ℃	0 %	77	50	27	±2.0 ℃	0 %	91	52	39
	25 %	78	46	32		25 %	96	59	37
	50 %	40	31	9		50 %	67	44	23
	75 %	35	29	6		75 %	80	47	33
±2.5 ℃	0 %	107	63	44	±1.5 ℃	0 %	136	76	60
	25 %	77	49	28		25 %	91	55	36
	50 %	48	33	15		50 %	94	56	38
	75 %	44	34	10		75 %	125	70	55

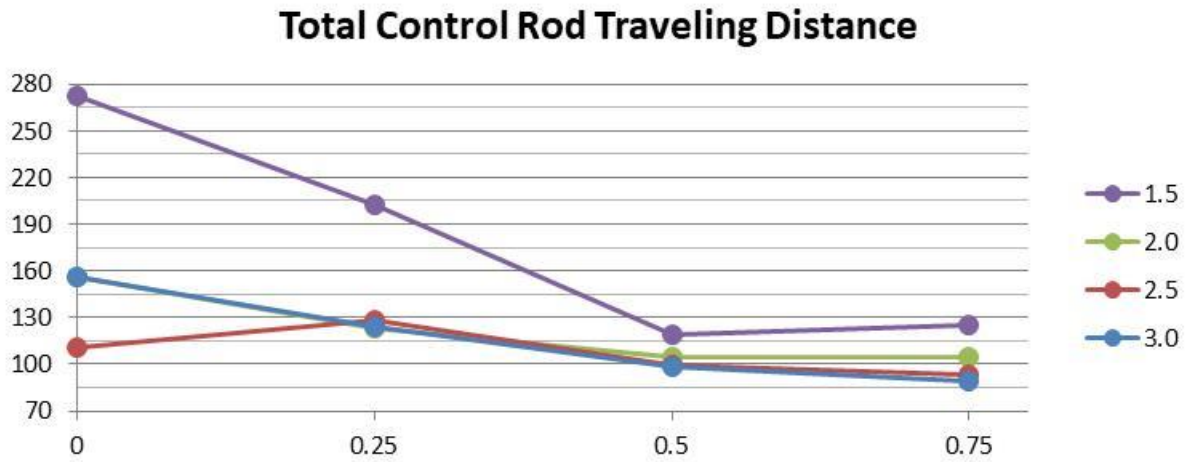


2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

제어전략에 따른 부하추종 성능 비교

[CASE-P-2] 성능평가 시나리오 결과

허용범위	설정범위	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리	허용범위	설정범위	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리
±3.0 ℃	0 %	156	87	69	±2.0 ℃	0 %	156	84	72
	25 %	124	72	52		25 %	123	69	54
	50 %	98	58	40		50 %	105	60	45
	75 %	89	56	33		75 %	105	62	43
±2.5 ℃	0 %	111	65	46	±1.5 ℃	0 %	272	142	130
	25 %	128	71	57		25 %	202	107	95
	50 %	99	58	41		50 %	119	68	51
	75 %	93	57	36		75 %	125	71	54

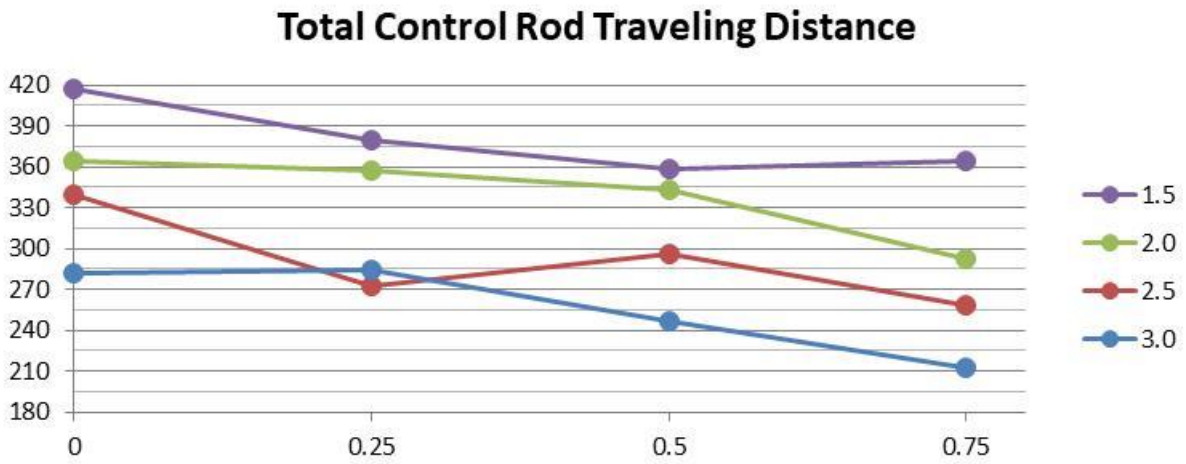


2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

제어전략에 따른 부하추종 성능 비교

[CASE-P-3] 성능평가 시나리오 결과

허용범위	설정범위	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리	허용범위	설정범위	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리
±3.0 ℃	0 %	282	161	121	±2.0 ℃	0 %	364	204	160
	25 %	284	167	117		25 %	357	199	158
	50 %	246	145	101		50 %	343	193	150
	75 %	212	130	82		75 %	292	169	123
±2.5 ℃	0 %	339	192	147	±1.5 ℃	0 %	417	228	189
	25 %	273	160	113		25 %	380	210	170
	50 %	296	170	126		50 %	358	200	158
	75 %	258	152	106		75 %	364	204	160

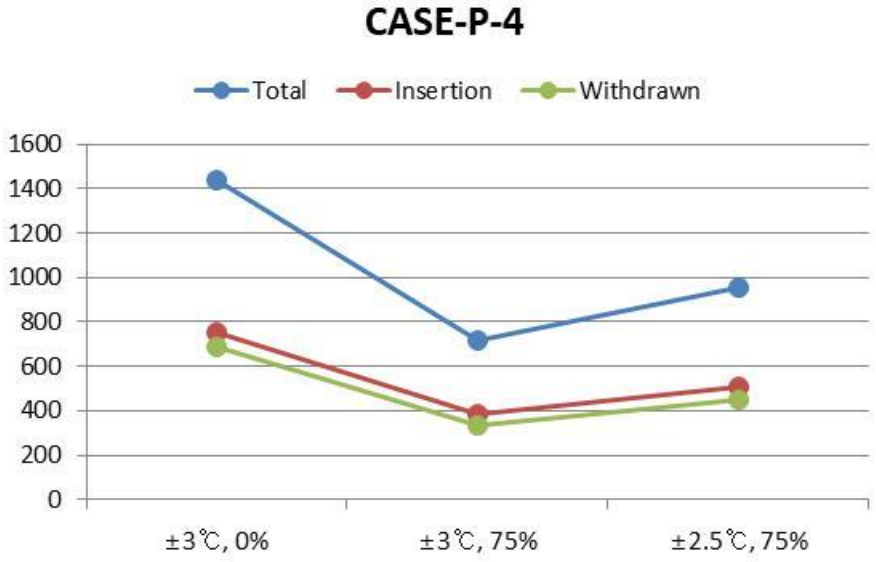


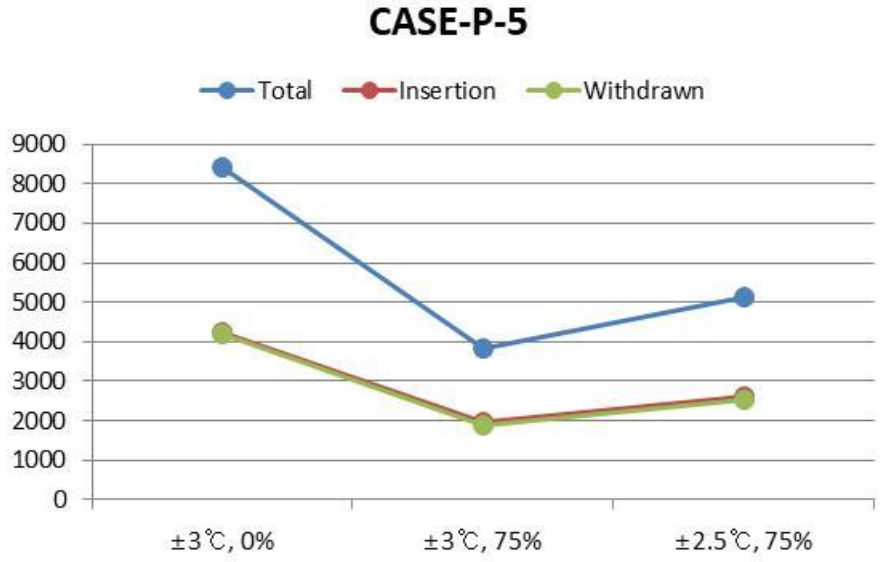
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

제어전략에 따른 부하추종 성능 비교

[CASE-P-4, CASE-P-5] 성능평가 시나리오 결과

허용범위	설정범위	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리	허용범위	설정범위	제어봉 이동거리	제어봉 삽입거리	제어봉 인출거리
±3.0 ℃	0 %	1442	752	690	±3.0 ℃	0 %	8429	4245	4184
±3.0 ℃	75 %	716	385	331	±3.0 ℃	75 %	3845	1952	1893
±2.5 ℃	75 %	958	506	452	±2.5 ℃	75 %	5138	2597	2541



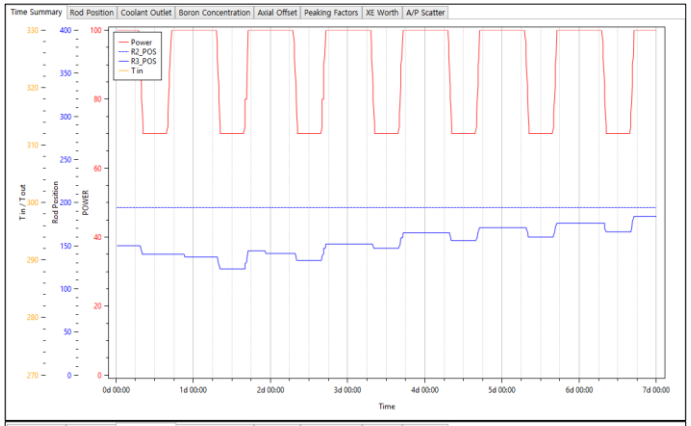


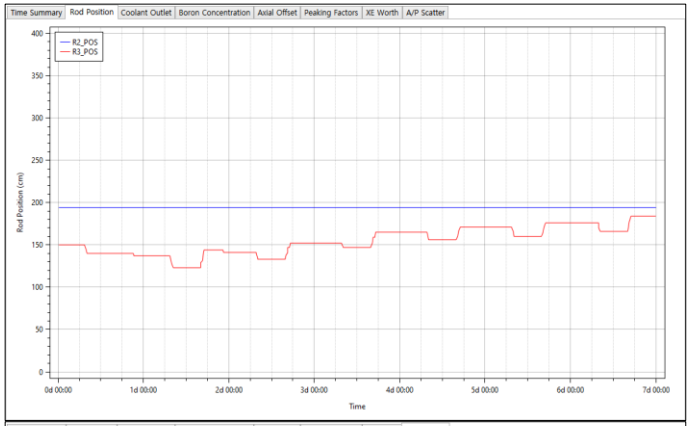
2 SMR 부하추종능 평가 : 노심

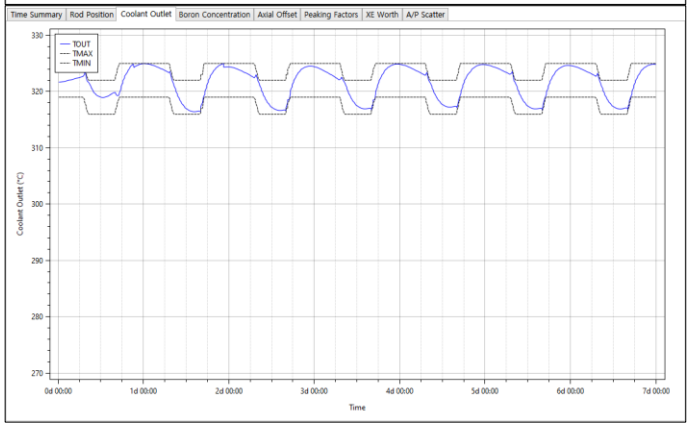
부하추종능 평가용 프로그램 소개

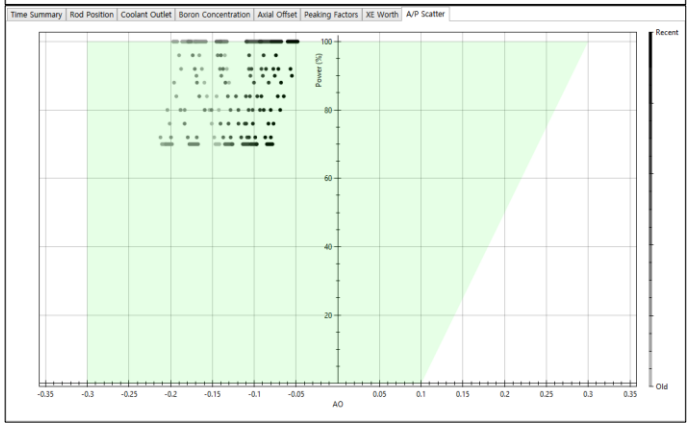
LF-TRACER† : 부하추종능 평가 프로그램

- 개요 : 주어진 원자로가 노심측면에서의 출력변동운전능을 갖추고 있는지 시뮬레이션을 수행하는 프로그램
- 사용자입출력화면 + 제어알고리즘 으로 구성
  - 내부적으로 KAERI 노심핵설계 코드인 MASTER를 호출하여 노심해석을 수행









† 안병문 외, “Development of Load Following Operation Tracer for SMR,” 2022 KNS 춘계학술대회 논문집.

3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

성능평가 목표 및 계산조건

- **성능평가 목표: 부하추종 시, 원자력계통의 열수력 조건이 원자력 안전 설정치 이내로 운영되는지 분석**
- **증기발생기 거동 모의**
  - 원자로 열출력 변동에 따라 증기의 유량, 온도 변화가 수반되므로 시뮬레이션을 통해 확인
- **가압기 거동 모의**
  - 원자로 열출력 변동에 따라 원자로 냉각재 온도 변화가 수반되므로 시뮬레이션을 통해 확인
- **계산조건**
  - 초기조건
    - 노심출력: 365 MWth
    - 노심 입/출구 온도: 575 / 598 K
    - 급수유량: 190 kg/s
  - 분석조건
    - MARS-KS 분석조건
      - CASE-S-1 : 100 % - 70 % - 100 % (1일 부하추종)
      - CASE-S-2 : 100 % - 50 % - 100 % - 50 % - 100 % (2일 부하추종)
      - CASE-S-3 : 100 % - 50 % - 100 % - 70 % - 100 % (2일 부하추종)
    - MASTER - MASR-KS semi-coupling 계산
      - CASE-S-4 : 100 % - 50 % - 100 % (1일 부하추종)

3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

Modeling

MARS-KS 분석모델

Core

- Point kinetics model
- 6-group delated neutron constants
- Reactivity feedback: moderator density, Doppler

Primary side

- Reactor vessel
- Pressurizer
- Reactor coolant pump (4 대)
- Steam generator

Secondary side

- Steam generator (4 대)
- Feed water & Steam line (각 4개 라인)

Control systems

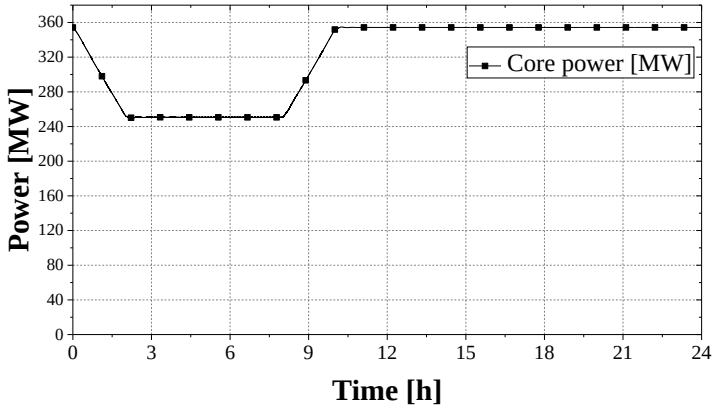
- Core average temperature control
  - Core average temperature constant → ($\frac{T_{core,in}+T_{core,out}}{2} = constant$)
  - FW pump control
- SG pressure control ($P_{steam\ header} = constant$)
  - Main steam pressure control valve
    - Valve area control

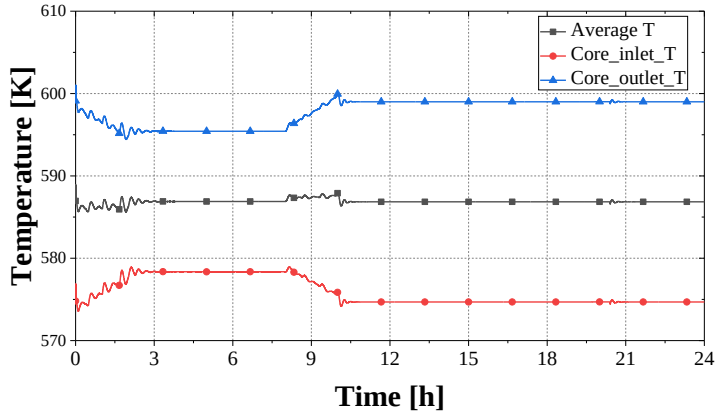
3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

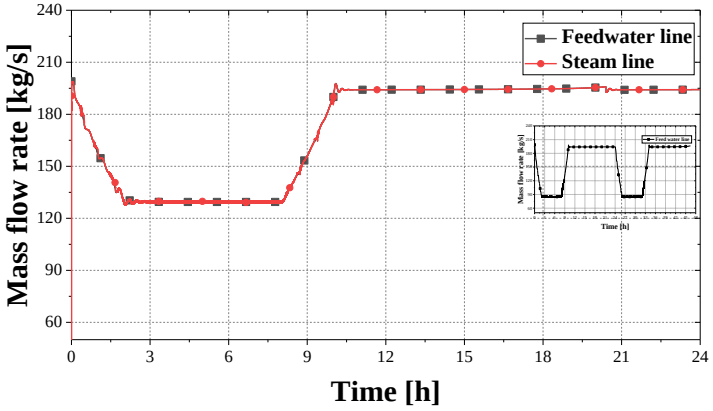
성능평가 결과 (MARS-KS)

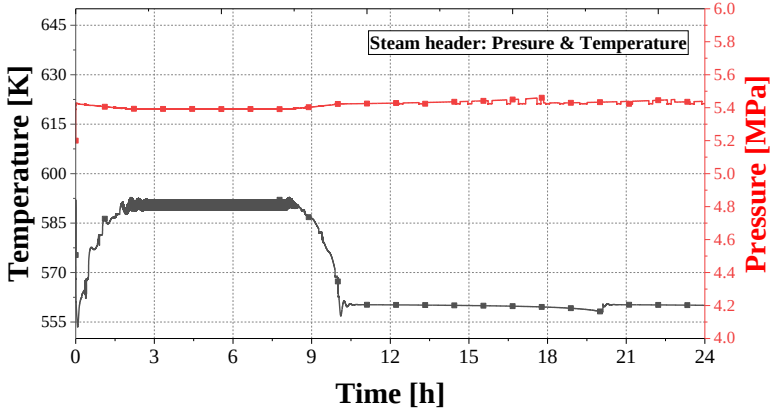
[CASE-S-1] 1일 부하추종능 평가 : 100 % – 70 % – 100 %

- 출력, 노심 입·출구 온도, 주급수 및 주증기 유량, 증기헤더 압력·온도
- 급수유량과 증기헤더 압력 제어과정에서 노심의 온도의 미세한 떨림이 발생함







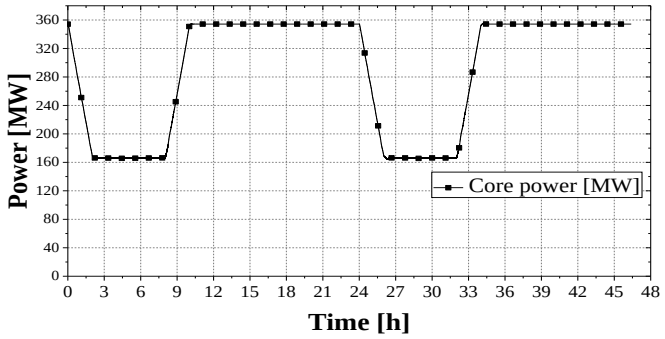


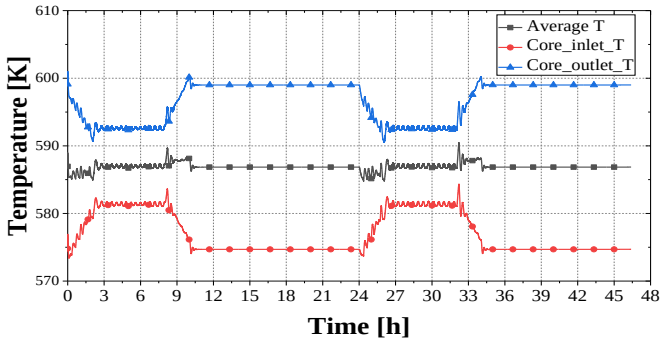
3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

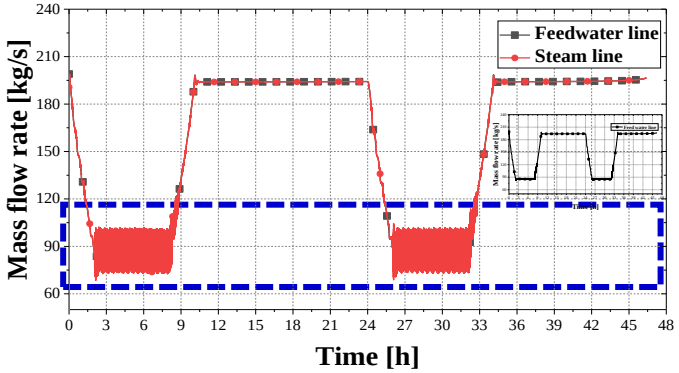
성능평가 결과 (MARS-KS)

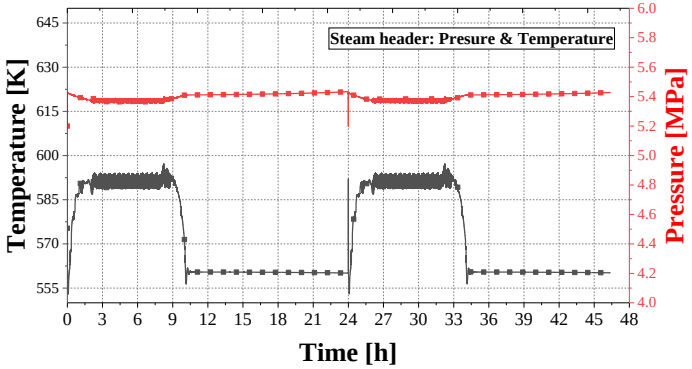
[CASE-S-2] 2일 부하추종능 평가 결과 : 100 % – 50 % – 100 % - 50 % - 100 %

- 출력, 노심 입·출구 온도, 주급수 및 주증기 유량, 증기헤더 압력·온도
- 부하추종 후, 전출력 조건으로 회귀 시, 계통의 열수력 조건은 이전 전출력 조건과 동일함









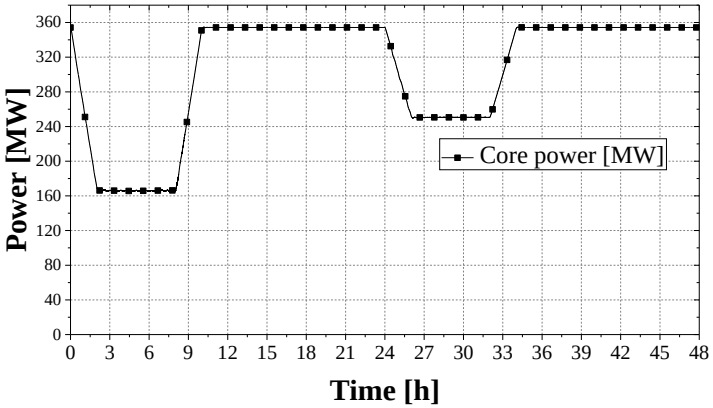
- 유량이 감소함에 따라 급수배관의 압력이 감소 → 증기발생기 내 포화 온도 감소 및 과열증기 영역이 확장됨
- 증기발생기에서 순간적이 Flashing instability 현상이 발생함
  - 부하추종 시, 급수배관의 압력 감소 방지를 위한 추가적인 계통(예: 압축기)이 요구 될 수 있음

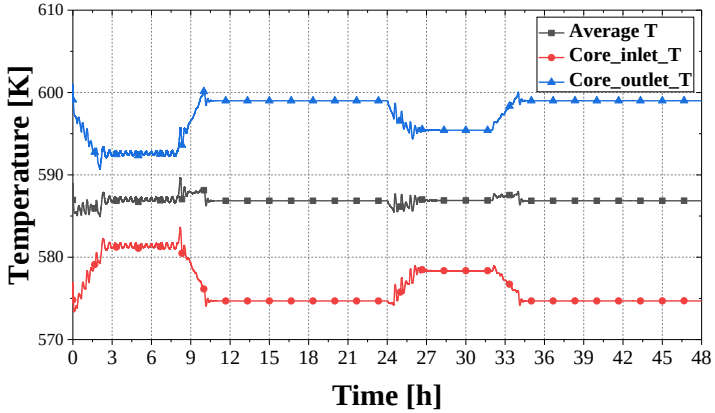
3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

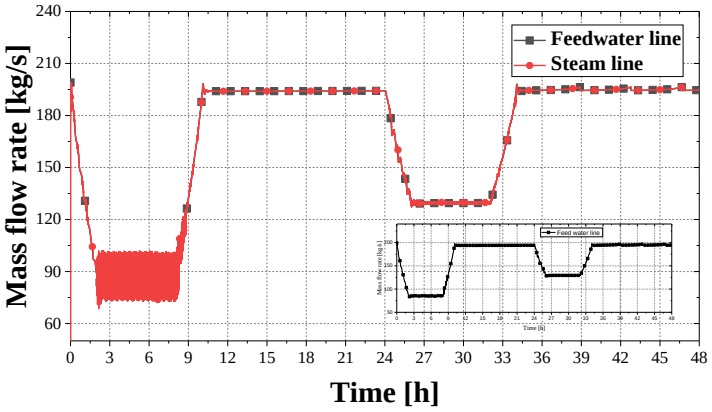
성능평가 결과 (MARS-KS)

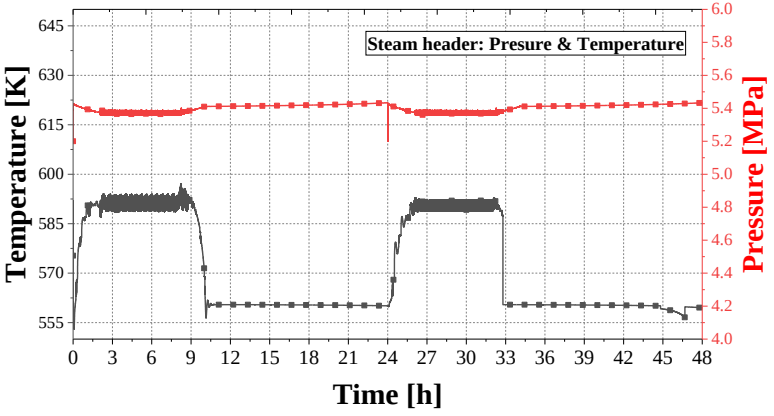
[CASE-S-3] 2일 부하추종능 평가 결과 : 100 % – 50 % – 100 % – 70 % – 100 %

- 출력, 노심 입·출구 온도, 주급수 및 주증기 유량, 증기헤더 압력







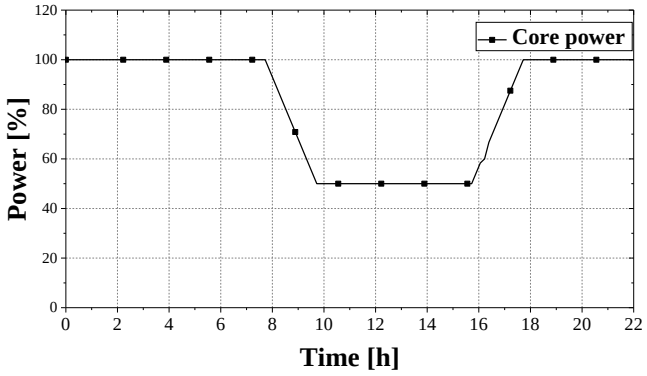


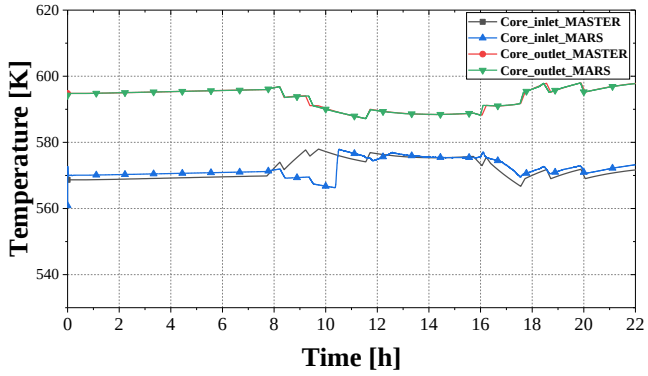
3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

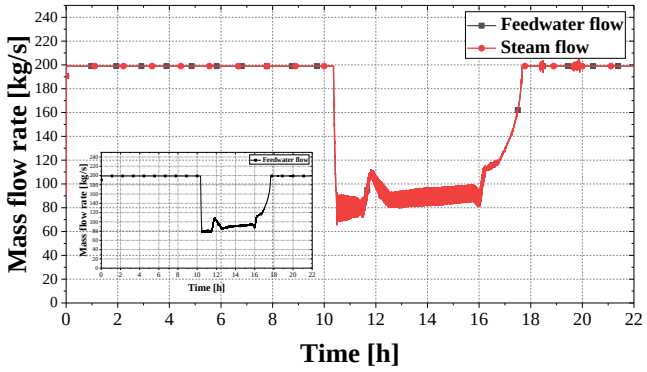
성능평가 결과 (MASTER - MARS-KS)

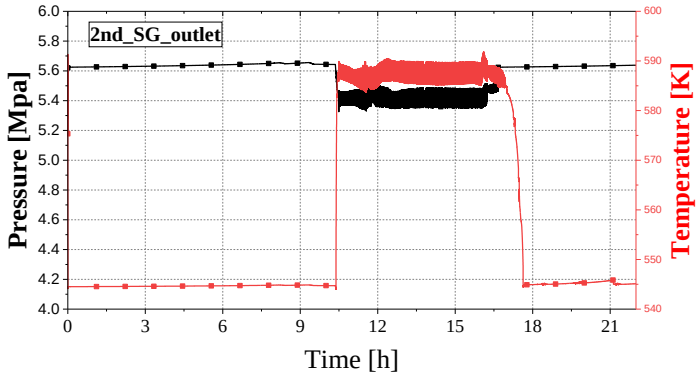
[CASE-S-4] 1일 부하추종능 평가 결과 : 100 – 50 – 100 %

- 출력, 노심 입·출구 온도, 주급수 및 주증기 유량, 증기라인 온도·압력
- MASTER code에서 계산 된 노심의 입·출구 온도 데이터를 MASR-KS code 노심 입 · 출구에 경계조건으로 넣어 계산 수행









3 SMR 부하추종능 평가 : 계통

Future work

SMART100 1 – 2 차측 통합모델 구축

- 1 – 2차측 통합모델 구축 완료 (터빈, 발전기, 복수기, 급수펌프, 급수 열교환기 등)
  - 발전소 2차 측 Heat & Balance diagram 데이터와 비교 완료
- 해당 모델을 활용하여 2차측 환경을 고려한 부하추종 계산 예정

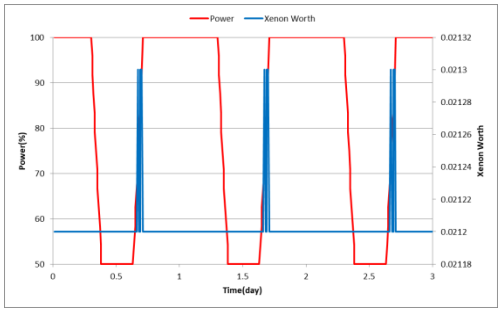
4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

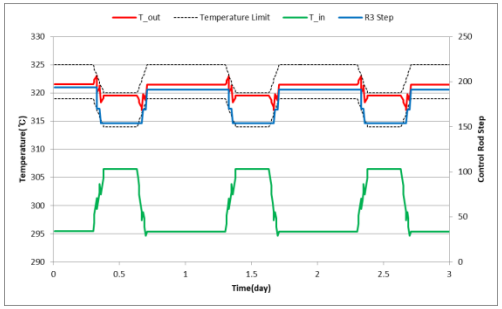
4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

개요

부하추종/탄력운전을 고려한 노심설계 필요성

- 통상적으로 "전출력운전(Hot Full Power)"과 "전제어봉인출(All-Rods-Out)" 상태를 기준으로 노심설계 수행
- 부하추종/탄력운전일 경우
  - 운전기간 동안 전출력운전이 아닌 경우가 상당기간 존재
  - 운전기간 동안 노심 상부에 제어봉이 삽입되어 있는 경우가 상당기간 존재
    - 노심연소에 따른 노심 상하부 연소도 차이 발생
- 어떤 상태를 가정하는 것이 가장 합리적인가?
  - 평균 제어봉 삽입 상태 가정?
  - 평균 출력 가정?

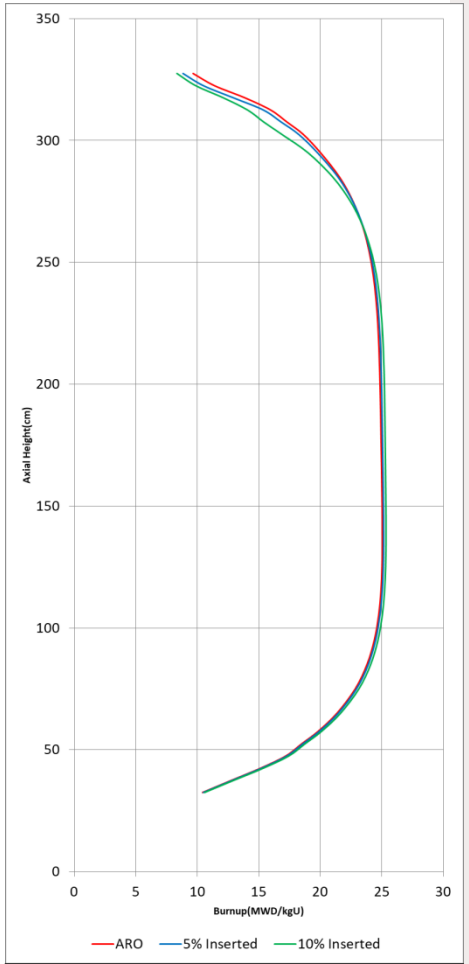




A2	A2	A2	B6	A3	C4
22.0	22.5	23.3	27.0	22.0	19.9
0.34	0.29	0.19	-0.03	-0.98	-0.14
0.95	0.80	0.50	-0.11	-2.42	-0.43
A2	A2	B6	A2	B4	C3
22.5	22.9	27.0	23.4	25.7	19.7
0.29	0.19	0.00	0.04	-0.04	0.07
0.80	0.53	0.00	0.06	-0.13	0.13
A2	B6	A2	B4	A3	C0
23.3	27.0	23.6	26.5	19.5	16.5
0.19	0.00	-0.94	-0.02	0.21	0.22
0.50	0.00	-2.30	-0.06	0.54	0.60
B6	A2	B4	A3	C0	
27.0	23.4	26.5	19.7	18.0	
-0.03	0.04	-0.02	0.16	0.26	
-0.11	0.06	-0.06	0.42	0.69	
A3	B4	A3	C0		
22.0	25.7	19.5	18.0		
-0.98	-0.04	0.21	0.26		
-2.42	-0.13	0.54	0.69		
C4	C3	C0			
19.9	19.7	16.5			
-0.14	0.07	0.22			
-0.43	0.13	0.60			

집합체 Type
ARO, 연소도 [MWD/kgU]
5% 삽입 편차[%]
10% 삽입 편차[%]

제어봉 삽입율에 따른 집합체 평균연소도 비교



노심 축방향 평균연소도 비교

4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

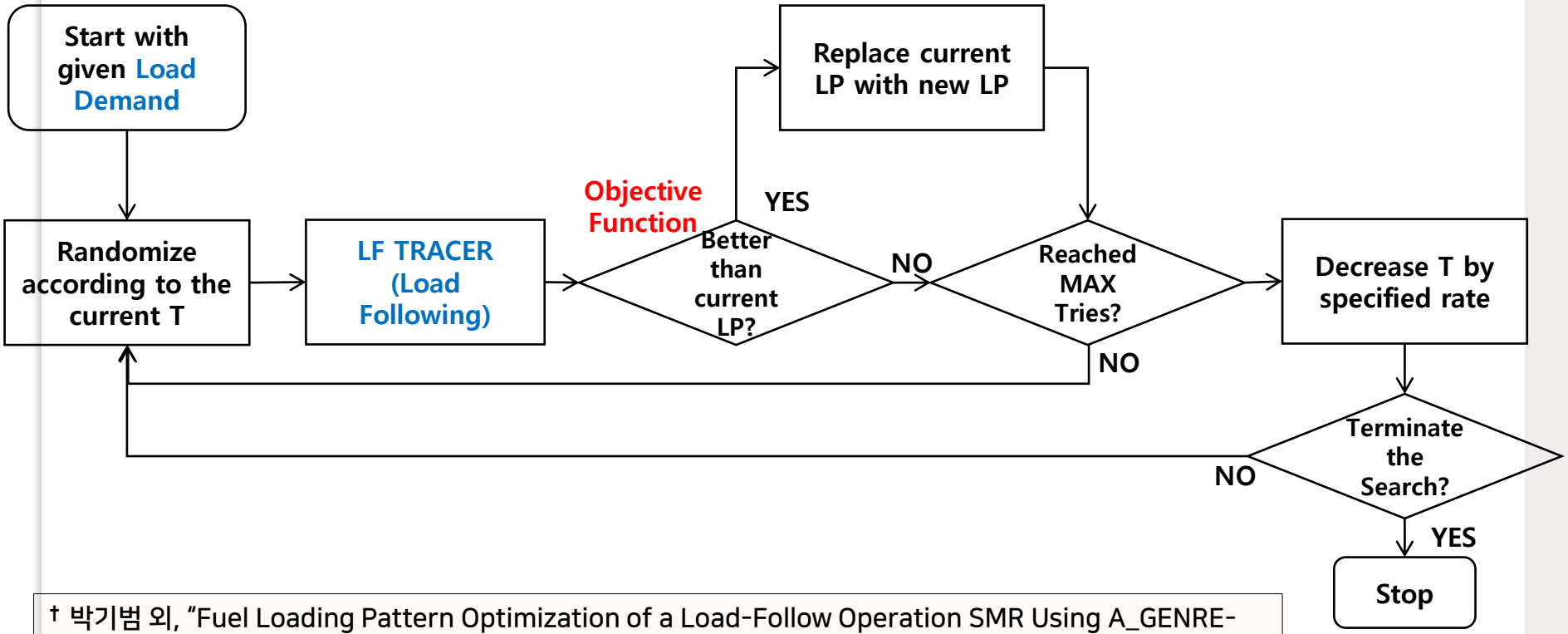
노심장전모형 최적화 전산 프로그램 소개

GENRE-LP 프로그램 : 모의냉각법 기반의 SMR용 노심장전모형 최적화 프로그램

- 주어진 핵연료집합체를 활용하여 사용자선정 변수(복수개)를 최적화하는 프로그램

A_GENRE-LP† 프로그램 : 부하추종 고려 SMR용 노심장전모형 최적화 프로그램

- 주어진 핵연료집합체를 활용하여 사용자선정 변수(복수개, 부하추종관련 변수 추가)를 최적화하는 프로그램



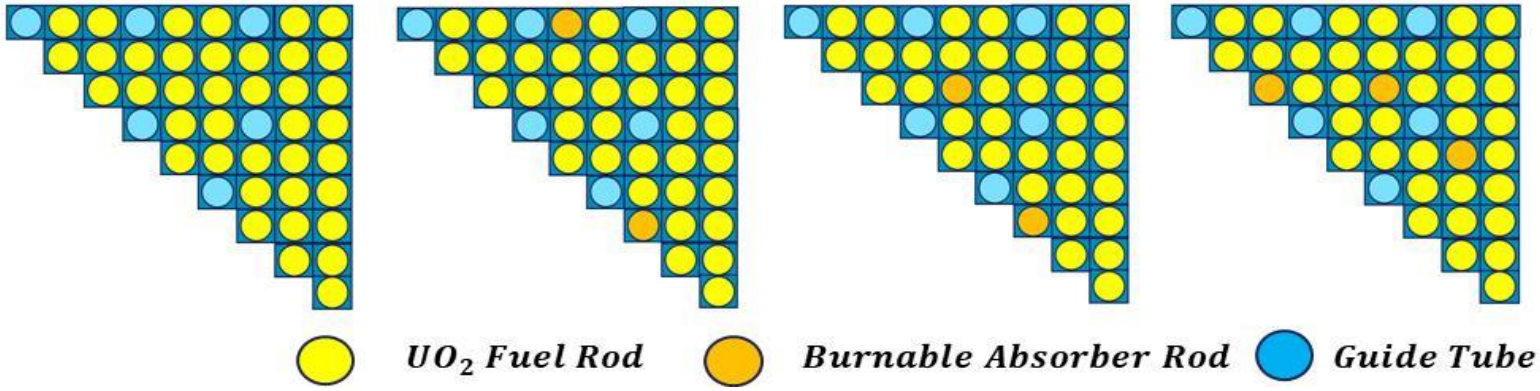
† 박기범 외, "Fuel Loading Pattern Optimization of a Load-Follow Operation SMR Using A_GENRE-LP," 2022 KNS 추계학술대회 논문집.

4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

부하추종 고려 핵연료집합체 최적화 전산 프로그램 및 통합 최적화 프로그램 소개

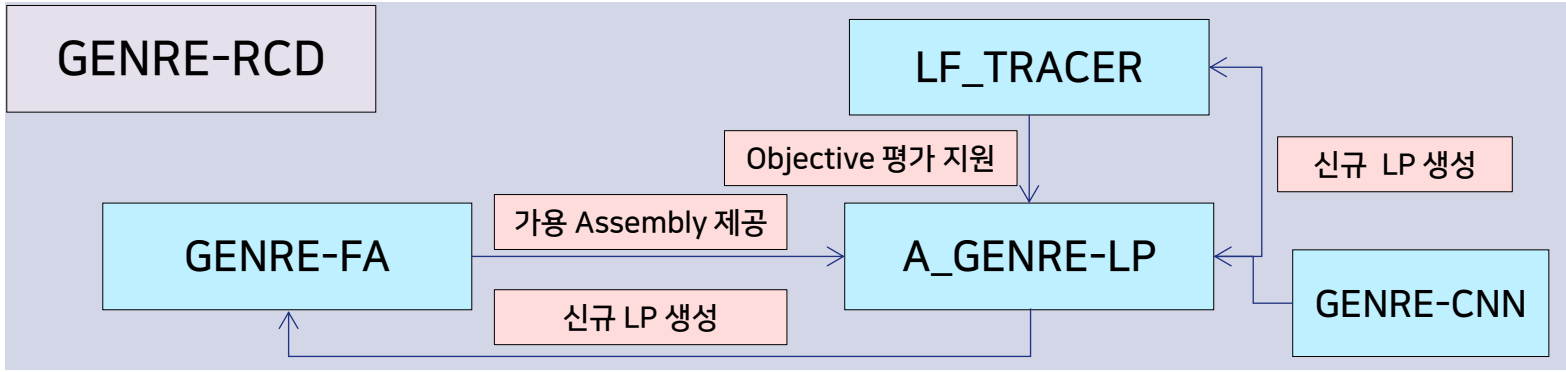
GENRE-FA 프로그램 : 모의냉각법 기반의 핵연료집합체 배치 선정 프로그램

- Lattice Analysis 단계에서의 BAR 배치(농축도) 및 연료농축도 선정 프로그램
  - BAR 개수, 배치, 농축도(Gd_2O_3 또는 B_4C 등), 연료농축도 자동변동을 통한 사용자요구 k-inf 및 연소결과 생산



GENRE-RCD 프로그램 : 부하추종 고려 SMR용 노심장전모형 최적화 프로그램

- 부하추종 고려한 노심장전모형 최적화를 위하여 적절한 핵연료집합체를 생산하고(GENRE-FA), 생산된 집합체를 통하여 사용자선정 변수(복수개, 부하추종관련 변수 추가)를 최적화(A_GENRE-LP)하는 통합 계산 플랫폼



4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

탄력운전 고려 장전모형 최적화 해석 결과

출력준위에 따른 최적 장전모형 생산 결과 (GENRE-LP 결과)

계산조건 : ARO 시 50% ~ 90% 출력 일 경우

A2	A2	A2	B6	A3	C4	R1
A2	A2	B6	A2	B4	C3	R1
A2	B6	A2	B4	A3	C0	R2
B6	A2	B4	A3	C0	R3	R4
A3	B4	A3	C0	R3	R6	
C4	C3	C0	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Reference LP

A2	A2	A2	B4	C4	A3	R1
A2	A2	B4	A3	C4	A3	R1
A2	B4	A2	B4	B4	C0	R2
B4	A3	B4	A2	C0	R3	R4
C4	C4	B4	C0	R3	R6	
A3	A3	C0	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate LP (50% Power)

A2	A2	A2	B4	C4	A3	R1
A2	A2	B4	A2	B6	C0	R1
A2	B4	A2	B4	C4	A3	R2
B4	A2	B4	A3	C0	R3	R4
C4	B6	C4	C0	R3	R6	
A3	C0	A3	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate LP (70% Power)

A2	A2	A2	B4	A3	C3	R1
A2	A2	B4	A3	C4	B4	R1
A2	B4	A2	B4	C4	A3	R2
B4	A3	B4	A3	C0	R3	R4
A3	C4	C4	C0	R3	R6	
C3	B4	A3	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate LP (90% Power)

출력준위	50%		70%		90%	
주요변수	기존	Candidate	기존	Candidate	기존	Candidate
주기 길이(EFPD)	927.3	947.2	911.1	931.7	897.1	923.2
Fr / Fq	1.487 / 1.862	1.484 / 1.849	1.479 / 1.845	1.469 / 1.834	1.500 / 1.885	1.477 / 1.855
A 연소도(GWD/MTU)	25.57	25.97	25.13	25.64	25.01	25.56
BP 개수	1096	1048	1096	1096	1096	1176

4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

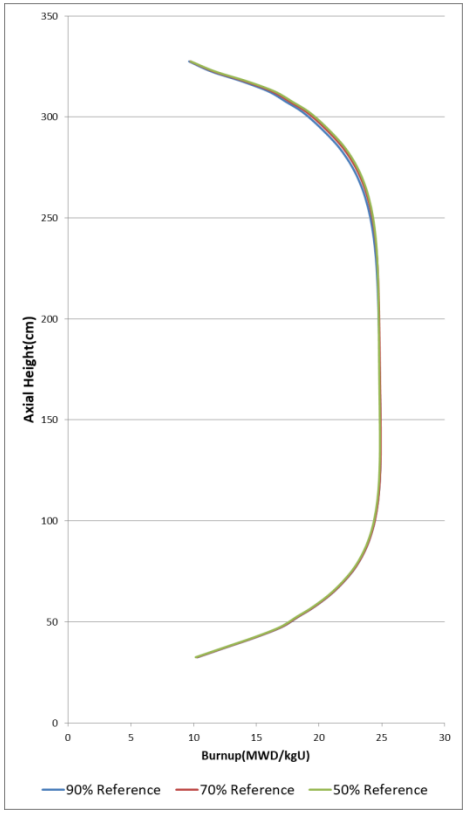
탄력운전 고려 장전모형 최적화 해석 결과

출력준위에 따른 최적 장전모형 생산 결과 (GENRE-LP 결과)

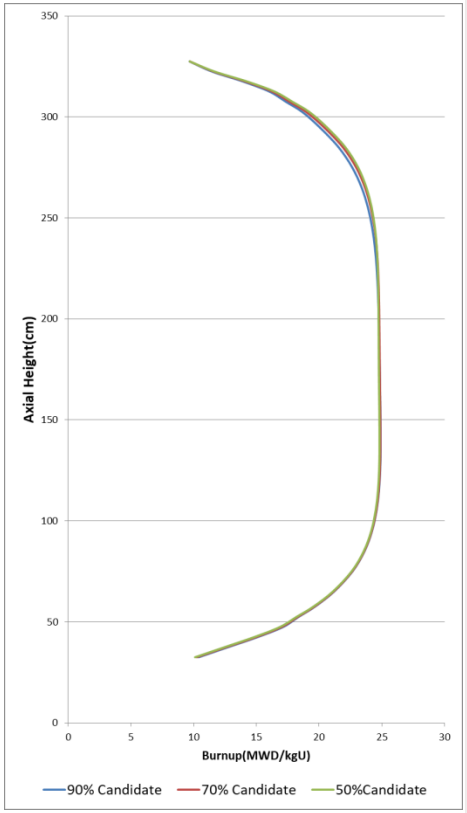
- 계산조건 : ARO 시 50% ~ 90% 출력 일 경우
  - 반사체 효과 확인 필요, 축방향 온도 분포 확인 필요

A2	A2	A2	B6	A3	C4
21.438	22.008	23.012	26.963	22.099	20.183
21.675	22.218	23.140	26.966	22.075	20.047
21.829	22.342	23.181	26.868	21.971	19.845
A2	A2	B6	A2	B4	C3
22.008	22.462	26.826	23.333	25.917	20.075
22.218	22.634	26.889	23.382	25.820	19.935
22.342	22.720	26.851	23.344	25.633	19.731
A2	B6	A2	B4	A3	C0
23.012	26.826	23.392	26.519	19.482	16.700
23.140	26.889	23.467	26.498	19.476	16.627
23.181	26.851	23.453	26.382	19.399	16.501
B6	A2	B4	A3	C0	
26.963	23.333	26.519	19.665	18.058	
26.966	23.382	26.498	19.688	18.029	
26.868	23.344	26.382	19.639	17.940	
A3	B4	A3	C0		
22.099	25.917	19.482	18.058		
22.075	25.820	19.476	18.029		
21.971	25.633	19.399	17.940		
C4	C3	C0			
20.183	20.075	16.700			
20.047	19.935	16.627			
19.845	19.731	16.501			

집합체 Type	
50% 출력, 연소도	MWD/kgU
70% 출력, 연소도	
90% 출력, 연소도	



Reference LP (50~90%)



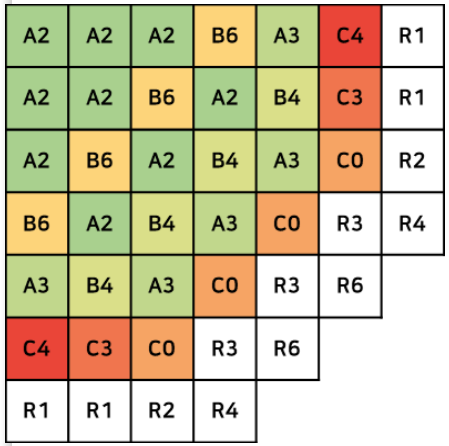
Candidate LP (50~90%)

4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

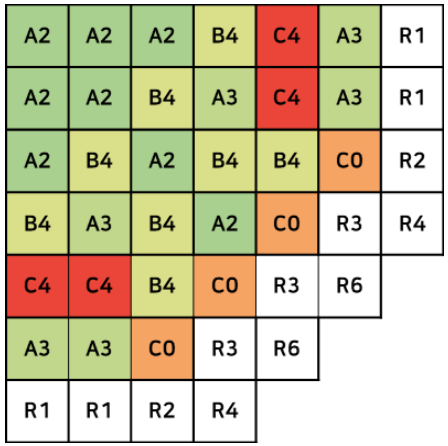
탄력운전 고려 장전모형 최적화 해석 결과

제어봉 삽입 정도에 따른 최적 장전모형 생산 결과 (GENRE-LP 결과)

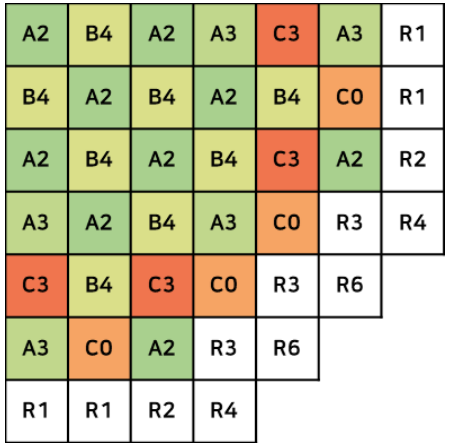
계산조건 : 50% 출력일 경우 제어봉 삽입정도 (0% ~ 20%)



Reference LP



Candidate LP (0% Insertion)



Candidate LP (10% Insertion)

Candidate LP (20% Insertion)

제어봉 삽입율(%)	0		10		20	
주요변수	기존	Candidate	기존	Candidate #1	기존	Candidate
주기 길이(EFPD)	927.3	947.2	878.09	904.79	867.59	879.64
Fr / Fq	1.487 / 1.862	1.484 / 1.849	1.404 / 1.948	1.422 / 1.875	1.410 / 2.10	1.486 / 2.099
A 연소도(GWD/MTU)	25.57	25.97	24.75	24.98	24.13	24.26
BP 개수	1096	1048	1096	968	1096	1096

4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

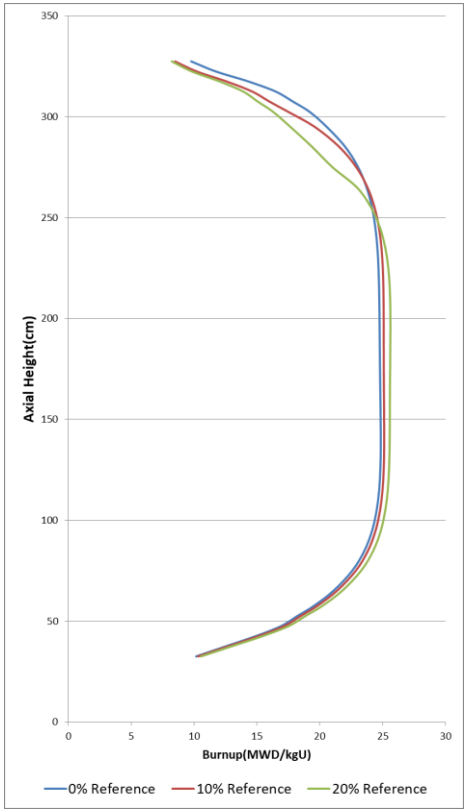
탄력운전 고려 장전모형 최적화 해석 결과

제어봉 삽입 정도에 따른 최적 장전모형 생산 결과 (GENRE-LP 결과)

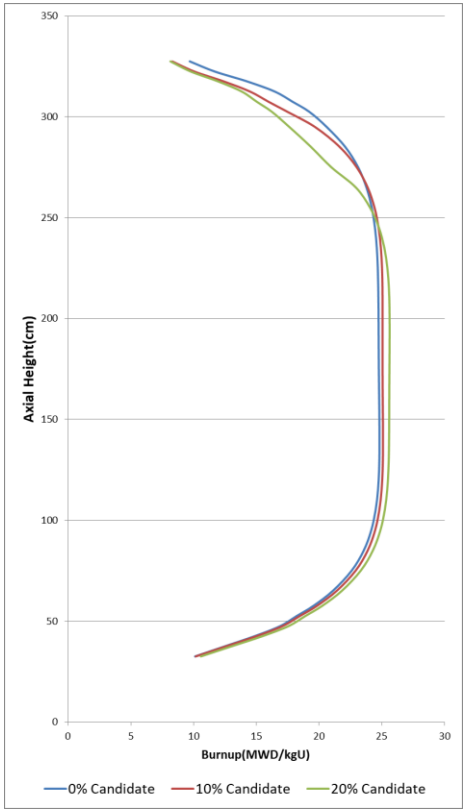
- 계산조건 : 50% 출력일 경우 제어봉 삽입정도 (0% ~ 20%)
  - 제어봉 위치 확인 필요

A2	A2	A2	B6	A3	C4
21.438	22.008	23.012	26.963	22.099	20.183
21.645	22.187	23.129	26.933	21.543	20.095
21.982	22.474	23.304	26.879	20.778	19.939
A2	A2	B6	A2	B4	C3
22.008	22.462	26.826	23.333	25.917	20.075
22.187	22.581	26.823	23.349	25.884	20.105
22.474	22.770	26.818	23.359	25.822	20.127
A2	B6	A2	B4	A3	C0
23.012	26.826	23.392	26.519	19.482	16.700
23.129	26.823	22.830	26.505	19.592	16.805
23.304	26.818	22.048	26.476	19.752	16.956
B6	A2	B4	A3	C0	
26.963	23.333	26.519	19.665	18.058	
26.933	23.349	26.505	19.751	18.188	
26.879	23.359	26.476	19.877	18.386	
A3	B4	A3	C0		
22.099	25.917	19.482	18.058		
21.543	25.884	19.592	18.188		
20.778	25.822	19.752	18.386		
C4	C3	C0			
20.183	20.075	16.700			
20.095	20.105	16.805			
19.939	20.127	16.956			

집합체 Type	
w/o CR 삽입, 연소도	MWD/kgU
CR 삽입 10%, 연소도	
CR 삽입 20%, 연소도	



Reference LP (0~20% Insertion)



Candidate LP (0~20% Insertion)

4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

일일부하추종 고려 장전모형 최적화 해석 결과

100%-50% 출력 감소 고려 장전모형 최적화 결과 (A_GENRE-LP 결과)

9시간 동안 100%-50% 출력감소

A2	A2	A2	B6	A3	C4	R1
A2	A2	B6	A2	B4	C3	R1
A2	B6	A2	B4	A2	C0	R2
B6	A2	B4	A3	C0	R3	R4
A3	B4	A2	C0	R3	R6	
C4	C3	C0	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate #1

A2	A2	A3	B6	A2	C4	R1
A2	A3	B4	A3	C4	C3	R1
A3	B4	A2	B4	B4	A2	R2
B6	A3	B4	A3	C0	R3	R4
A2	C4	B4	C0	R3	R6	
C4	C3	A2	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate #2

A2	A3	B6	A2	A3	C4	R1
A3	A3	A2	B4	B4	C3	R1
B6	A2	A2	B4	A3	C0	R2
A2	B4	B4	A2	C4	R3	R4
A3	B4	A3	C4	R3	R6	
C4	C3	C0	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate #3

주요변수	기존	Candidate #1	Candidate #2	Candidate #3
주기 길이(EFPD)	868.1	872.0	871.6	863.1
Fr / Fq	1.463 / 1.876	1.405 / 1.848	1.497 / 1.877	1.454 / 1.880
제어봉 이동 스텝 수	105	97	97	98
A 연소도(GWD/MTU)	24.12	24.10	24.36	24.12
BP 개수	1096	1064	1176	1176

4 부하추종 고려 노심장전모형 최적화

일일부하추종 고려 장전모형 최적화 해석 결과

100%-50% 출력 감소 고려 장전모형 최적화 결과 (A_GENRE-LP 결과)

- 12시간 동안 100%-50%-100% 출력 증감

A2	A3	A2	B4	A2	C4	R1
A3	A3	B6	A2	B4	C3	R1
A2	B6	A2	B4	A3	C0	R2
B4	A2	B4	A3	C0	R3	R4
A2	B4	A3	C0	R3	R6	
C4	C3	C0	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate #1

A2	A2	A2	B6	A2	C3	R1
A2	A3	B4	A2	B4	C4	R1
A2	B4	A2	B6	C3	C0	R2
B6	A2	B6	A3	A3	R3	R4
A2	B4	C3	A3	R3	R6	
C3	C4	C0	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate #2

A2	A2	A3	A3	A2	C3	R1
A2	A3	B4	A2	B6	C3	R1
A3	B4	A2	B4	C4	C0	R2
A3	A2	B4	B4	A3	R3	R4
A2	B6	C4	A3	R3	R6	
C3	C3	C0	R3	R6		
R1	R1	R2	R4			

Candidate #3

주요변수	기존	Candidate #1	Candidate #2	Candidate #3
주기 길이(EFPD)	868.1	871.8	884.3	883.0
Fr / Fq	1.463 / 1.876	1.446 / 1.863	1.491 / 1.888	1.455 / 1.891
제어봉 이동 스텝 수	251	229	238	231
A 연소도(GWD/MTU)	24.12	24.19	24.66	24.25
BP 개수	1096	1080	1208	1192

5 결론 및 제언

5 결론 및 제언

- 국내 가압경수형 기반 중소형원자로는 적어도 노심 측면에서는 부하추종능을 갖추고 있다.
- 국내 가압경수형 기반 중소형원자로는 계통 관점에서는 최소요구출력에 대한 추가연구가 필요하다.
- 제어봉 등의 제어수단의 제어전략(활용전략)에 따라 부하추종 성능은 변하게 된다.
- 전출력운전 및 전제어봉인출을 기반으로 한 노심최적화 설계에 대한 재고가 필요하다.
- 부하추종 시뮬레이션 분석 결과는 설계에 반영되어야 한다.

ABOUT

FNC

㈜미래와도전

FNC Technology Co., Ltd.

미래와도전 본사

16954 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13, 32층
(영덕동, 흥덕아이티밸리 타워동)
+82-31-8065-5114

대전 지사

대전광역시 유성구 대덕대로 593, 10층 1004-1호
(도룡동, 대덕테크비즈센터)
+82-42-867-5114

미래에너지기술연구소 본관

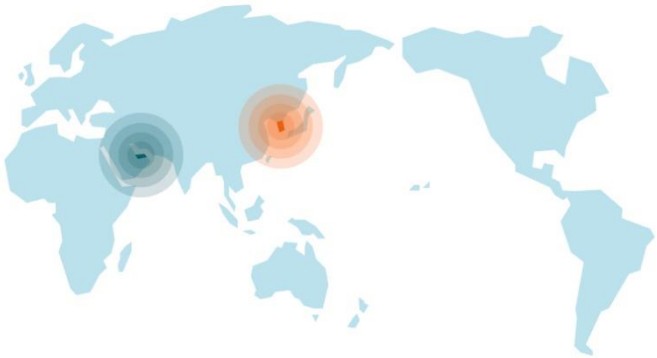
경기도 용인시 기흥구 탑실로 46,
미래에너지기술연구소 본관
+82-31-8005-5618

미래에너지기술연구소 신관

경기도 용인시 기흥구 탑실로 44,
미래에너지기술연구소 신관
+82-31-8005-8236

UAE 아부다비 지사

#2335, Sky Tower, Al Reem Island PO Box 5101041,
Abu Dhabi, UAE
+971-2-406-9719



THANK YOU

FNC TECHNOLOGY CO., LTD.