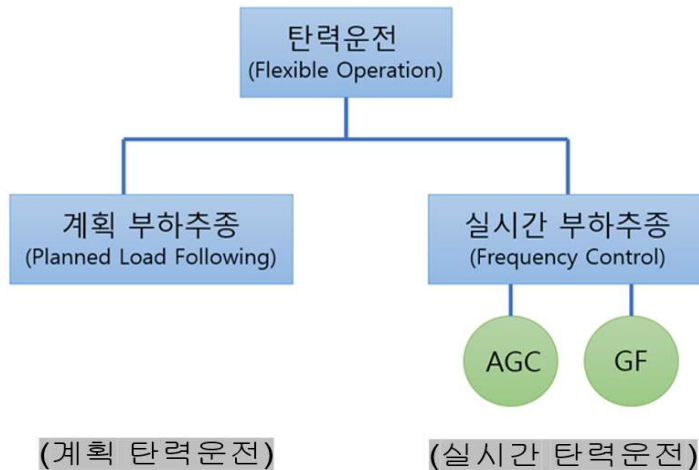




중장기 원전 탄력운전 추진계획

한국수력원자력(주)
연 료 실

탄력운전의 정의



1) 계획 탄력운전 (Planned Load Follow)

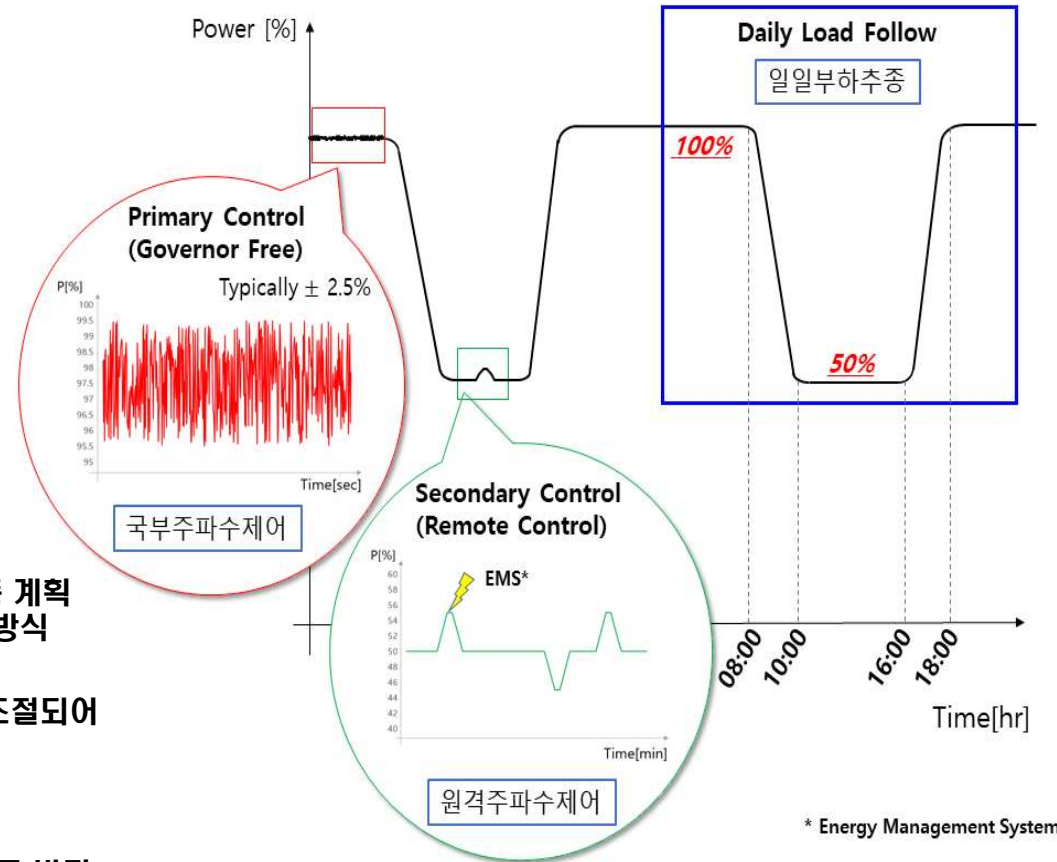
- 전력거래소가 1일전에 출력증감발, 출력 유지기간 등 계획을 수립하여 발전소에 요구하고 발전소가 운전하는 방식

2) 국부주파수제어(GF, Governor Free)

- 실시간 계통주파수를 추종하여 발전기 출력이 자동조절되어 주파수가 일정하게 유지되도록 운전하는 방식
- 약 $\pm 3\%$ 출력변화에 대응

3) 자동발전제어(AGC, Automatic Generation Control)

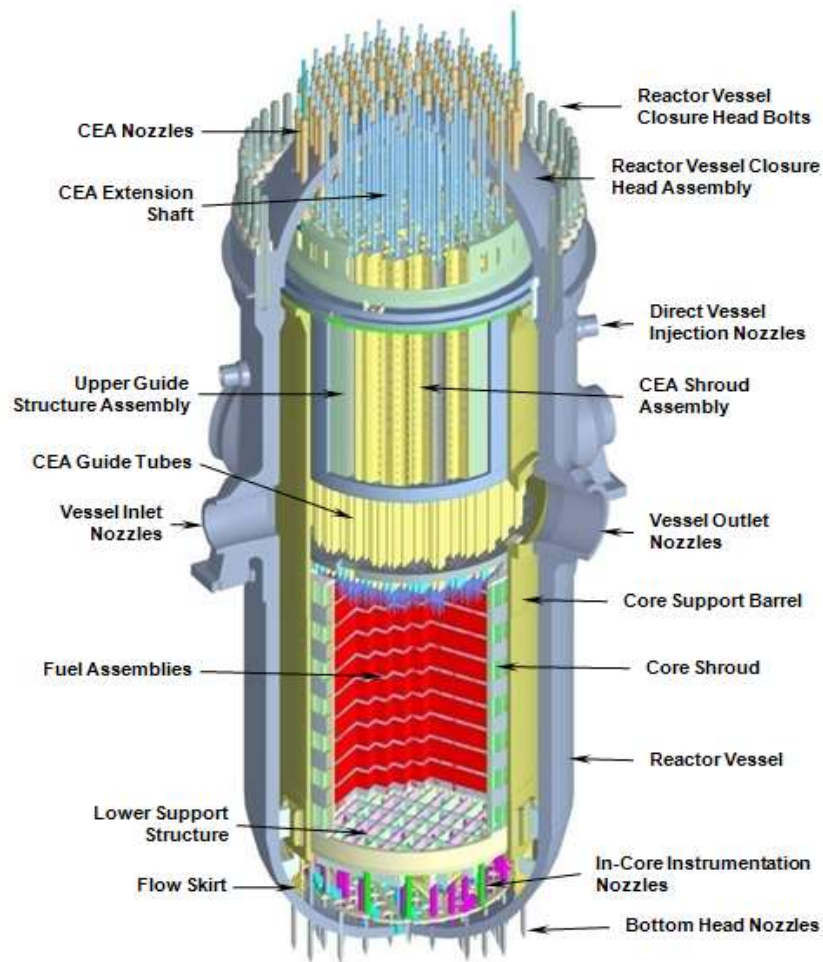
- 전력계통운영시스템(EMS)에서 보내는 원격제어신호로 발전기의 출력을 수분 이내로 자동으로 증감발하는 운전 방식
- 약 $\pm 5\sim 10\%$ 정도의 출력변화에 대응
- 국내외 외부에서의 원격출력제어 불가



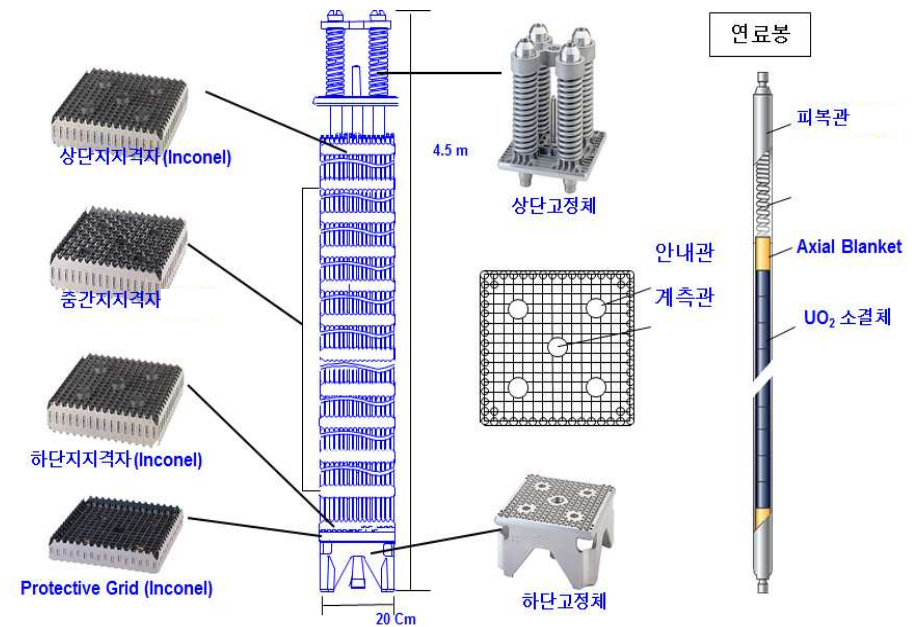
* Energy Management System

* Non-basedload Operation in Nuclear Power Plants: Load Following and Frequency Control Modes of Flexible Operation, IAEA Nuclear Energy Series(no. NP-T-3.23)

원자로 노심 및 연료 제원



< 원자로 구성 >



< 연료집합체 제원에서 >

✓ 연료집합체 : 약 4.5m x 20cm x 20 cm

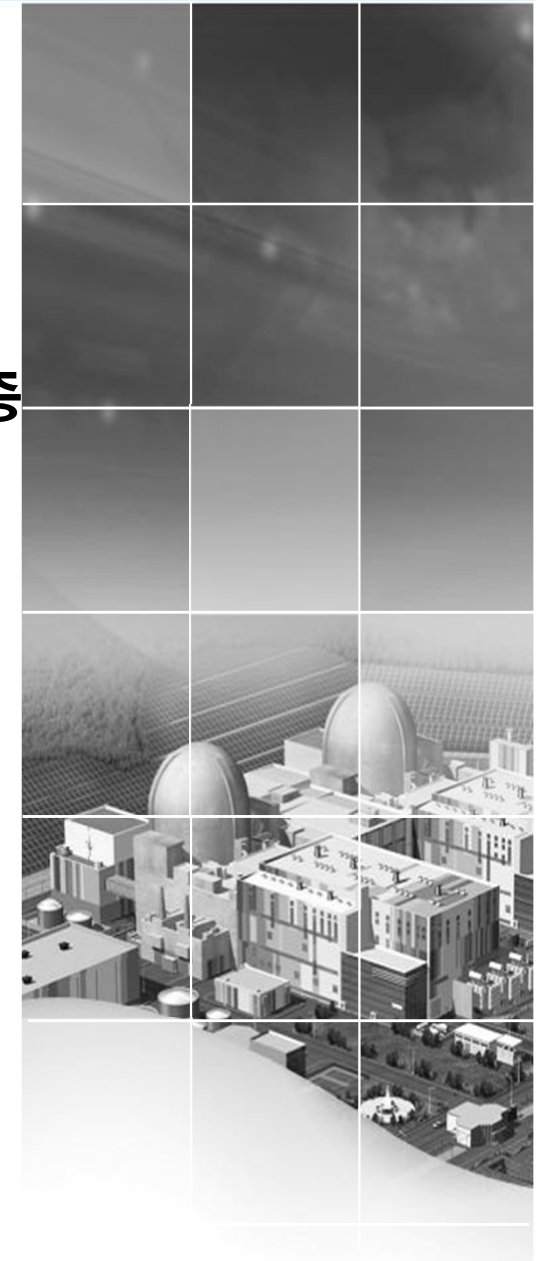
✓ 연료봉 : 1개의 연료집합체 236개봉

✓ 노심 : APR1400(연료 241다발로 구성) , OPR1000(연료 177다발로 구성)

✓ 제어봉 구성 : APR1400(93개 제어봉 집합체), OPR1000(73개 제어봉 집합체)



- ① 전력계통 환경변화에 따른 원전 출력감소운전 현황
- ② 중장기 전력수급 기본계획에 따른 원전 및 신재생 비중
- ③ 원전의 출력 증감발 유연성을 제한하는 요인
- ④ 전력계통 유연성 향상을 위한 탄력운전 확대 방향
- ⑤ 기타



1. 전력계통 환경변화에 따른 원전 출력감소운전 현황

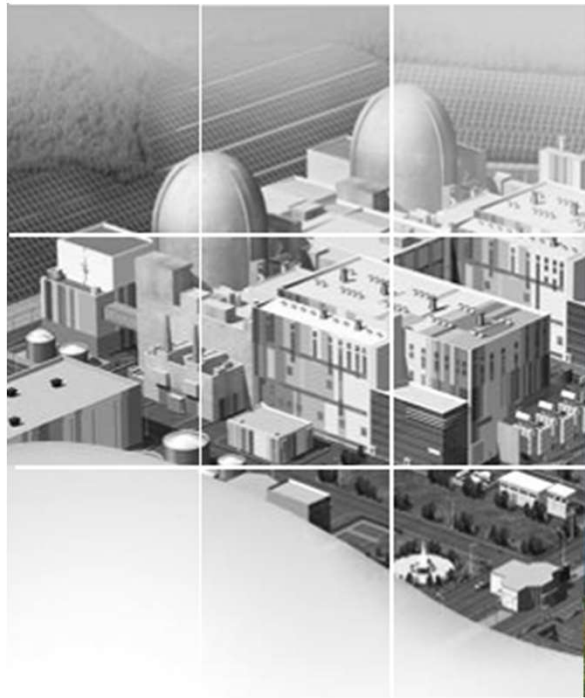


재생e(태양광 등) **증가**에 따라 **경부하기간**(봄·가을) 원전 출력감소운전 요구 증가 中

◆ **(전력수요)** 태양광e 급증으로 최저 전력수요 감소 中

◆ **(과거)** '22년까지 연중 최저 전력수요는 명절 연휴

◆ **(현재)** 명절 연휴, 태양광 이용률이 높은 봄가을 주말('23년 봄 경부하기간 출력감소운전 5회)



1. 전력계통 환경변화에 따른 원전 출력감소운전 현황



(대응프로세스) 경부하기간 원전 출력감소 대응프로세스 수립 및 절차서 운영중

- 전력거래소 출력감소요청에 대해 대응 프로세스를 마련하여 체계적 출력감소운전 이행중(' 23 ~)
- 감소 대상호기 선정기준, 호기별 노심연소도, 저출력누적연소도 및 출력감소 가능일수 산정 등

출력감소 대상 원전 지정

출력감소운전 준비

- 출력감소 발전소(호기) 선정
- 노심반응도 및 출력분포 제어전략 수립
- 출력감소운전 전 설비건전성 확인
- 출력감소운전 수행 및 이력 기록

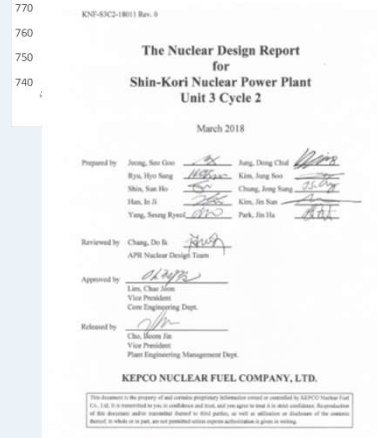
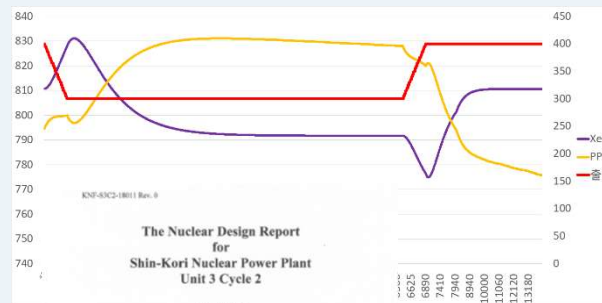
표준지침서

지침서 번호	표준지침-2023-01	개정번호	01
제 목	원전 출력감소운전 운영		

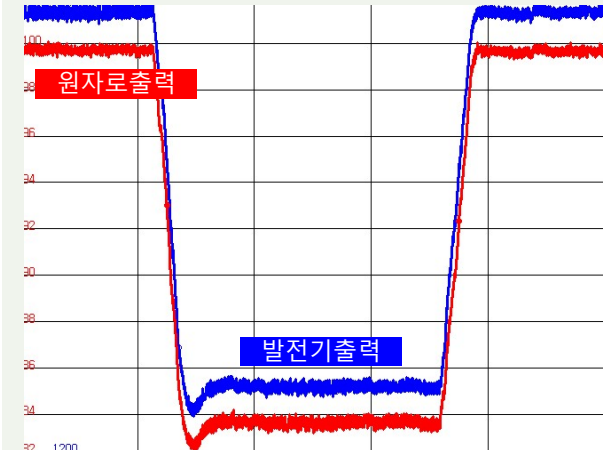
관련절차서/지침서 개정(작성/폐기) 유무 검토 ○ 유 ● 무

문서번호	제 목	작성부서	비 고

지정된 원전은 준비 상태 유지



출력감소 이행



새울원자력 제1발전소 운영절차서

절차서 번호	종합-3003-02	개정번호	19
제 목	(3호기용)100%출력에서 25%까지 출력감소		

2. 중장기 전력수급 기본계획에 따른 원전 및 신재생 비중



향후 전력망 구성

제 10차 전력수급 기본계획(2022~2036)의 향후 원전 및 신재생 설비용량

< 연도별 전원구성(연말 정격용량 기준) 전망 (단위 : GW) >

연도	구분	원자력	석탄	LNG	신재생	양수	기타	계
2023	용량	26.1	40.2	43.5	32.8	4.7	1.1	148.4
	비중	17.5%	27.1%	29.3%	22.1%	3.2%	0.8%	100%
2026	용량	28.9	37.6	52.4	44.8	4.7	0.7	169.1
	비중	17.1%	22.2%	31.0%	26.5%	2.8%	0.4%	100%
2030	용량	28.9	31.7	58.6	72.7	5.2	0.9	198.0
	비중	14.6%	16.0%	29.6%	36.7%	2.6%	0.5%	100%
2033	용량	31.7	29.7	62.0	91.5	5.8	0.9	221.6
	비중	14.3%	13.4%	28.0%	41.3%	2.6%	0.4%	100%
2036	용량	31.7	27.1	64.6	108.3	6.5	0.8	239.0
	비중	13.2%	11.3%	27.0%	45.3%	2.7%	0.5%	100%

* 기타는 유류, 폐기물, 부생가스 설비, 기타 저장장치 등

- ✓ 신재생 에너지의 경우 전체 설비의 약 60%가 태양광에너지로서 구성되어 설비용량 대비하여 피크 기여도가 낮아 전력계통 안정성 확보를 위한 원전의 탄력운전 확대 필요성 증대

2. 중장기 전력수급 기본계획에 따른 원전 및 신재생 비중



향후 전력망 구성

제 10차 전력수급 기본계획(2022~2036) 전원별 발전량 비중 전망

< 전원별 발전량 비중 전망 (단위: TWh) >

연도	구분	원자력	석탄	LNG	신재생	수소 암모니아	기타	계
'30년	발전량	201.7	122.5	142.4	134.1	13.0	8.1	621.8
	비중	32.4%	19.7%	22.9%	21.6%	2.1%	1.3%	100%
'36년	발전량	230.7	95.9	62.3	204.4	47.4	26.6	667.3
	비중	34.6%	14.4%	9.3%	30.6%	7.1%	4.0%	100%

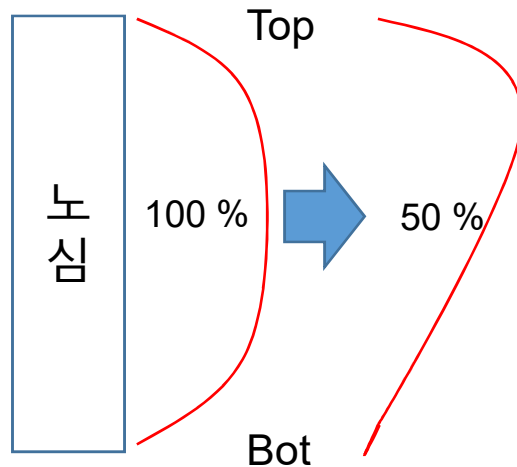
3. 원전의 출력 증감발 유연성을 제한하는 요인

탄력운전 확대를 위하여 개선이 필요한 사항

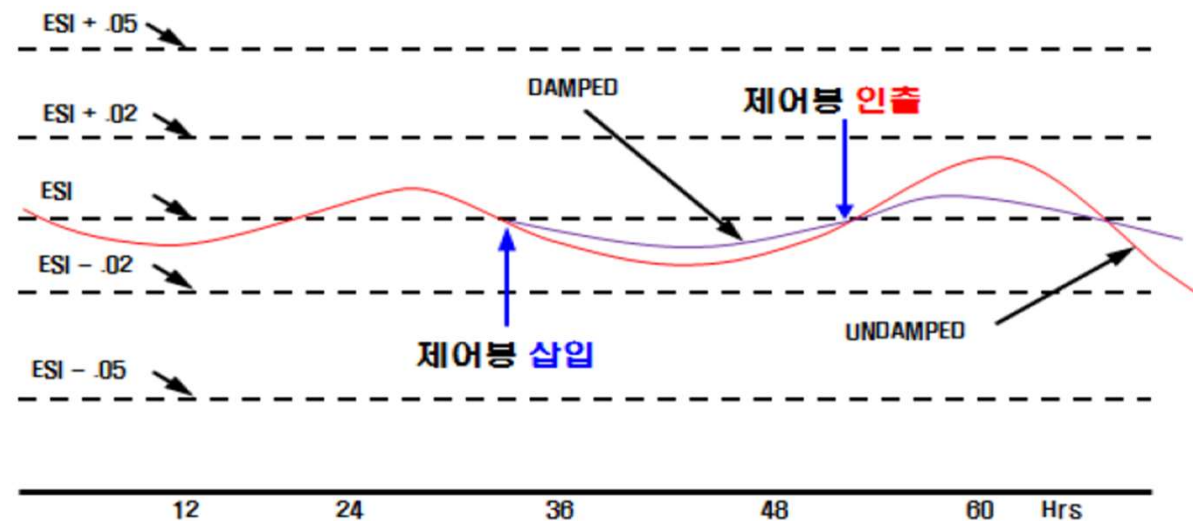
① 現 전출력 운전에 최적화된 노심설계에 따라 안전성분석 범위 內 출력감소 실시

- ✓ 출력감소운전시 전출력 기준 축방향출력분포(ASI*)의 5%(± 0.05) 내외 유지필요
- ✓ ASI 제어를 위하여 상시 제어봉 사용이 필요하게 되어, 제어봉 성능개선 필요

* 축방향출력편차(ASI, Axial Shape Index)란 노심의 하부출력에서 노심의 상부출력을 뺀 값을 노심전체 출력으로 나눈 값을 말하며, ESI(Equilibrium Shape Index)란 원자로출력이 안정된 상태에서의 ASI 값을 말한다.



축방향출력분포



축방향 출력분포를 제어를 위한 제어봉 사용

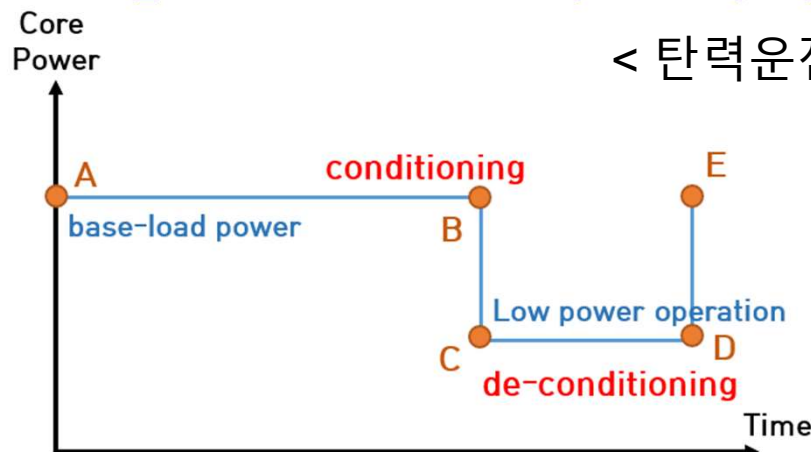
3. 원전의 출력 증감발 유연성을 제한하는 요인

탄력운전 확대를 위하여 개선이 필요한 사항

② 잦은 출력증감발에 따른 핵연료 건전성(PCI*)에 대한 평가 필요

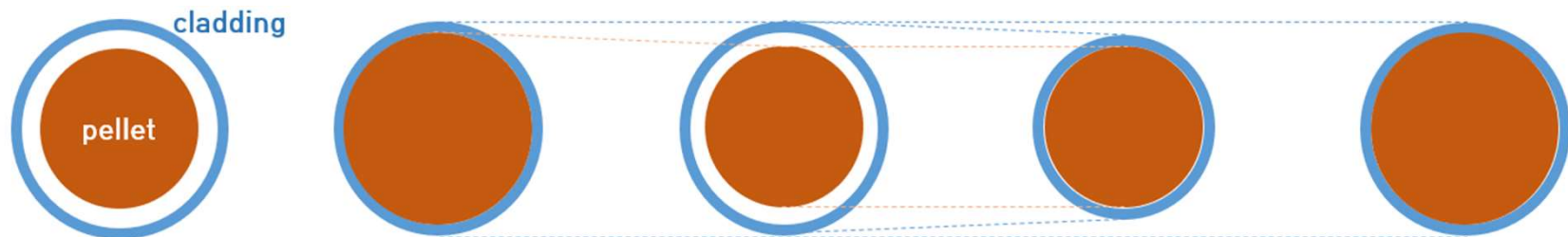
** PCI(Pellet-Cladding Interaction)이란 피복재 및 소결체 접촉에 따른 응력으로 피복재가 손상되는 현상

- ✓ 현재 출력상승률 제한을 통해 PCI 예방(경수로 원전 출력증/감발률 제한)
- ✓ 출력상승률을 높여도 PCI가 발생하지 않는다는 핵연료 측면에서의 건전성 입증필요



< 탄력운전과 PCI >

- 전출력 운전으로 소결체 팽창(B)
- 전출력에서 출력이 감소(저출력 운전)하면 소결체 수축(C)
- 저출력 운전이 지속되면, 피복관 수축(D)
- Deconditioning에 의해 저출력 운전 직전 전출력(B)보다 저출력 운전 직후 출력 복귀(E)에서의 피복관 응력이 더 큼



A. 신연료 장전

B. Conditioning

C. 저출력 운전

D. Deconditioning

E. 전출력 복귀

(소결체-피복관 접촉) (소결체-피복관 갭 발생) (소결체-피복관 갭 감소)

3. 원전의 출력 증감발 유연성을 제한하는 요인



계획 탄력운전 기술성능 및 기술적인 제한 사항

❖ 계획탄력운전(Planned Load Following) 기술 성능

- 20% 까지의 출력변화(100-80-100%)
- 80% 출력에서 통상 40일간 가능하나 태풍, 산불, 발전소 과도상태를 고려하여 약 27일 운영
- 출력감소률은 3%/hr 또는 긴급요청 시 10%/hr
- 출력증가율은 최대 3%/hr로 제한

❖ 기술적인 제한 사항

- (설계분야) 100% 출력용 교체노심설계방법론에 따른 출력감소 노심운전지침 준용
- (운영기술지침서) 제어봉 삽입한계 누적시간 등에서 개선 필요
 - (제어봉 삽입허용 누적시간) 탄력운전 시 운영기술지침서 불만족 예상
- (운전지원분야) 100% 자료(핵설계보고서:NDR)로 제어훈련, ASI 제어를 위한 감시 및 예측 프로그램 미흡, 탄력운전을 위한 운전절차 부재
- (주파수제어) 국부주파수제어(GF) 운전을 위한 발전기 특성자료 미반영

4. 전력계통 유연성 향상을 위한 탄력운전 확대 방향



- (한수원) ① 現원전의 안전성 확보 범위 내에서 전력당국 요구 수용,
② 향후 기술개발로 탄력운전 기술 도입 및 운영

단기 부분 탄력운전

경부하 기간 출력감소운전 확장을 위한
노심운전지침 개발 추진

2024. 6.



중장기 탄력운전 실증

『 원전 탄력운전 기술개발 추진 』

2025. 3

탄력운전 기술개발 방향

노심의 장기 운영 방향과
연계한 탄력운전 기술개발

- 사고저항성핵연료
- High Burn-up
- 농축도 상향

4. 전력계통 유연성 향상을 위한 탄력운전 확대 방향 (단기)

(단기) 봄·가을 경부하 기간 원전의 유연성 향상

※ 제어봉 등 설비개선을 하지않는 범위에서 즉, 기존 설비를 활용하여 경부하 기간 저출력 운전 반영을 위한
노심설계방법개선 및 노심안전성 재평가

단기방안

① 출력조절 범위 확대 ② 저출력 운전 시행일수 상향 ③ 출력조절 속도 상향

구분	현재 운영	단기 확대 내용(27년 ~)	비고
① 출력조절 범위	통상 80% 출력까지 감발	통상 70% 출력까지 감발	현수준 보다 10% 추가
② 시행 일수	통상 18개월당 27일 이내	통상 18개월당 100회 이내	현수준 보다 3~4배 확대
③ 출력조절 속도	통상 3%p/시간	10%p/시간 수준	

마일스톤

- ① 설계코드 이용한 3차원 노심출력분포 예측 프로그램을 개발 (~25년)
- ② 경부하기간 출력감소운전 지침 개발(~26년)
- ③ 발전소의 운영절차의 범위 내에서 출력 증가 및 감소율 제한치에 맞게 조정(~27)

4. 전력계통 유연성 향상을 위한 탄력운전 확대 방향(중장기)

(중장기) 원전 탄력운전 개발 및 적용으로 전력계통 운영 안전성 확보

※ 단기 추진과제와 병행하여 추진(2025 ~ 2035년)

중장기 방안 | 탄력운전 기술개발(1단계), 실증사업(2단계), 상용화 대상원전 확대(3단계)로 나누어 단계적 추진

구분	개발 목표	비고
출력조절 범위	<u>50% 출력</u> 까지 감발	2032년부터 순차적으로 적용 추진
시행 일수	<u>1년에 200회</u> 까지 가능	
출력조절 속도	최대 <u>30%p/시간</u> 까지 가능	

✓ 원전 수출경쟁력 제고를 위하여 유럽 탄력운전 성능요건(EUR)을 충족할수 있도록 개발

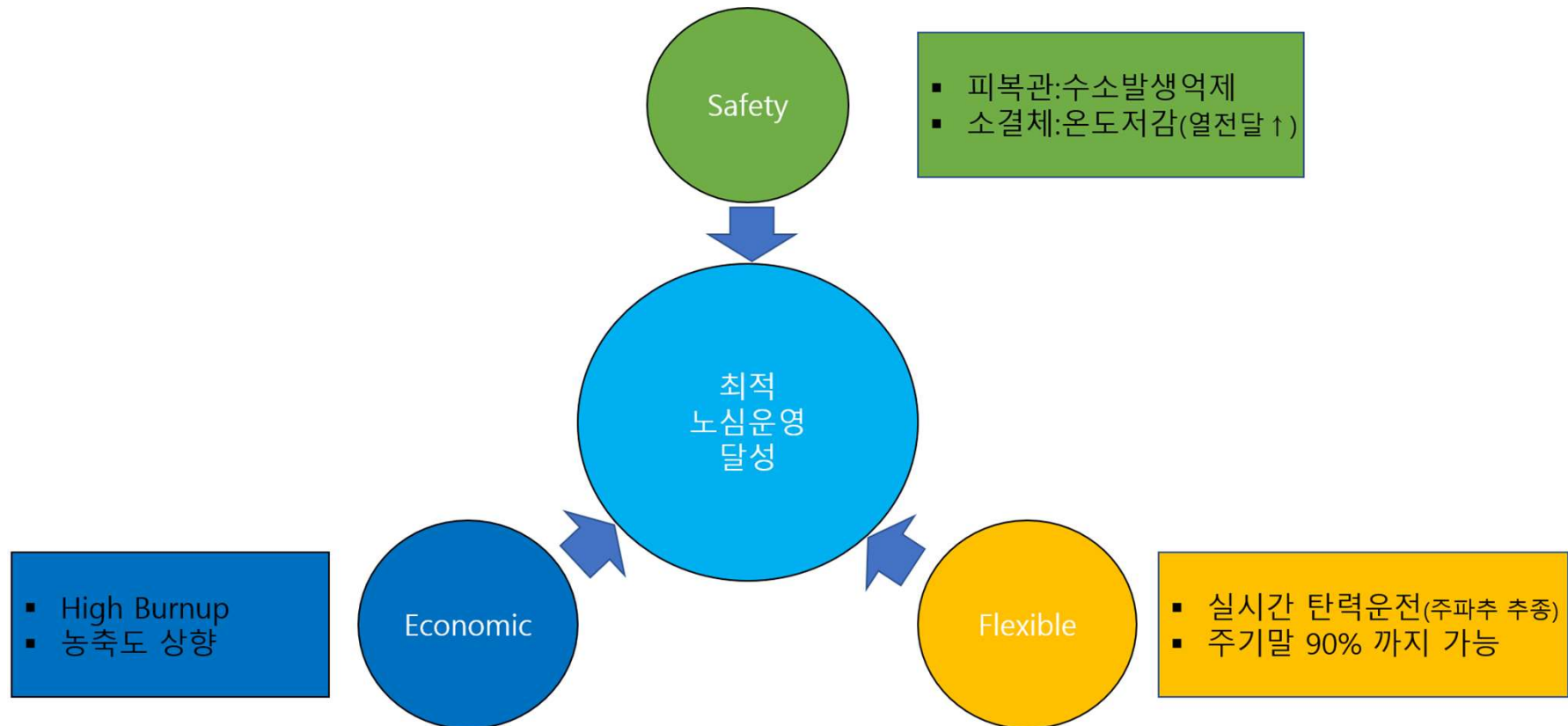
마일스톤

- ① 노심반응도 및 연료 감시체계 개발 / 탄력운전 절차 개발 (~28년)
- ② 탄력운전 기술개발에 대한 제어봉 등 설계변경, 인허가 신청 및 승인 (~31년)
- ③ 시범발전소 실증시험 이후 원전 순차적 적용(32~년)

4. 전력계통 유연성 향상을 위한 탄력운전 확대 방향

연료개발 및 장주기 운전과 탄력운전을 연계한 기술개발 방향

※ 안전성, 경제성, 유연성 확보로 원전의 미래 경쟁력 향상



- ✓ 사고저항성핵연료 개발시 탄력운전에 따른 PCI 성능 향상을 감안
- ✓ 탄력운전 기술개발시 연료 High Burnup 및 농축도 향상을 반영하여 평가

5. 기타 : 탄력운전 상용화 성공을 위한 제언



1. 탄력운전 상용화 추진 전담조직 구성

✓ 「탄력운전 상용화 중장기 로드맵」이행력 강화를 위하여 전담조직을 신설

- 탄력운전 기술개발, 인허가, 실증, 상용적용을 총괄할 한수원 및 기술개발 참여기관간 전담조직을 구성하여 기술개발 로드맵 실행력 강화
 - 실증 시범발전소에 대해 '29년 인허가 신청 및 '31년 인허가 취득
 - 실증(APR) 이후 가동원전은 순차적 확대 적용

2. 규제기관과의 충분한 논의

✓ 인허가 기간 장기화를 방지하기 위해 규제기관과의 소통

- 규제사항에 대한 정기적인 기술적 논의 및 협의로 인허가 적기 취득
- 탄력운전 기술에 대한 국내외 사례를 적극 활용하여 기술개발 단계에서 한수원 등 유관 기관(KNF, 한기, 두중, 중소기업, 학계) 및 심사기관 사전 논의 및 협의체 운영

감사합니다

Question?