

# 노물리 시험 규제 현안

국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS



## Contents



**I** 노물리 시험에 대한 검사 개요

**II** 최신 기술기준 반영

**III** 동적 제어봉 제어능 측정법

**IV** AOA와 노물리 시험

**V** CPC 가변상수와 불확실도

**VI** JRTR과 기장연구로 노물리 시험





KINS is a Cornerstone for a Safe Korea

# I. 노물리 시험에 대한 검사 개요

## 노물리시험 검사의 목적 및 항목

한국원자력안전기술원  
KINS KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY

### • 검사 목적

- 노물리시험을 적합한 절차에 따라 수행하고, 결과가 허용기준을 만족했는지 서류,입회 등을 통해 확인
- 노물리시험에 대한 검사를 통해 노심핵설계 및 핵연료 장전의 적합성을 확인
- 노물리변수의 운영기술지침서 운전제한치 만족 여부 확인

### • WH형 원전 및 CE형 원전

- 영출력 노물리시험 (영출력 임계붕소농도 측정, 등온온도계수(ITC) 측정, 제어봉 제어능 측정)
- 출력중 노물리시험 (노내 출력분포 측정, 전출력 임계붕소농도 측정)

### • CE형 원전

- 노외핵계측기 부채널 교정
- SAM/BPPCC 측정
- CPC의 DNBR/LPD 입증

### • CANDU형 원전

- 반응도 삽입 및 임계 접근
- 핵연료채널 및 다발 출력 제한치 초과 여부
- ROP 검출기 교정절차 및 결과





## • 법적 근거

- 원자력안전법 제16조(검사), 제22조(검사)
- 원자력안전법 시행령 제27조(사용 전 검사), 제35조(정기검사)
- 원자력안전법 시행규칙 제15조(사용 전 검사의 신청), 제19조 (정기검사)
- 고시 제2016-06호 (원자로.27) “원자로시설의 사용전 검사에 관한 규정”
- 고시 제2016-07호 (원자로.34) “원자로시설의 정기검사 대상 및 방법에 관한 규정”

## • 기술적 근거

- KINS/GI-N03, “경수로용 원자력발전소 사용전검사지침서(성능)”
- KINS/GI-N01, “발전용 원자로 및 관계시설 정기검사지침서”
- Regulatory Guide 1.068, “Initial Test Programs for Water-Cooled Nuclear Power Plants”
- ANSI/ANS-19.6.1, “Reload Startup Physics Tests for Pressurized Water Reactors”
- 최종안전성분석보고서 (Final Safety Analysis Report)
- 운영기술지침서 (Technical Specification)
- KNF-KSNGEN-11049, “CPCS and COLSS Reload Startup Test Requirements”

5 / 32

# 검사 결과물

## • 검사보고서

- 노물리시험의 절차가 적합하였고, 시험은 절차에 따라 수행되었으며, 시험 결과가 허용기준에 만족함을 확인하여 원자력안전위원회 보고 및 국민 공개

## • 검사지적사항

- 고시 제2015-07호(원자로.10) “원자력시설의 검사지적사항 처리에 관한 규정”
- “검사지적사항”이란 원자력안전과 관련된 법규·허가조건·기술기준·절차서 및 도면 등을 위반하거나 위원회가 명한 것을 이행하지 아니하여 지적된 사항
- “권고사항”이란 검사지적사항은 아니나 원자력의 안전성 향상을 위하여 사업자의 개선 또는 보완이 요구되는 사항

## • 최근 지적사항

- 노심보호연산기(CPC)의 가변상수 산출을 위한 시험조건이 설계사의 지침과 일부 불일치 (2013년) → ⑤
- 노외핵계측기 부채널 교정 절차서의 개정 절차 미흡 (2013년) → ⑤
- 봉소농도 측정 관련 영출력 원자로특성시험 절차서 미흡 (2015년)

## • 최근 권고사항

- 동적 제어봉 제어능 측정 시험 결과의 편차 과다에 대한 원인규명 권고 (2013년) → ③
- 원자로특성시험 관련 기술기준 갱신 적용 권고 (2015년) → ②

6 / 32



## Ⅱ. 최신 기술기준 반영

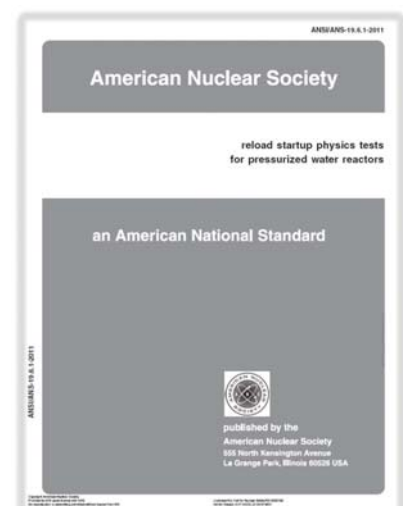
### ANSI/ANS-19.6.1

#### • 개요

- 영출력 노물리시험과 출력중 노물리시험의 기술적 근거
- Vendor(Westinghouse 등), Utility (Duke Power company 등), 연구소(BNL, ORNL, JAERI 등), NRC 등의 전문가 참여
- 가압경수로형 원전의 교체노심 노물리시험의 항목, 절차, 방법 및 판정기준 제시
- 1985, 1997, 2005, 2011년도 발간본이 있으며, 지속적으로 개정

#### • 국내 현황

- 국내에서는 현재 2개 버전의 문서를 인용  
(DCRM 등은 2005년도, 나머지 항목은 1997년도 인용)





- 발간년도별 비교 (주요 항목)

	1997년도	2011년도
미분 붕소농도 측정	있음	2005년도부터 삭제함
DCRM	없음	2005년도부터 추가됨
Flux Symmetry Test : 제어봉 이용법	있음	2005년도부터 삭제함
Flux Symmetry Test : 노내계측기 이용법	0 ~ 30 %FP 에서 수행	50 %FP 이전에 출력분포측정 수행
전반적인 근거	없음	2011년도부터 추가됨
허용기준	-	부분적으로 변경 또는 추가

- 최신 기술기준 반영의 필요성

- 1997년도 발간본의 일부 시험 방법 및 기준의 사문화
- 1997년도 발간본 중 허용기준 해석의 모호성
- 2011년도 발간본에서 시험 방법과 근거를 구체적으로 제시  
→ 원자로특성시험 관련 기술기준 갱신 적용 권고 (2015년)

※ DCRM : 동적 제어봉 제어능 측정법(Dynamic Control rod Reactivity Measurement)

9 / 32

## 논점 사항

- 판정기준 완화

- 임계붕소농도

1997년도	2011년도
±50 ppm	±50 ppm or ±500 pcm equivalent

- 영출력과 전출력 반응도 차이

1997년도	2011년도
±50 ppm	±50 ppm or ±500 pcm equivalent or ±10%

- 저출력 출력분포 측정 수행 방안

- 중성자속 대칭성 시험은 기술기준(1997년도판)의 판정기준이 명확하지 않음에 따라 발전소별로 절차 및 판정기준이 상이
- 2011년도 발간본에 따른 시험(출력분포 측정) 절차 적용 권고

- 제논평형 조건 만족

- 저출력 출력분포 측정시 제논평형 조건 요구
- 제논평형을 위한 대기 시간 증가 등에 따른 어려움 예상



- **노심 출력분포합성 코드 변경에 따른 허용기준**

- 노심 내 핵연료집합체의 일부 위치에 노내계측기 설치
- 노심 전체의 출력분포를 합성하기 위해, 노심운전지원코드 운용 (CECOR / INCORE)
- 최근 3차원 출력분포합성법을 기반으로 국내에서 개발된 노심운전지원코드(AsCORE) 개발 완료 및 인허가 예정
- AsCORE 코드의 출력분포합성 불확실도가 CECOR의 불확실도보다 작아짐에 따라, 이를 첨두계수 측정의 허용기준에 반영 필요

- **기타**

- 등온온도계수 측정 방법 개선
- 영출력특성시험 간 붕소 평형 조건 확인 절차 개선
- 초기임계 접근시 역계수율비 그래프 활용 절차 명확화

- **최신 기술기준 반영의 목적**

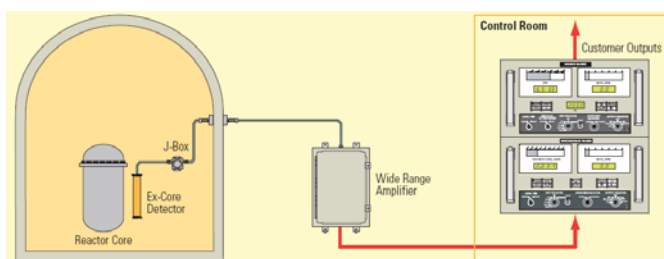
- 기술기준 정비를 통한 안전성 제고
- 시험 절차의 명확화 및 허용기준의 일관성 유지
  - 시험 절차의 모호성 배제
  - 객관적인 시험 절차의 절차서 명시
  - 동일 형태의 원전에 대해서는 동일 시험 절차 및 허용기준 적용
  - 한수원의 시험 수행 경험과 KINS의 검사 경험을 반영하여 절차서 개정
- 시험 이해도 및 규제 객관성 증진
- 국내 기술기준 마련의 발판



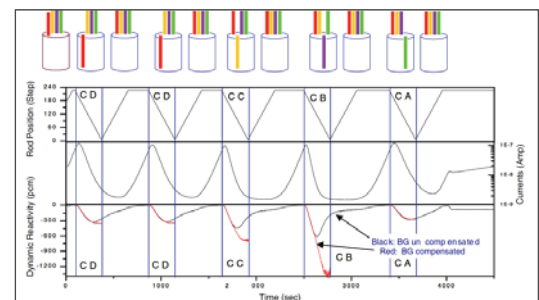
## Ⅲ. 동적 제어봉 제어능 측정법

### 동적 제어봉 제어능 측정법 (DCRM)

#### • 동적 제어봉 제어능 측정법 (DCRM)



Product Specifications of Neutron Flux Monitoring Systems, Thermo Scientific



Eun-ki Lee, "Current Status and Future Works in Dynamic Control Rod Worth Measurement Method in KOREA", KNS 2015

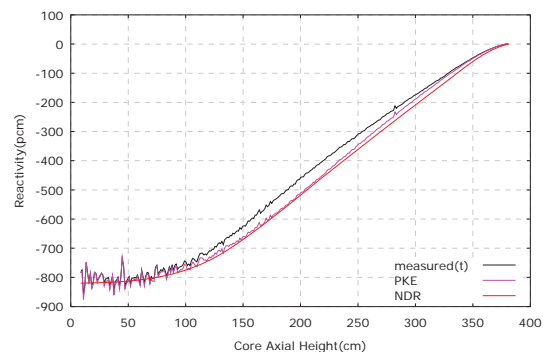
#### • DCRM 적용 및 장점

- 2005년 9월 특정기술주제보고서(가압경수형 원전의 동적 제어봉제어능 측정방법) 승인
- 2006년도부터 적용 (봉소 희석/제어봉 교환법 대체)
- 제어봉제어능 측정 시간 단축 및 폐기물(Boron Waste) 감소 효과



## • DCRM 절차 개요

- 제어봉 삽입/인출을 통한 노외핵계측기 신호 취득
- 노심평균 중성자 밀도 계산 (중성자 수밀도 대 계측기 반응 변환 상수 이용)
- 역반응도 방정식 계산과 기저신호 처리를 통한 동적 제어봉제어능 산출
- 정적 제어봉제어능 측정값 계산 (동적/정적 변환 상수 이용)
- 설계값과의 비교/평가



15 / 32

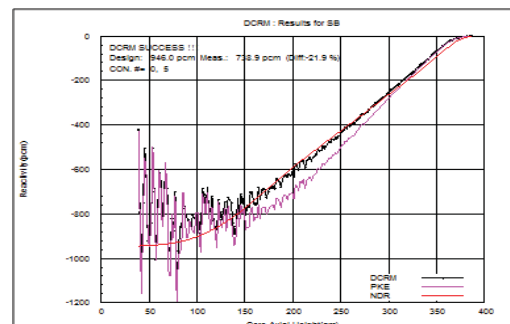
## 현안 및 경과

## • 현안 사항

- 최근 WH형 노심 제어봉가 측정시 불만족 사항 발생
- 동적 제어봉 제어능 측정 시험 결과의 편차 과다에 대한 원인규명 권고 (2013년)

## • 사업자 조치 및 경과

- Root & Cause 분석법 적용 (호기 및 주기 기준, 제어봉가 기준, POAH 출력 기준, Background Noise 등)
- 반응도계산기 개선 (노이즈 제거를 위한 샘플링 수 증가 및 필터링 적용)
- Lab Test, 연구로 시험, 고리 2호기 28주기 시험 수행
- 고리 1호기 및 고리 2호기 시범 적용



16 / 32



- 현안 관련 고려 사항

- 노이즈 처리 방안
- 기저신호(Background Gamma Signal) 처리 방안
- 측정 노심 조건 (MTC)에 대한 영향
- 제어능이 큰 제어봉에 대한 영향
- 노외중성자속감시계통(ENFMS) 검출기 교체로 인한 영향

- 규제 방향

- 대체적으로 DCRM 측정방법을 통해 적합하게 제어봉제어능을 측정
- 지속적인 국내 원전의 DCRM 적용을 위하여 근본원인 규명 및 대책수립 요구

17 / 32



KINS is a Cornerstone for a Safe Korea

## IV . AOA와 노물리 시험



# AOA 정의 및 원인

## • AOA(Axial Offset Anomaly, 비정상 출력편차)

$$\bullet \text{ AO} = \frac{(P_t - P_b)}{(P_t + P_b)} \times 100 \quad (\text{WH}) / \text{ASI} = \frac{(P_b - P_t)}{(P_t + P_b)} \quad (\text{CE})$$

- AO 설계값과 측정값간의 차이가 통상 3%p 이상이면 AOA라고 정의

## • 원인

- 냉각재 내 부식생성물 + 냉각재 내 붕소 + 과냉 핵비등
- AOA = Flux depression / caused by the concentration of **boron** within porous **crud** deposits  
/ formed on the upper half of fuel assemblies / operating with **high sub-cooled nucleate boiling**

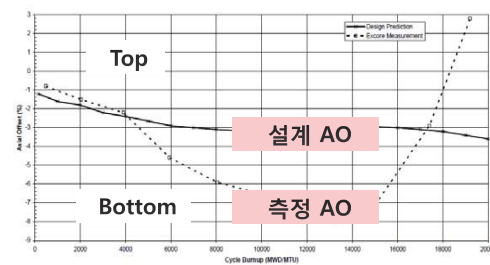
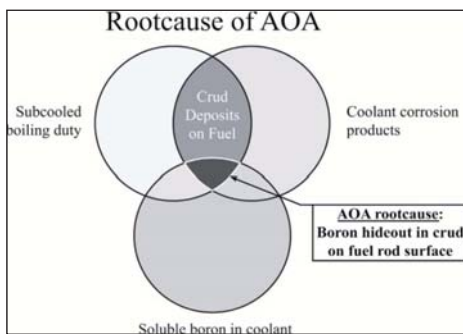
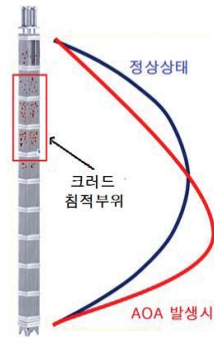


Figure 3-7  
Typical Ex-core Axial Offset Response for Plant with AOA

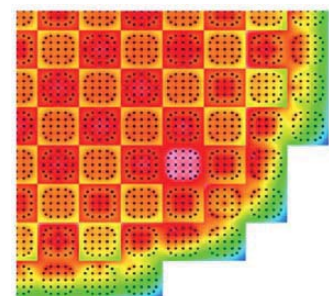
PWR Axial Offset Anomaly (AOA) Guidelines, Revision 1, EPRI, June, 2004.

19 / 32

# AOA 발생에 따른 후속주기 핵설계

## • 노심 핵설계

- 노심 상부에 침적된 붕소를 모사할 수 있는 방법 개발 필요 (Adjusted Core Model)
- 붕소가 침적된 위치에 neutronic 효과를 대신하는 중성자흡수체를 가상으로 생성  
(축방향으로 이동 가능한 제어봉집합체 고려 가능)
- 가상의 중성자흡수체를 설치하는 축방향 및 반경방향 위치에 대한 신중한 고려
- 주기 전반에 걸친 AOA를 반영하는 모델
- Adjusted Core Model 에 대한 검증 필요
- 현행 핵설계에서 사용하고 있는 불확실도 값에 대한 재검토
- 운전제한치를 위반하지 않는 노심설계



<http://www.casl.gov/index.shtml>

20 / 32



- 임계붕소농도
  - AOA를 경험하고 재장전되는 핵연료집합체로 인한 영향
- 제어봉 제어능 측정
  - AOA에 따른 측방향 연소도로 인한 영향
- 등온온도계수 측정
  - AOA에 따른 노심설계에 따른 영향
- 제어봉 완전인출을 초기조건으로 요구하는 시험
  - 이전 주기 AOA 발생과 제어봉 완전인출로 인한 운영기술지침서(T.S.)상의 ASI 제한치 위반 가능성
  - 30 %FP 노외핵계측기 부채널 선형출력 교정
  - 30%FP 형상처리행렬(SAM) 측정
- 출력분포 측정
  - AOA를 경험하고 재장전되는 핵연료집합체로 인한 간접적인 영향

21 / 32

## 규제 방향

- 사업자 및 규제기관의 선제적 대응 필요
  - AOA 발생 가능한 설계 변경(출력 증강, 증기발생기 교환, Chemistry regime 변경)이 있을 경우, AOA 위험도 평가 수행 (사업자) 및 평가 결과 요구 (규제기관)
- AOA에 대한 연구계의 관심 및 연구 필요
  - 다물리 코드 필요 : 핵설계 코드 + 노심열수력 코드 + 수(水) 화학 코드 (+ 계통 코드)
  - 미국 CASL 프로젝트의 Task : AOA 해석

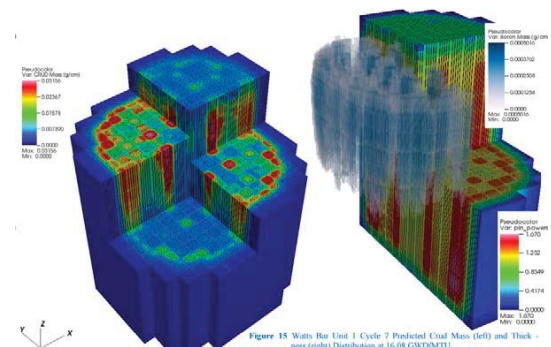
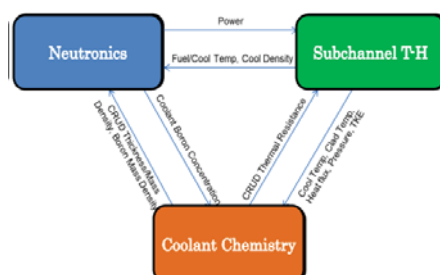
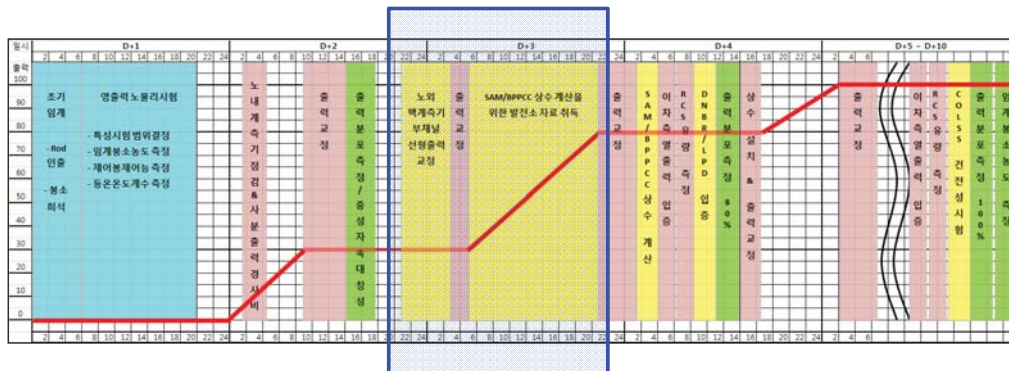


Figure 15 Watts Bar Unit 1 Cycle 7 Predicted Crud Mass (left) and Thickness (right) Distribution at 16.08 GWD/MTU



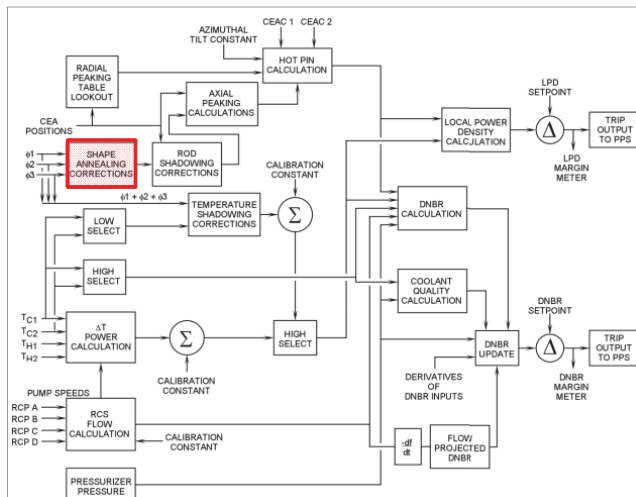
## V. CPC 가변상수와 불확실도



## 배경

### • 노심보호연산기 (Core Protection Calculator, CPC) 개요

- 예상운전과도사건(AOO) 발생시에 연료허용 손상한계 (SAFDL)를 초과하지 않도록 Low DNBR과 High LPD 원자로 정지 신호를 발생
- 노외핵계측기 신호와 SAM 상수를 바탕으로 축방향 출력분포 합성 알고리즘을 통해 노심 축방향출력 분포를 합성하고, 이를 DNBR과 LPD 계산에 사용



예상운전과도사건 : Anticipated Operational Occurrences, AOO  
 연료허용 손상한계 : Specified Acceptable Fuel Design Limit, SAFDL  
 핵비등이탈율 : Departure from Nucleate Boiling Ratio, DNBR  
 국부출력밀도 : Local Power Density, LPD  
 행렬처리함수 : Shape Annealing Matrix, SAM



- CPC의 불확실도 분석 (OUA, Overall Uncertainty Analysis)

- CPC의 알고리즘은 기본적으로 최적평가(Best Estimate) 계산
- CPC가 계산하는 주요 안전관련 변수에 대한 불확실도 분석을 통계적(Stochastic) 방법으로 수행하여 그 결과(불확실도 상수)를 반영 필요

- CPC의 SAM 측정과 불확실도 분석과의 관계

- (설계) CPC OUA의 입력으로 제논평형 초기조건에서 출력상승을 가정하여 계산된 SAM 사용
- (운영) 30% 출력 도달 후, 제논평형을 완전히 이루지 못한 상태에서 출력상승을 통한 SAM 측정
  - 즉, 실제 SAM 측정은 제논평형 초기조건을 만족하지 못함
- 설계와 운영의 불일치 발생
- 노심보호연산기(CPC)의 가변상수 산출을 위한 시험조건이 설계사의 지침과 일부 불일치 (2013년)

25 / 32

## 규제 방향 및 시정조치

- KINS 요구사항

- 30%출력에서 노외핵계측기 부채널 교정시험 및 SAM 상수 측정시험을 위한 초기조건으로
  - option 1) 제논평형 안정조건을 절차서에 명시 및 절차서 준수 or.
  - option 2) 제논비평형 조건을 적용하고자 할 경우, 적용 타당성을 충분한 검증계산을 통해 입증하고,
    - 설계에서 가정한 제논비평형 조건과 실제의 제논비평형 조건의 불일치에 대비한 보수적인 CPC 상수 설계 절차 및 시험 절차를 수립

- 시정조치 및 종결

- 제논비평형 조건에 대한 영향 검토를 통한 불확실도 상수 추가 별점 부과
- 노외핵계측기 부채널 교정시험을 30%출력 도달 시각으로부터 12시간 후 수행
- SAM 상수 측정을 위한 출력상승을 30% 출력 도달 시각으로부터 18시간 후 수행
- Hot Pin ASI 불확실도가 0.8 이상으로 설계된 경우 80% 출력 상승전에 CPC 불확실도 재검증

26 / 32



- 규제기관

- 설계 개념에 근거한 노물리시험 검사 수행 : 노심보호연산기 (CPC), 노심운전치감시계통 (COLSS)
- 설계요건서 등의 상위 문서에 기술된 요건 파악 : 초기조건, 절차, 허용기준 등
- 연계 분야 (노심열수력, 계측전기 등)에 대한 이해도 제고 : 노심열설계 방법론, 중성자계측시스템

- 설계사 및 운영사

- 설계와 운영의 소통 증대 필요
- 설계요건에 입각한 시험 절차서 작성 및 시험 수행
- 안전성을 외면한 공정 단축 배제

27 / 32



KINS is a Cornerstone for a Safe Korea

## VI. JRTR과 기장연구로 노물리 시험



- 요르단 연구로(JRTR) 노물리시험 검사지원 개요

- 요르단 연구로(JRTR) 인허가 지원에 대한 KINS-EMRC Special agreement(2011.5) 체결
- 요르단 규제기관(EMRC)이 수행하는 노심성능평가 분야에 대한 시운전시험 (RPT : Reactor Performance Test) 검사 지원을 수행

- 주요 검사 지원 항목

- Fuel Loading and approach to Criticality
- CAR/SSR Worth Measurement
- Excess Reactivity Measurement
- Measurement of Kinetic parameters
- Measurement of Void Reactivity Coefficient
- Measurement of Isothermal Temperature Reactivity Coefficient
- Measurement of Power Reactivity Coefficient
- Measurement of Xenon Reactivity

29 / 32

## 기장연구로 반영

- 기장연구로 시운전 노물리 시험시 고려할 사항

- 절차서의 명확화
- 시험 수행에 영향을 주는 외부 인자 검토
- 허용기준의 근거 마련
- 시험 결과의 신뢰도 제고
- 발전용원자로의 노물리시험 및 노물리 변수 등의 자료 생산 기술 등에 대한 참고 필요

30 / 32



## 맺음말

## 맺음말

### • 요약

- 노물리 시험에 대한 검사의 목적/ 항목/ 법적 및 기술적 근거/ 검사 결과물에 대한 소개
- ANSI/ANS-19.6.1에 대한 최신 발간본 적용을 통한 노물리 시험의 시험방법 및 허용기준 정리
- 동적 제어봉 제어능 측정법에 대한 현안
- AOA 발생에 따른 노심 핵설계의 적합성과 노물리 시험에 대한 현안
- 설계와 운영의 일치로 노심보호계통 (CPC 불확실도)의 보수성 유지 (종결)
- JRTR 노물리 시험에 대한 검사 지원을 통해 향후 수행할 기장연구로 시운전 노물리 시험의 검사시 고려할 사항 점검



# 감사합니다

