

2016 추계원자력학회  
Workshop : 노물리 시험과 분석



# 노물리 시험 관련 Tech. Spec. 검토

2016.10.26

한국전력기술주식회사  
안전해석그룹

송인호



한국전력기술주식회사  
KEPCO ENGINEERING & CONSTRUCTION COMPANY, INC.

2016 추계원자력학회

## 목 차

1. 배경
2. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점
3. 제안

# I. 배경

## 1. 노심시험과 Tech. Spec. 연관성

### ◆ 노심시험

#### ❖ 노심시험의 목적

- 핵연료 및 노심관련 부품들이 설계한대로 제조, 설치되어 운전되는지 확인
- 노심설계에 사용된 설계코드의 계산의 정확성을 검증
- Tech. Spec. 운전제한조건 만족 여부를 확인함으로써 안전해석에 사용된 노물리 상수들의 보수성을 검증
- 운전원 훈련 및 운전절차 확인

#### ❖ OPR1000 및 APR1400에서의 노심시험 종류

- 전통적인 노물리 시험
  - 제어봉가 측정, 출력분포 측정, 반응도계수(예:ITC) 측정 등
- 노심보호/감시 계통(CPC/COLSS) 관련 변수의 측정 및 설정
  - 출력 및 유량 측정 및 교정, 출력분포관련 상수 설정

3

# I. 배경

## 1. 노심시험과 Tech. Spec. 연관성 [계속]

### ◆ Tech. Spec. (운영기술지침서) 연관성

#### ❖ 노심시험을 위한 LCO (Limiting Condition for Operation) 유예

- 정상적인 LCO 이내에서 시험이 불가능한 사항 존재
  - 예: 정지제어봉가 측정을 위해 임계 시 삽입이 허락되지 않은 제어봉 삽입
- Tech. Spec. 내에 STE (Special Test Exception) 항목으로 처리

#### ❖ 점검주기에 따른 노심시험 수행

- 매달 주기의 출력분포 측정
- 유량 측정 및 교정 등

4

# I. 배경

## 2. 검토 배경

### ◆ Tech. Spec. 및 노심시험 절차서 작성자의 경험

- ❖ Tech. Spec.의 정확한 의미 파악 미흡
- ❖ 기존 Tech. Spec. 변경에 대한 한계
- ❖ 한수원 노심시험 담당자의 질의

### ◆ NRC-DC 사업 및 BNPP 사업에서 질의

- ❖ NRC RAI (Request for Additional Information)
- ❖ FANR (UAE 인허가 기관) RAI 및 ENEC 질의
- ❖ NUREG-1432와의 차이점에 대한 집중 질의

● NUREG-1432 : CE형 원전의 표준 Tech. Spec. (현재 Rev. 04까지 발행)

5

# I. 배경

## 3. 검토 내용

### ◆ NUREG-1432와 신고리 3,4호기 운영기술지침서 비교

- ❖ 신고리 3호기는 가장 최근에 운영허가 취득
- ❖ 신고리 3호기는 FOAK(First-of-A-Kind) 원전으로 정의되어 기존호기와 다름. 이 부분은 NUREG-1432에 없는 항목이므로 비교하기 곤란하여 제외
- ❖ 노심시험과 관련된 항목에 국한
- ❖ 검토 내용은 개인적인 견해임

## 4. 검토 목적

- ◆ 국내 운영기술지침서 표준화
- ◆ BNPP 원전의 Tech. Spec. 원활한 적용 및 일관성있는 해석

6

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 1. LCO 3.1.10 : STE- Shutdown Margin

#### ● 신고리 3,4

가장 크게 평가된 제어봉가(실제로 인출된 해당 제어봉집합체) 이상의 정지반응도가 원자로정지를 위해 삽입 가능한 경우, 또는 가장 크게 평가된 제어봉가 이상의 반응도로 원자로가 미입계인 경우, 임계시험 중 또는 제어봉가와 정지여유도(SDM)를 측정하는 동안에는 다음과 같은 운전제한조건 요건들은 적용이 보류될 수 있다.

운전제한조건 3.1.1, “정지여유도 :  $T_{cold} > 99^{\circ}\text{C}$  ( $210^{\circ}\text{F}$ )”

운전제한조건 3.1.6, “정지제어봉집합체 삽입한계”

운전제한조건 3.1.7, “조절제어봉집합체 삽입한계”

운전제한조건 3.3.1, “원자로보호계통 계측설비 : 운전중”

(단, 표 3.3.1-1의 트립 기능 2, 14, 15에만 적용)

운전제한조건 3.3.2, “원자로보호계통 계측설비 : 정지 중”

(단, 표 3.3.2-1의 트립 기능 1에만 적용)

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 1. LCO 3.1.10 : STE- Shutdown Margin (계속)

#### ● NUREG-1432 (LCO 3.1.8)

During performance of PHYSICS TESTS, the requirements of:

LCO 3.1.1, "SHUTDOWN MARGIN (SDM),"

LCO 3.1.5, "Shutdown Control Element Assembly (CEA) Insertion Limits," and

LCO 3.1.6, "Regulating Control Element Assembly (CEA) Insertion Limits,"

may be suspended for measurement of CEA worth, provided shutdown reactivity equivalent to at least the highest estimated CEA worth (of those CEAs actually withdrawn) is available for trip insertion.



## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 1. LCO 3.1.10 : STE- Shutdown Margin (계속)

#### ● 원자로보호계통의 LCO 유예

- LPPT (Low Power Physics Test) 중 High Log Power와 CPCS의 trip bypass 설정치를 변경
  - High Log Power Trip Bypass:  $10^{-3}\%$   $\Rightarrow$   $10^{-4}\%$
  - CPCS Trip Bypass:  $10^{-4}\%$   $\Rightarrow$  1% (혹은 5%)
- CPCS 설치 발전소는 동일하게 적용되나 NUREG-1432는 이를 LCO 유예로 처리하지 않음.
  - LCO 3.3.1에 해당 내용 기술
- LCO 3.1.10 적용 시점에 큰 영향을 줌.
  - 예 : 제어봉가 측정 전 트립가능성 시험 시 LCO 3.1.10 적용 여부

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 1. LCO 3.1.10 : STE- Shutdown Margin (계속)

#### ● LCO 3.1.10 임계시험 적용

- 원자로보호계통의 STE 적용으로 임계시험도 LCO 3.1.10의 적용 항목이 되고 있음.
- 한빛 3호기부터 초기임계부터 원자로보호계통의 Trip bypass 설정치를 변경
- 방안
  - 초기 임계 후 LPPT 시험 이전에 원자로보호계통의 Trip bypass 설정치를 변경

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 1. LCO 3.1.10 : STE- Shutdown Margin (계속)

#### ● NUREG-1432 Highest Estimated CEA Worth 해석

- 해석 1
  - 원자로정지 신호 발생 시 인출된 모든 제어봉이 낙하할 수 있음
  - 정지여유도 감소 전 트립가능성 시험을 통하여 모든 제어봉 낙하를 확인
- 해석 2
  - 원자로정지 신호 발생 시 가장 큰 제어봉가 이상으로 부반응도 제공
- 검토
  - “가장 크게 평가된 제어봉가 이상의 반응도로 원자로가 미임계”를 고려하면 해석 2가 적절.
  - NUREG-1432의 “of those CEAs actually withdrawn”을 고려하면 해석 1이 적절한 것으로 보임.
  - 해석 1을 사용하면 Mode 3에 대한 표현이 어려움.

11

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 1. LCO 3.1.10 : STE- Shutdown Margin (계속)

#### ● NUREG-1432 Highest Estimated CEA Worth 해석 (계속)

- 검토 (계속)
  - CEA Ejection 사고를 고려하면 해석 2가 적절
- 현재 해석 2로 보고 있음
  - 실제로 인출된 제어봉집합체의 제어봉가가 가장 크게 평가된 제어봉가 이상
  - 원자로정지 시 삽입 가능

12

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 1. LCO 3.1.10 : STE- Shutdown Margin (계속)

#### ● SR 3.1.10.2

- 완전히 삽입되지 않은 각 전강 제어봉집합체가 최소한 50 % 인출된 위치로부터 원자로가 정지될 때 완전 삽입될 수 있는지 확인한다.
  - 신고리 3,4 : 정지여유도가 운전제한조건 3.1.1의 제한치 미만으로 감소 되기 전 **24시간** 이내
  - NUREG-1432 : ... **7일** 이내
- 초기노심장전 및 재장전 후 제어봉 낙하시간 측정 시험을 수행함.
- NUREG-1432는 제어봉낙하시간 측정 시험이 7일 이내 이루어졌으면 추가적인 트립가능성 시험을 수행하지 않음.

13

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 1. LCO 3.1.10 : STE- Shutdown Margin (계속)

#### ● 모드 3에 대한 사항

- 신고리 3,4호기 SR 3.1.10.3
  - 모든 전강 제어봉집합체가 완전히 삽입된 상태에서 원자로가 **허용 기준 이상**으로 미임계상태인지 확인한다.
  - **가장 크게 평가된 제어봉가 이상의 반응도로 원자로가 미임계**
- NUREG-1432 : 해당 내용 없음
- 적용 여부
  - LPPT 시험 중 원자로 정지 발생 시, 혹은
  - DCRM 에 의한 제어봉가 측정 시 모드 3 진입

● **DCRM (Dynamic Control Rod Measurement)**  
: 붕소농도 변화없이 제어봉 삽입으로 제어봉가 측정

14

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 2. LCO 3.1.11 : STE- Mode 1 & 2

#### ● 신고리 3,4

원자로 특성시험 수행 중에는 열출력이 정격열출력의 85 %를 초과하지 않는 시험출력준위로 제한되어 있을 때, 다음과 같은 요구사항들은 적용이 보류될 수 있다.

...

운전제한조건 3.2.5, “축방향출력편차”

#### ➤ NUREG-1432

- 동일하나 축방향출력편차에 대한 LCO 유예를 하지 않음.

#### ➤ 평가

- CPC 출력분포 시험을 위해서는 축방향출력편차 LCO 유예가 필요함.
- 재장전 노심의 경우 CPC 출력분포 시험 방법이 다르므로 LCO 유예가 불필요 할 수 있음.
- 재장전 노심의 경우에도 현 출력상승 방법론 실패 시 제논진동 방법론이 사용될 수 있으므로 LCO 3.2.5 유예가 필요

15

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 3. LCO 3.1.12 : STE- 반응도계수 시험

#### ● 신고리 3,4

원자로 특성시험 수행 중 선출력밀도와 핵비등이탈률이 해당 운전제한조건의 제한치를 초과하지 않는다는 조건 하에서 다음과 같은 운전제한조건 요건들은 적용이 보류될 수 있다.

운전제한조건 3.1.7, “조절제어봉집합체 삽입한계”

운전제한조건 3.1.8, “부분강 제어봉집합체 삽입한계”

운전제한조건 3.4.1, “원자로냉각재계통 압력, 온도, 유량 제한”

(단, 원자로냉각재계통 저온관 온도에만 적용)

#### ➤ NUREG-1432

- 해당 STE 없음.

#### ➤ 평가

- 현 저온관 온도 LCO가 반응도계수 시험을 수행하기에 충분하지 않음. 유예 필요.

16

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 4. LCO 3.4.2 : 임계최저온도

#### ● 신고리 3,4

각 원자로냉각재계통 유로의 저온관 온도( $T_{cold}$ )는  $286.7^{\circ}\text{C}$  ( $548^{\circ}\text{F}$ ) 이상이어야 한다.

#### ● NUREG-1432

Each RCS loop average temperature ( $T_{avg}$ ) shall be  $[520]^{\circ}\text{F}$ .

#### ➤ 불만족 시 조치사항

- 신고리 3,4 : Mode 3로 진입
- NUREG-1432 : Mode 2 with less  $k_{eff} < 1.0$

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 4. LCO 3.4.2 : 임계최저온도 (계속)

#### ➤ SR

신고리 3,4	각 원자로냉각재계통 유로의 저온관 온도가 $286.7^{\circ}\text{C}$ ( $548^{\circ}\text{F}$ ) 이상인지 확인한다.	원자로가 임계에 도달하기 전 15분에 1회 그리고 -----주----- 원자로가 임계상태이고, 원자로냉각재계통 저온관 온도가 $289.4^{\circ}\text{C}$ ( $553^{\circ}\text{F}$ ) 미만일 때 ----- 30분
NUREG-1432	Verify RCS $T_{avg}$ in each loop $[520]^{\circ}\text{F}$	[ 12 hours OR In accordance with the Surveillance Frequency Control Program ]

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 4. LCO 3.4.2 : 임계최저온도 (계속)

#### ● 문제점

- 불명료한 LCO 배경
  - 계측기의 유효 범위
  - 안전해석의 범위
  - 최소기준무연성천이온도 이상에서의 운전
- 안전해석에는 미적용
  - NUREG-1432 : There are no accident analyses that dictate the minimum temperature for SAFETY criticality, but all low power safety analyses assume initial temperatures near the [520]°F limit
- 과도한 점검요구사항
  - 정상운전온도 290.6°C(555 °F)에서 약간의 온도 변화 시에도 30분 간격의 점검 요구
  - 노심 시험 및 기타 과도상태 발생 시 대응에 문제

19

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 5. RCS 유량 측정 및 교정

#### ● 신고리 3,4

- 점검요구사항 3.4.1.4
  - 원자로냉각재계통 총 유량이 75.6×10<sup>6</sup> kg/hr (166.6×10<sup>6</sup> lb/hr) 이상, 86.9×10<sup>6</sup> kg/hr (191.6×10<sup>6</sup> lb/hr) 이하인지 열평형 유량 측정으로 확인한다
  - 점검주기 : 31일

#### ● NUREG-1432

- SR 3.4.1.4
  - Verify by precision heat balance that RCS total flow rate is within the limits specified in the COLR.
  - 점검주기 : [18] month or SFCP

● SFCP (Surveillance Frequency Control Program)

20

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 5. RCS 유량 측정 및 교정 [계속]

#### ● 신고리 3,4

- 점검요구사항 3.3.1.5
  - 각 노심보호연산기에서 지시되는 총 원자로냉각재계통 유량이 2차 측 열출력 계산에 의해 결정된 원자로냉각재계통 유량 이하인지 확인한다.
  - 점검주기 : 31일

#### ● NUREG-1432

- SR 3.4.1.4
  - Verify total RCS flow rate indicated by each CPC is less than or equal to the RCS flow determined by calorimetric calculations.
  - 점검주기 : [31] days or SFCP

21

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 5. RCS 유량 측정 및 교정 [계속]

#### ● 현상

- 유량 측정 점검 주기
  - 기술적으로 한 주기 내 RCS 유량 변화 가능성은 거의 없음.
  - 주기말 급수 유량을 측정하는 벤츄리 파울링 현상 발생으로 과출력 지시 현상 발생
  - 노심 연소에 따른 반경방향 출력분포 변화로 온도 측정의 변화
  - 2차측 열출력방법에 의한 유량 변화 발생
- 2차측 열출력 방법에 의한 교정
  - 2차측 열출력 과지시 발생 시 측정 유량 증가
  - CPCS 교정 유량 증가
- 급수 벤츄리 파울링 현상 발생 시 주증기기반 열출력 방법론 사용

22



## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 6. 출력 상승 후 시험 수행 시점

#### ● NUREG-1432

- Example 1.4-3
  - Not required to be performed until 12 hours after  $\geq 25\%$

#### ● 신고리 3,4

- 예시 1.4-3
  - 정격열출력의 25 % 이상 도달 후 12시간 이내에서 점검수행이 허용된다.
- 해석
  - 발전소가 정격열출력의 25 %에 1회 도달하게 되면, 12시간의 허용 시간 이내에 점검을 완료해야 한다.

23

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 6. 출력 상승 후 시험 수행 시점 [계속]

#### ● 신고리 3,4 사용 예

- 점검요구사항 3.3.1.2, 3.3.1.4, 3.3.1.5, 3.3.1.6
  - 열출력이 정격열출력의 [80%] 이상으로 도달 후 [12]시간 이내에 수행을 완료하여야 한다.
- 점검요구사항 3.4.1.4 (유량 점검)
  - 정격열출력의 95 % 이상 도달 후 24시간 이내까지는 수행이 요구되지 않는다.

#### ● 해석의 불명료성

- 24시간 이내 수행이 완료
- 24시간 이내 수행 착수
- 24시간 이후 수행

24



## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 6. 출력 상승 후 시험 수행 시점 [계속]

#### ● 문제점

- 표현의 일관성
  - NUREG-1432는 1.4절의 사용 예의 표현을 일관적으로 사용
  - 국내 원전의 경우 표현의 일관성이 없음
- 재장전 이후 혹은 과도상태 발생 이후에 제논안정상태가 요구되는 조건일 경우 요구시간 내 수행이 어려움.

#### ● 운전 방법 및 검토 방향

- 재장전 후 노심시험의 절차 고려
- 원자로 정지 발생 후 점검주기 도래 시 적절한 출력상승 절차

25

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 7. 정지여유도 불만족시 조치

#### ● 배경

- 제어봉 낙하 등으로 제어봉 삽입한계 위반 시 조치

#### ● 신고리 3,4 [예 : 정지제어봉 삽입한계 위반]

- 1.1.1 정지여유도가 5.5 %  $\Delta k/k$  이상인지 확인한다.
  - 1.1.2 정지여유도가 제한치보다 작은 경우 정지여유도를 제한치 이내로 복구하기 위해 봉소주입을 시작한다.
- 1.2 정지제어봉집합체를 제한치 이내로 복구한다.

#### ● NUREG-1432

- SR 3.4.1.4 Restore shutdown CEA(s) to within limit.

26

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 7. 정지여유도 불만족시 조치 [계속]

#### ● 적용의 문제점

- 제어봉 낙하 등 조건에서 운전원이 정지여유도를 계산하기 어려움

#### ● 제어봉 낙하 시 정지여유도 만족 여부

- 낙하 제어봉가에 해당하는 출력 감발 발생
- 제논에 의한 제어봉가 증가
- 봉소회석을 수행하지 않을 경우 정지여유도 만족

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 8. NUREG 1432 STE- RCS Loops

#### ● NUREG1432 LCO 3.4.17

The requirements of LCO 3.4.4, "RCS Loops – MODES 1 and 2," and the listed requirements of LCO 3.3.1, "Reactor Protective System (RPS) Instrumentation – Operating," for the [(Analog) RC flow low, thermal margin or low pressure, and asymmetric steam generator transient protective trip functions] [(Digital) high log power, high local power density, low departure from nucleate boiling ratio protective trip functions]

- 배경 : 자연순환 시험을 위한 트립기능 유예
- 신고리 3,4호기 자연순환 시험 : 원자로 정지 후 decay heat에 의한 자연순환 시험 수행

## II. NUREG-1432와 신고리 3,4 TS 차이점

### 8. NUREG 1432 STE- RCS Loops [계속]

- 자연순환 방법
  - WEC형 원전
    - ✓ 저출력 조건에서 RCS 정지 시에도 원자로 정지가 발생하지 않음. 임계조건에서 시험 수행
    - ✓ 노심 출력을 알 수 있으므로 온도를 측정하여 유량 계산이 가능
  - OPR1000 및 APR1400
    - ✓ 전출력 도달 후 decay heat이 충분할 때 원자로 정지에 의한 시험
    - ✓ 노심출력을 알 수 없어 유량 계산이 불가능
    - ✓ 유량과 온도(엔탈피)차 비를 전출력 조건과 비교
      - :  $\Delta h_{\text{natural circulation}} < \Delta h_{\text{full power}}$
    - ✓ RSG 이후 적용의 한계

29

## III. 제안

- ◆ 국내 TSTF (Technical Specification Task Force) 추진
  - ❖ NUREG-1432 검토 및 기술적 사항이 동일한 부분에 대한 수용
  - ❖ BNPP 원전에 동일 적용되는 Tech. Spec. 개발
    - 일부 항목은 ENEC과 질의/응답 과정에서 NUREG-1432에 따라 변경
  - ❖ 노심시험뿐 아니라 전반적인 Tech. Spec. 재검토 필요
  - ❖ 인허가 기관의 적극적인 지원
- ◆ 일관성 있는 Tech. Spec. 해석
  - ❖ 개인별 임의의 Tech. Spec. 해석 방지를 위한 TSTF 자료 생산
  - ❖ Tech. Spec. 변경 시 심도있는 검토

30

감사합니다.