

상용 원자로 물리시험 경험 및 기술개발

한수원 중앙연구원

Nuclear for Future Generation





1 Chapter 원자로특성시험 개요

2 Chapter 국내 원자로특성시험 기술개발 경험

동적 제어봉 제어능 측정법 개발

중수로 LZC 제어능 측정법 개발

디지털 반응도계산기 개발

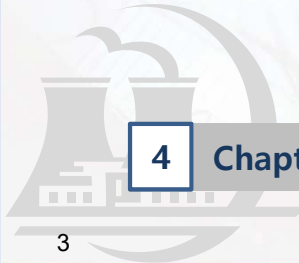
원자로특성시험 교육시스템 개발

3 Chapter 해외 원자로특성시험 기술개발 경험

SDRWM

노이즈를 이용한 MTC 측정

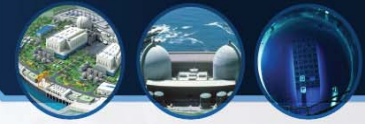
4 Chapter 결 론



1 Chapter 원자로특성시험 개요



1 원자로특성시험 개요



Operating Reactors Regulations & Guidance

10CFR50 APP. A

Reg. Guide 1.68

FSAR Chap. 14

Test Procedure

ANSI/ANS 19.6.1

5

• GDC 26

- Reactivity control system redundancy and capability
- shutdown margin

• GDC 28

- Reactivity limits
- Temperature coefficient

Criterion 26—Reactivity control system redundancy and capability. Two independent reactivity control systems of different design principles shall be provided. One of the systems shall use control rods, preferably including a positive means for inserting the rods, and shall be capable of reliably controlling reactivity changes to assure that under conditions of normal operation, including anticipated operational occurrences, and with appropriate margin for malfunctions such as stuck rods, specified acceptable fuel design limits are not exceeded. The second reactivity control system shall be capable of reliably controlling the rate of reactivity changes resulting from planned, normal power changes (including xenon burnout) to assure acceptable fuel design limits are not exceeded. One of the systems shall be capable of holding the reactor core subcritical under cold conditions.

Criterion 28—Reactivity limits. The reactivity control systems shall be designed with appropriate limits on the potential amount and rate of reactivity increase to assure that the effects of postulated reactivity accidents can neither (1) result in damage to the reactor coolant pressure boundary greater than limited local yielding nor (2) sufficiently disturb the core, its support structures or other reactor pressure vessel internals to impair significantly the capability to cool the core. These postulated reactivity accidents shall include consideration of rod ejection (unless prevented by positive means), rod dropout, steam line rupture, changes in reactor coolant temperature and pressure, and cold water addition.

1 원자로특성시험 개요



Operating Reactors Regulations & Guidance

10CFR50

Reg. Guide 1.68

FSAR Chap. 14

Test Procedure

ANSI/ANS 19.6.1

6

• Appendix A : Initial Test Program

- Initial fuel loading and pre-critical tests (8 tests)
- Initial Criticality
- Low-power Testing (21 tests)
- Power-ascension tests (45 tests)
- First-of-a-kind(FOAK) Testing : New, Unique, Special

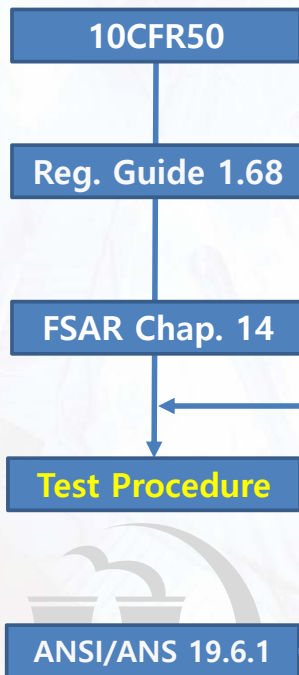
• Appendix C : Preparation of Procedures

- Preoperational test procedures
- Test Objectives/Special Precautions/Initial Conditions environmental Conditions/Acceptance Criteria Detailed Procedures/Documentation of Test Results
- Fuel Loading
- Procedures of Initial Criticality/LPPT/PAT

1 원자로특성시험 개요



Test Procedure



• LPPT

LPPT	Lead Unit	Follow-on Unit
Biological Shield Survey	Low Temp/HZP	HZP
Core Symmetry Verification	HZP	HZP
ITC Measurement	Low Temp/HZP	HZP
Control Rod Worth a. Regulating Bank b. Shutdown Bank	Low Temp/HZP Low Temp or HZP	HZP Not Required
Differential Boron Worth	Low Temp/HZP	HZP
Critical Boron Measurement	Low Temp/HZP	HZP
Dropped and Ejected Rod Worth	HZP	Not Required

7

1 원자로특성시험 개요



LPPT Procedure

At Low Temperature	
8.2.1	Digital Reactivity Computer System Checkout
8.2.2	Base Power Level Determination
8.3	ARO CBC
8.4	ITC (EARO)
8.5	CEA Groups 5, 4, 3, 2 and 1 Worths (Non Overlap)
8.6	CBC with CEA Groups 5, 4, 3, 2 and 1 at LEL
8.7	ITC with CEA Groups 5, 4, 3, 2 and 1 at LEL
8.9	Base Power Level Check
8.10	CEA Groups B and A-1 Worths (Non Overlap) with CEA Groups 5, 4, 3, 2 and 1 at LEL
8.11	RCS Heatup and Pressurization

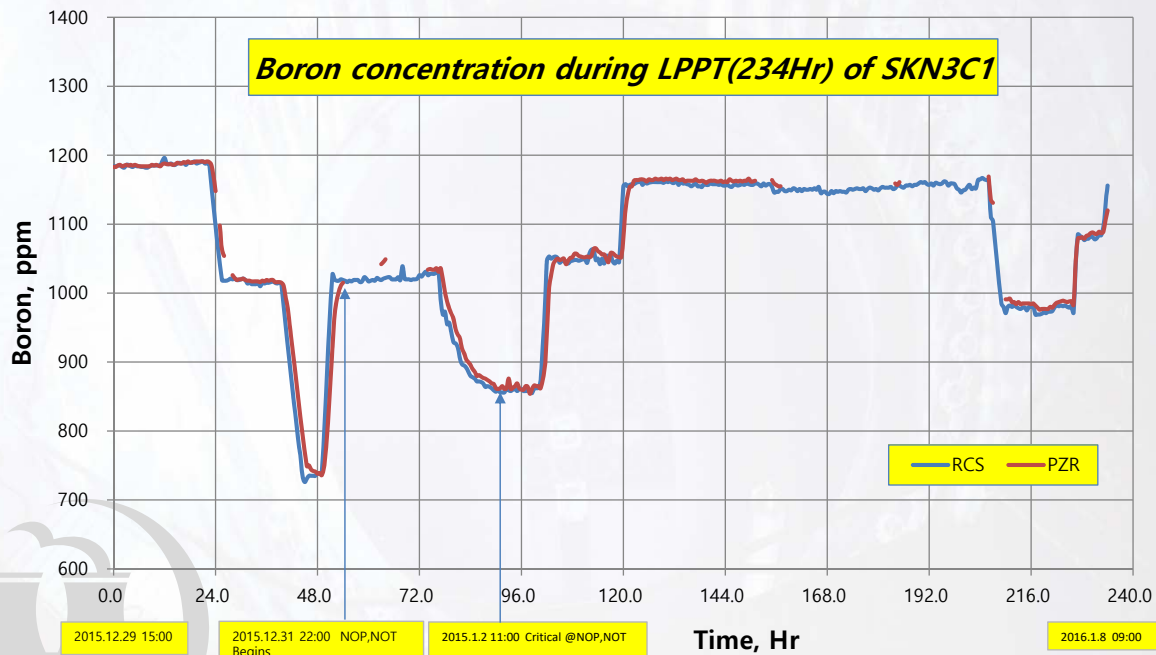
At HZP	
8.12.1	Digital Reactivity Computer System Checkout
8.12.5	Base Power Level Determination
8.13	CEA Groups 1 and 2 Worths (Non Overlap)
8.14	CBC with Groups 3, 4 and 5 at LEL
8.15	ITC with Groups 3, 4 and 5 at LEL
8.16	Pseudo Ejected Rod Worth
8.17	CEA Groups 3, 4 and 5 Worths (Non-Overlap)
8.18	Base Power Level Check
8.19	ARO CBC
8.20	EARO ITC
8.21	Pseudo Dropped CEA and PSCEA
8.22	CEA Symmetry Check
8.23	CEA Group P Worth
8.24	CEA Worth Measurement by CEA Exchange Method

8

1 원자로특성시험 개요



Reactivity Management of LPPT



9

1 원자로특성시험 개요



ANSI/ANS 19.6.1 (2011)

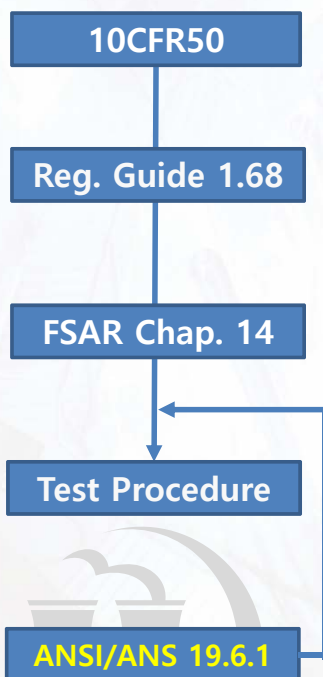


Table 1 - Required physics characteristics to be confirmed

Characteristic(s)	Example measured parameter to use for confirmation	Power level (%)
Reactivity balance	All-rods-out boron concentration	<5
Capability to shutdown, power distribution ¹⁾	Control rod worths	<5
Reactivity control	Isothermal temperature coefficient	<5
Power distribution	Flux symmetry or direct power distribution measurement between 0 and 30% of full power	0 to 30
Power distribution	If a direct low-power distribution measurement has yet to be confirmed, then it shall be confirmed (compared to predictions) prior to exceeding 50% power. ²⁾	30 to 50
Power distribution	Power distribution measurement results shall be assessed collectively to ensure that local and global core characteristic trends are acceptable prior to exceeding 80% power.	50 to 80
Power distribution	Direct power distribution measurement at full power	>90
Reactivity balance, requirement to shutdown	Hot-zero-power to hot-full-power reactivity measurement	>90

¹⁾Although the power distribution may not be directly measured at <5% power, an indirect measurement such as control rod worths provides the first indication that the power distribution is consistent with predictions. Such an indirect measurement is not required to be performed prior to exceeding 5% power but may be used to support an increase in power from 30 to 50% by which the first direct power distribution needs to be measured. This indirect power distribution measurement may have tighter test criteria than that for control rod worths.

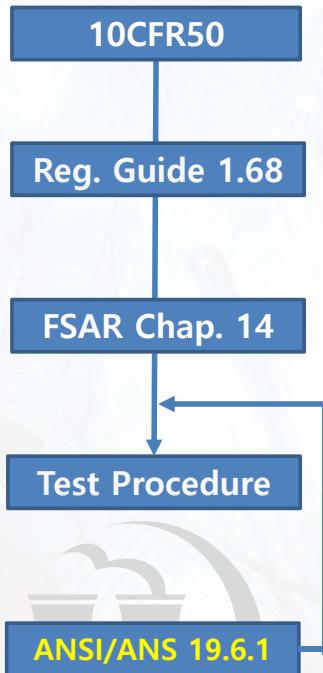
²⁾See Sec. A.3.2.6 for a discussion of direct and indirect power distribution measurements.

10

1 원자로특성시험 개요



ANSI/ANS 19.6.1 (2011)



11

Table A.1 – Typical test criteria

Test parameters	Test criteria
HZP critical boron	±50 ppm or ±500 pcm equivalent
Control rod worth Individual group or user-specified group	±15% ¹⁾ or ±100 pcm, whichever is greater (For rod swap, the reference group should be within 10%.)
Sum of groups or total integral of measured worths	±10% ¹⁾ (For DRWM, the total worth should be within 8%.)
ITC	±2 pcm/°F
Flux symmetry Deviation between the highest and lowest values in the symmetric locations	±10% ²⁾ (<i>Meas</i> versus <i>Meas</i>)
Power distribution	±0.10 RPD for each measured assembly power rms ³⁾ (radial) < 0.05
HZP to HFP reactivity measurement	±50 ppm or ±500 pcm equivalent or ±10% ¹⁾

¹⁾ For calculating percent differences use $(Meas - Pred) \times 100/Pred$, where *Meas* indicates the measured value and *Pred* indicates the predicted value. Having percent difference defined with *Pred* (i.e., predicted) in the denominator is consistent with comparisons of measured-versus-predicted data for safety-related purposes (e.g., total control rod worth and peaking). This definition of percent difference simply recognizes that PWR reload cores are licensed with calculated (predicted) data.

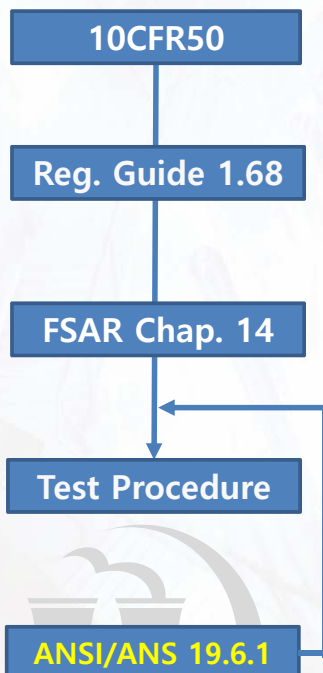
²⁾ Percent difference is $(Highest - Lowest) \times 100/Avg$, where *Highest* is the largest measured value in a particular symmetric location, *Lowest* is the smallest measured value, and *Avg* is the average of all the measured values in the same symmetric location (which could be 2, 4, or 8 values).

³⁾ The rms is defined as $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta RPD)_i^2}{N}}$.

1 원자로특성시험 개요



ANSI/ANS 19.6.1 (2011)



12

Table A.2 – Problem identification

Standard Test	PROBLEM →									
	Core misloading ¹⁾	Loss of rod worth	Fuel (assembly) bowing/damage	Boron (¹⁰ B) content	Analytical errors	Flow/temperature anomalies	Burnable poison loss	Mechanical failure/misloading of control rod	Enrichment error	Excessive fuel crudding
HZP critical boron: ABO	2			1	1		2	2	2	2
Rod worth	2	1	2		1		2	1	2	1
ITC				2	1				2	2
Flux symmetry	1	2	2		1	2	2	1		2
Power distribution	1		2		1	1	1	1	1	2
HZP to HFP reactivity measurement				1	1		2	2	2	2

KEY
 1: This problem will most likely cause an unexpected result for the test.
 2: This problem may cause an unexpected result for the test.
¹⁾ Includes all associated fuel and control components and inserts.



2 Chapter

국내 원자로특성시험 기술개발 경험

동적 제어봉 제어능 측정법 개발

증수로 L2C 제어능 측정법 개발

디지털 반응도계산기 개발

원자로특성시험 교육시스템 개발

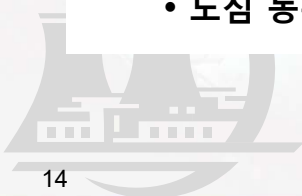


13

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



- 국내 가압경수형 원전은 매 재장전 주기마다 출력상승 이전에 원자로 특성 시험을 통하여 재장전 노심 설계를 확인
- 원자로 특성 시험시 설계검증을 위한 제어봉 제어능 측정 시험은 필수
- 기존 방법: 제어봉 교환법(Rod Swap Method)
 - 약 12 시간 소요
 - 적분 제어능 측정
 - 기준제어봉 측정시 봉산 희석법을 사용
- 개선 방법: 동적 제어봉 제어능 측정(DCRM)
 - 약 4시간 소요
 - 미분 및 적분 제어능 측정
 - 봉산 변경 없음
 - 노심 동특성 해석과 이에 따른 Hardware 개선이 필요



14

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



Rod Insertion Method KRSKO NPP(Slovenia), 1989

WEC

DRWM (Dynamic Rod Worth Measurement)

- NRC Approval : 1996
- Performance Times : > 200

- | | | |
|----------------|---------------|------------------|
| • Almaraz | • Ascó | • Braidwood |
| • Byron | • Callaway | • Catawba |
| • D.C.Cook | • Farley | • Ginna |
| • Indian Point | • Kewaunee | • McGuire |
| • Millstone 3 | • Point Beach | • Prairie Island |
| • Ohi | • Salem | • Seabrook |
| • Sizewell B | • South Texas | • Vandellós |
| • Vogtle | • Watts Bar | • Wolf Creek |

- SDRWM (Subcritical Dynamic Rod Worth Measurement)
- DRWM in Initial Plant (2012)

KHNP

DCRM (Dynamic Control rod Reactivity Measurement)

- KINS Approval : 2006
- Performance Times : > 60

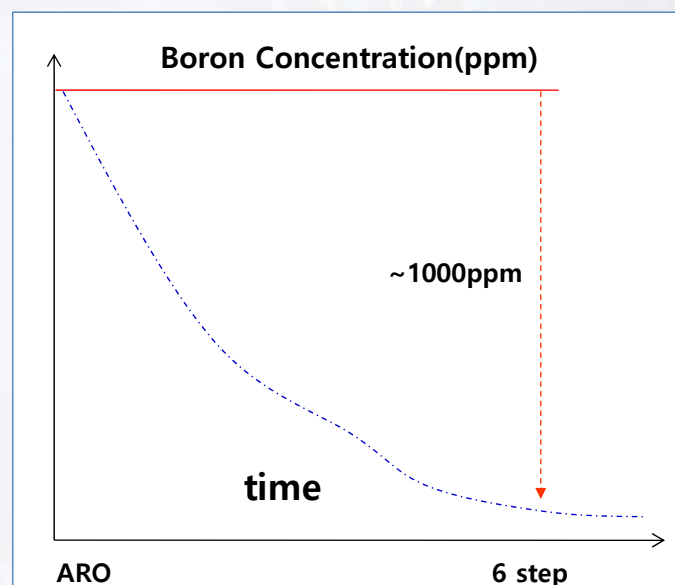
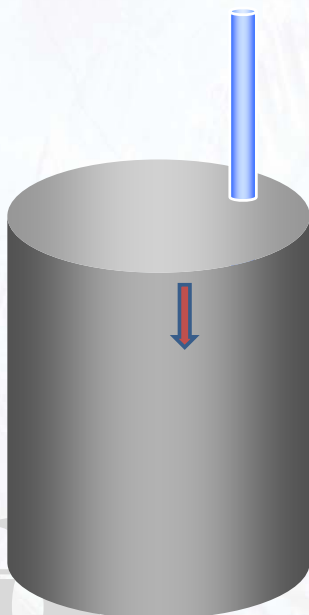
- | | |
|------------------------|-----------------|
| • KR #1, 2 (WH) | • KR #3, 4 (WH) |
| • UC #1, 2 (Framatome) | • YG #1, 2 (WH) |
| • YG #3, 4 (CE) | • YG #5, 6 (CE) |
| • UC #3, 4 (CE) | • UC #5, 6 (CE) |

- Reactivity Measurement for Liquid Zone Controller in CANDU (2012)

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



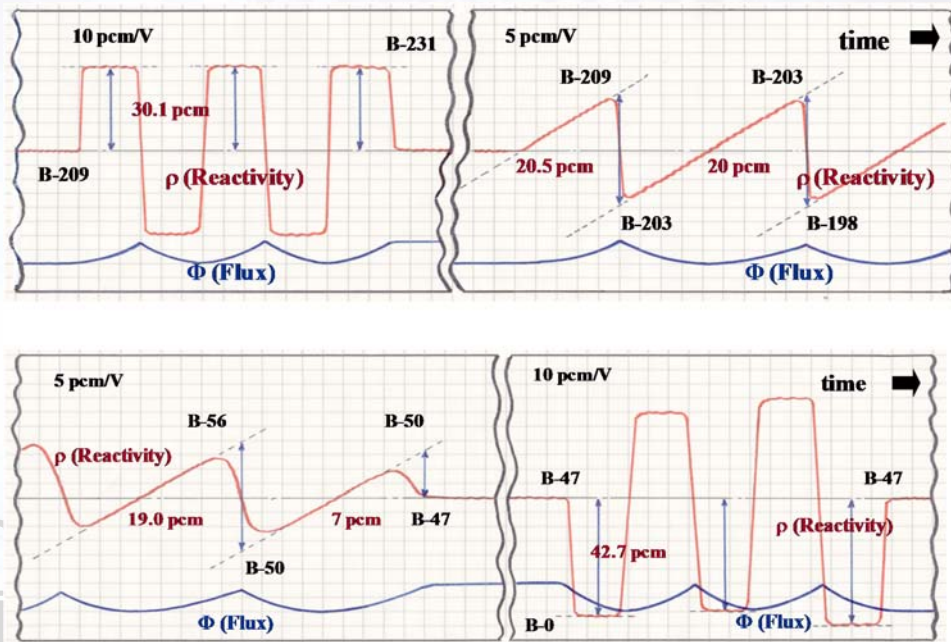
기준 제어봉제어능 측정 - 1



2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



기준 제어봉제어능 측정 - 1

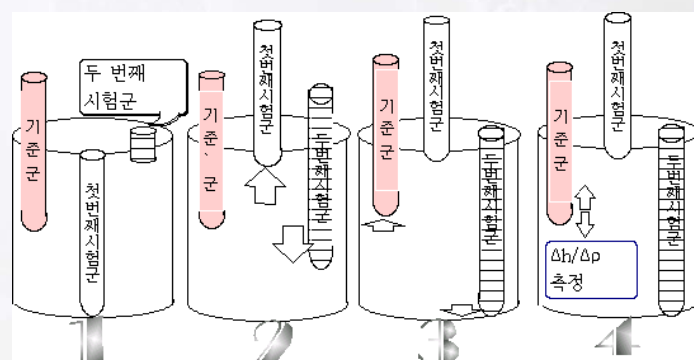
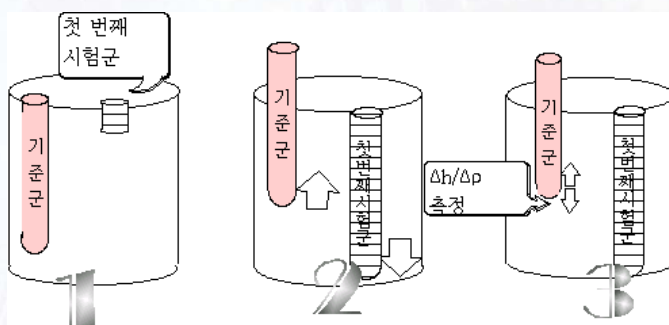


17

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



제어봉교환법에 의한 제어능측정- 1



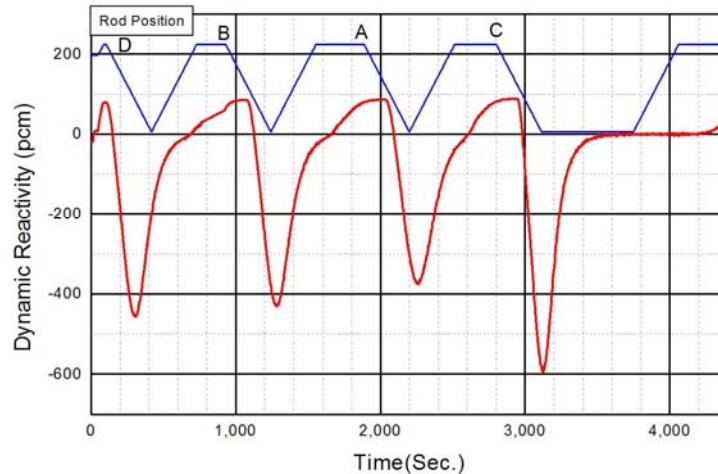
18

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법

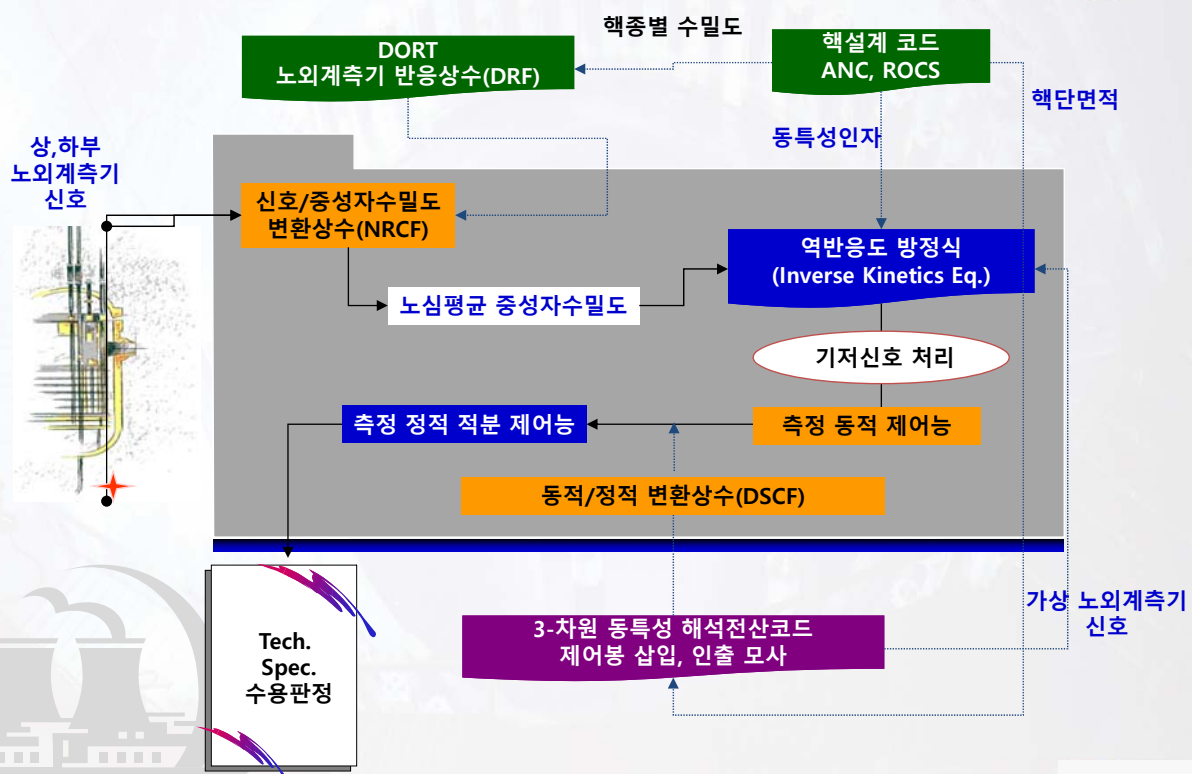


- **The initial conditions of DCRM Test**
 - A core is critical at Hot Zero Power
 - The RCS temperature stable
 - RCS boron concentration stable
 - All bank fully withdrawn except D bank, inserted to about 200 steps

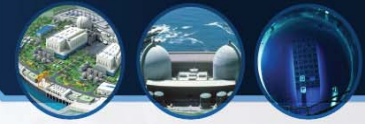
- The Procedure of DCRM



2-1 동적 제어봉 제어능 측정법

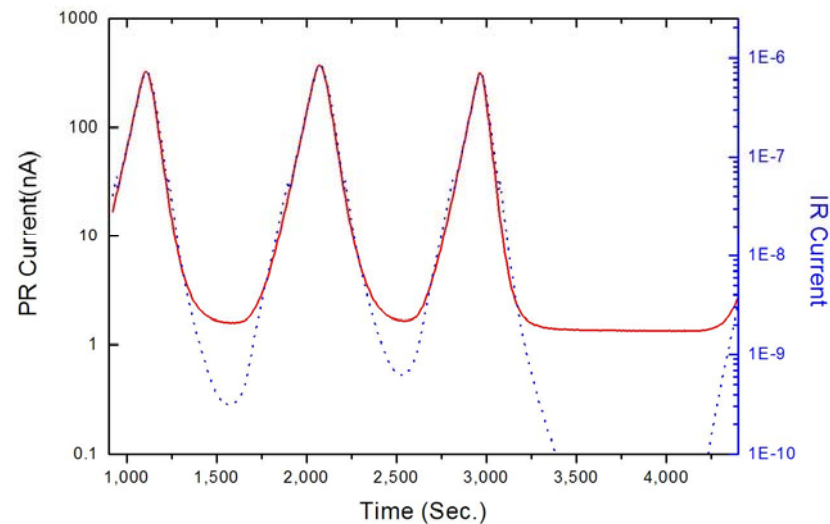


2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



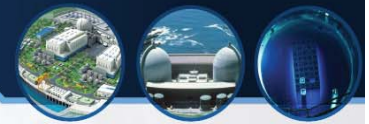
• The recent trends in PWRs

- Low leakage loading pattern \Rightarrow Low detector signal
- Long operating cycle length \Rightarrow High background signal
- Shot refueling outage \Rightarrow High background signal

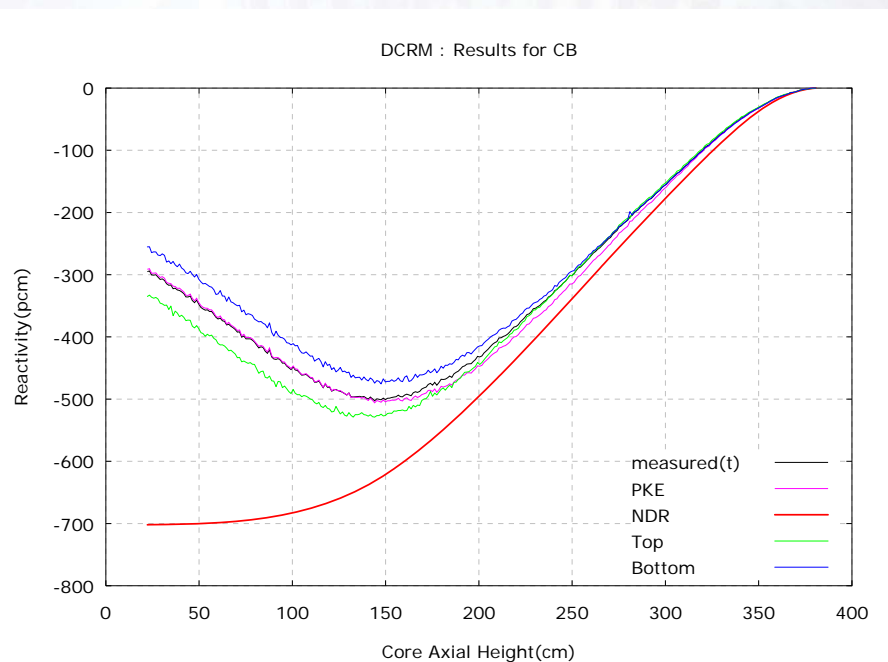


21

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



• The result of actual uncompensated Inverse Kinetics



22

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



• Clean System

$$\frac{d\bar{n}(t)}{dt} = \left(\frac{\rho(t) - \beta(t)}{\Lambda(t)} \right) \bar{n}(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i(t) \bar{C}_i(t), \quad \frac{d\bar{C}_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i(t)}{\Lambda(t)} \bar{n}(t) - \lambda_i(t) \bar{C}_i(t).$$

• Actual System Contaminated with BS

$$\frac{d\bar{N}(t)}{dt} = \left(\frac{\rho(t) - \beta(t)}{\Lambda(t)} \right) \bar{N}(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i(t) \tilde{C}_i(t) + S_{ext}(t), \quad \frac{d\tilde{C}_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i(t)}{\Lambda(t)} \bar{N}(t) - \lambda_i(t) \tilde{C}_i(t).$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} N(t) = n(t) + \gamma(t) \cong n(t) + \gamma \\ \therefore n(t) = N(t) - \gamma \end{cases}$$

$$\frac{d\bar{n}(t)}{dt} = \left(\frac{\rho(t) - \beta(t)}{\Lambda(t)} \right) \bar{n}(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i(t) \bar{C}_i(t) + S_{ext}(t), \quad \frac{d\bar{C}_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i(t)}{\Lambda(t)} \bar{n}(t) - \lambda_i(t) \bar{C}_i(t).$$

Guess $S_{ext}(t) \sim 10\%$ of $n(0)$

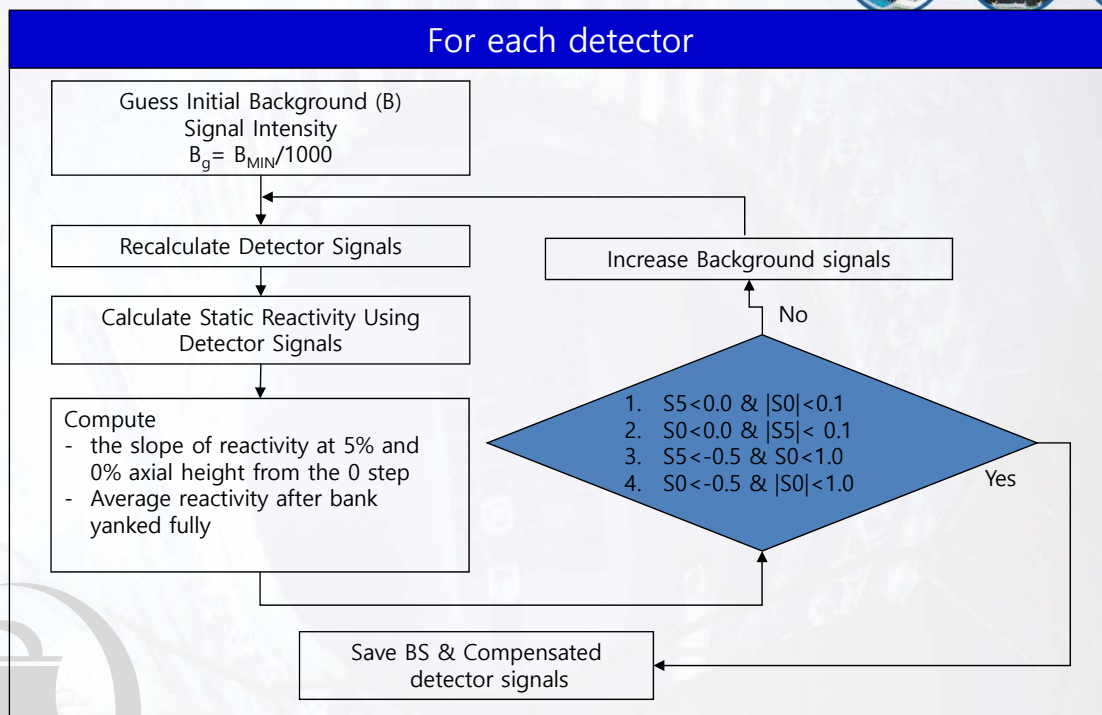
Guess $\Delta\gamma\text{-ray} \sim 1/1000$ of n_{min}

Cal. P.K.E with revised $n(t)$ iteratively

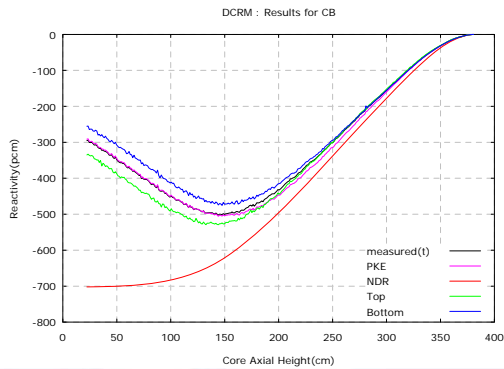
2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



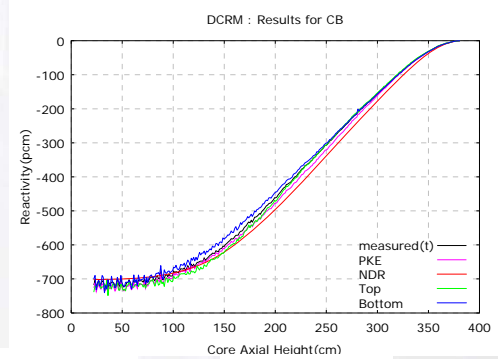
For each detector



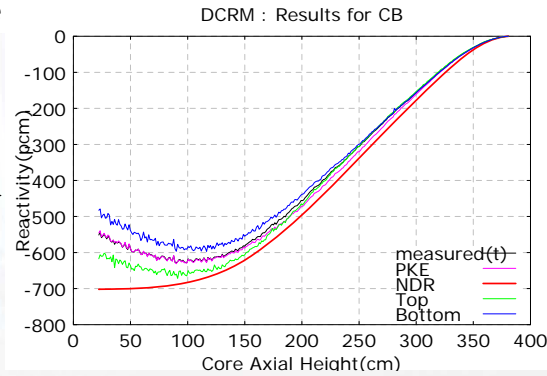
2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



Uncompensated Case



Optimal BS



Search BSs iteratively

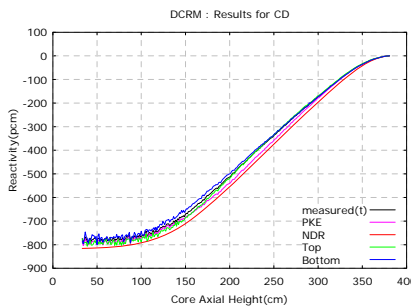
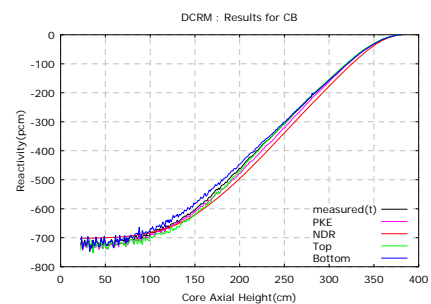
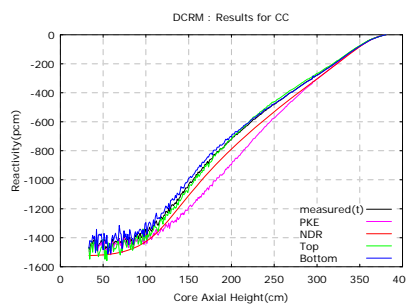
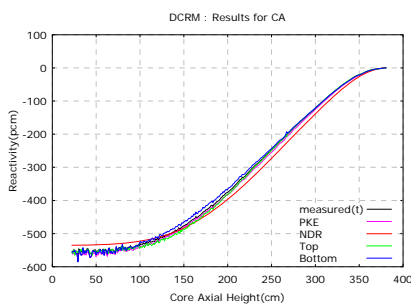
A Test Bank (700pcm)

25

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



고리 2호기 18주기 (결과)



CEA Type	RSM용 설계치	RSM 측정치	오차 (%)	DCRM용 설계치	DCRM	오차 (%)
CA	544	514.5	-5.4	531.7	533.4	0.3
CB	711	680.9	-4.2	697.3	711.7	2.1
CC	1,536	1,482.0	-3.5	1,498.5	1,484.7	-0.9
CD	824	775.7	-5.9	814.3	767.5	-5.7
계	3,615	3,453.1	-4.5	3,541.8	3,497.3	1.3

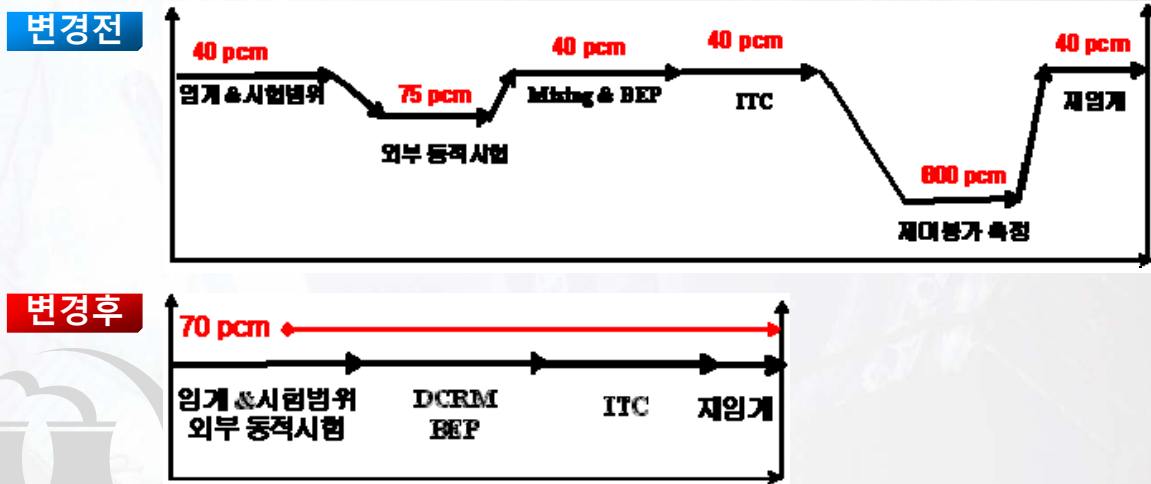
-10% < 총계 오차 < 10%

26

2-1 동적 제어봉 제어능 측정법



- 노심교란 최소화 => 안정성 향상
- 시험기간 동안 봉소농도 고정 => 액체폐기물 생성 최소화
- DCRM 적용 => 영출력 특성시험 수행시간 약 10시간 단축



27

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



◆ 중수로 영출력 원자로특성시험(PHASE-B) 경험사례 검토

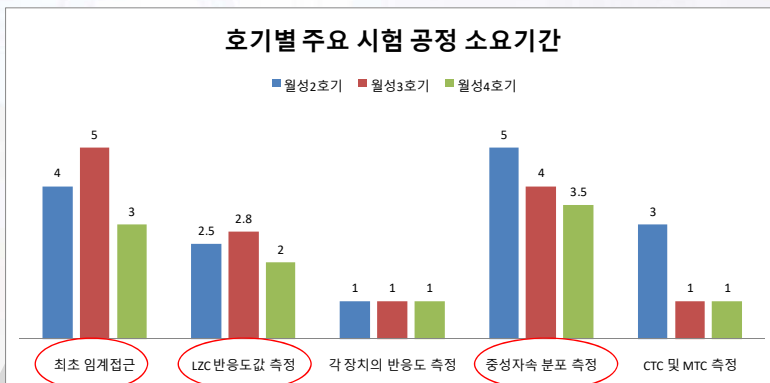
월성1호기 설비개선

- 발전소 경년열화에 따른 압력관 및 피더관 전량 교체
- 대단위 설비개선 후 초기 기동 시험 수행 (2011. 04)
- 초기기동시험 시간의 단축은 발전소 이용율 향상에 직접관련
- 많은 시험 중 원자로 영출력 특성시험(노심설계 검증)은 절대공정

영출력 특성시험 중 절대공정

- 최초 임계접근
- 액체영역제어기 반응도가 측정
- 중성자속 분포 측정

중수형 원자로 영출력 특성시험 공정 별 소요시간

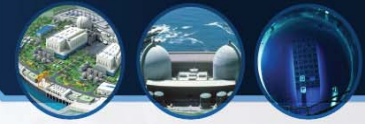


중수형 원자로 특성시험 기술 개선 필요

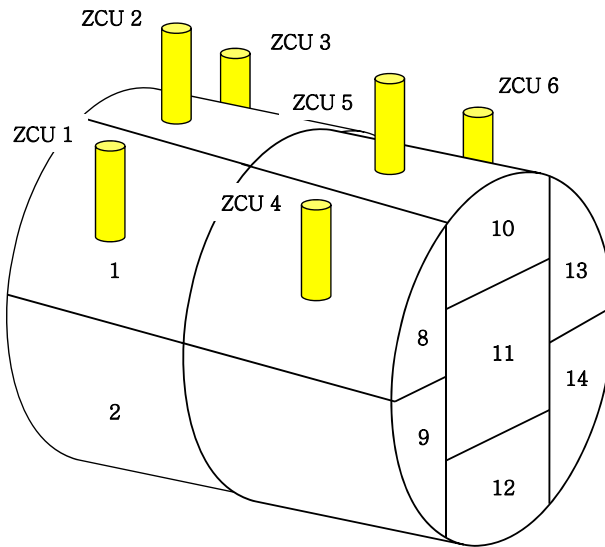
중수로 초기노심 원자로
특성시험 기간 단축 및
정확도 향상

28

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



액체영역제어기



기능 및 구성

구성

- 상부 6개 영역에 14개 격실로 구성
- 경수수위 제어를 통한 반응도 제어

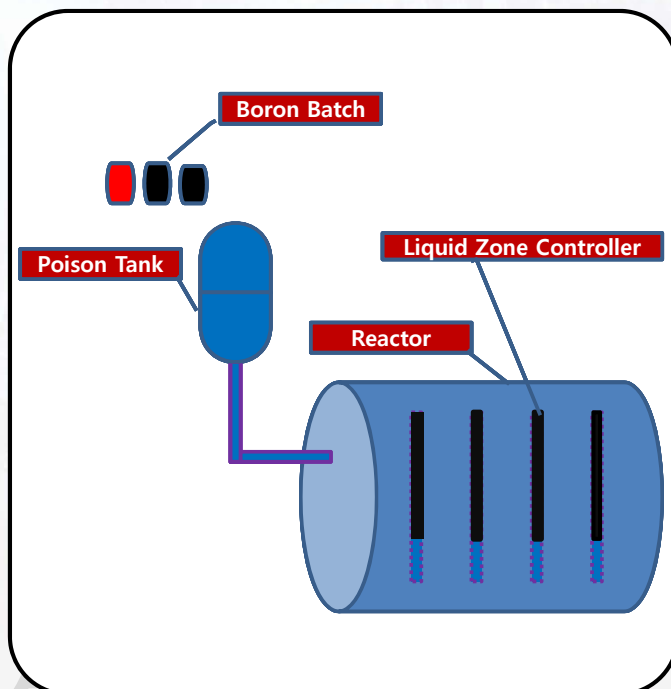
기능

- 원자로 전체 출력 제어
- 원자로 국부과출력 제어
- 저출력 특성시험시 기타 다른 제어봉 제어능 측정 기준

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



◆ 기존 방법론 검토 및 개선방향



문제점

- (1) 보론 Batch 투입 시 보론 첨가탱크의 투입구 세정이 불량하여 반응도계수 계산 부정확. 보론 첨가탱크 및 투입구 세정에 장시간 소요
- (2) 보론 첨가탱크에서 감속재계통으로 보론 주입, 감속재 내 균일 혼합 및 액체영역 수위 안정화에 장시간 소요
- (3) 보론 첨가탱크의 투입구 내로 공기가 유입되어 시험이 제대로 수행할 수 없는 가능성이 있음 (월성 3,4호기 기경험)

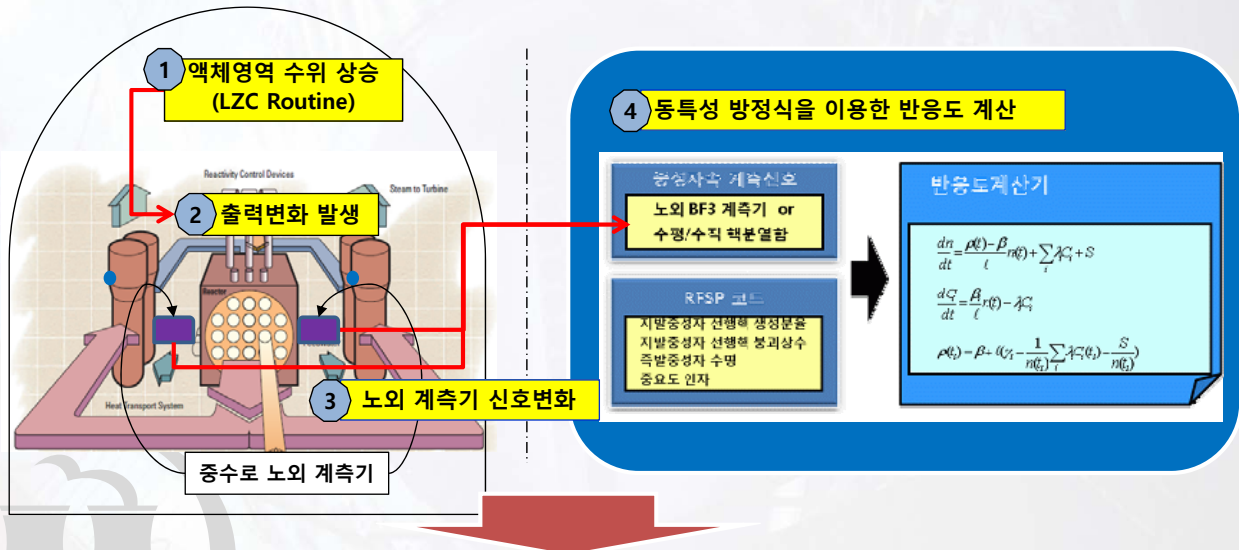
개선방향

경수로 반응도계산기 도입을 통한 액체영역제어기 반응도 계산 방법 적용

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



노심 출력변동에 따른 노외계측기 신호를 이용한 액체영역제어기 반응도가를 측정하는 “노외계측기 신호를 이용한 반응도가 측정방법” 개발



장점 : 가압경수형 원전에서 검증된 반응도 측정법, LZC 반응도 측정 시간 단축

31

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



◆ 반응도 측정을 위한 역반응도 관계식

점반응도 관계식
(6개 지발중성자군+11개 광중성자군)

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(\rho(t) - \beta)}{\Lambda(t)} n(t) + \sum_{i=1}^{17} \lambda_i(t) Q_i(t),$$

$$\frac{\partial Q_i(t)}{\partial t} = -\lambda_i(t) Q_i(t) + \beta_i(t) \frac{n(t)}{\Lambda(t)},$$

역반응도 관계식

$$\rho(t_n) = \sum_k \beta_k^{t_n} \left(e^{-(\lambda_k^{t_n} + \omega_k) \Delta t_n} \frac{\lambda_k^{t_n}}{\lambda_k^{t_{n-1}}} B_{n-1,k} + A_{n,k} \right) + \Lambda \omega_n - S_0 \frac{\Lambda}{n_n},$$

$$\omega_n = \frac{1}{\Delta t} \ln \left(\frac{n_n}{n_{n-1}} \right)$$

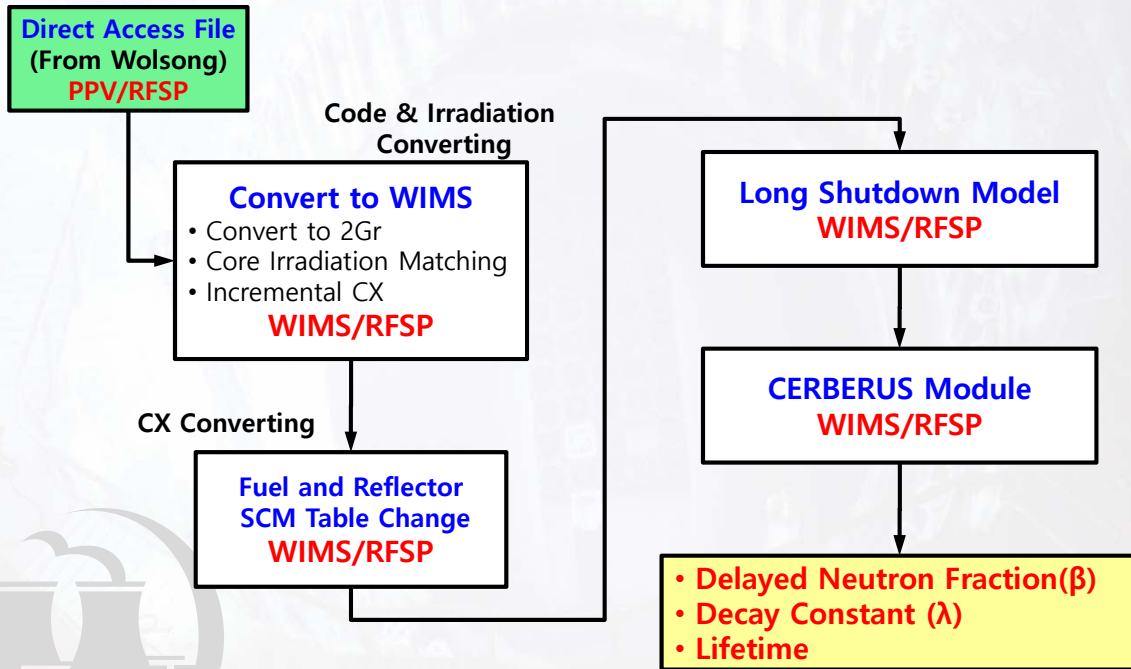
- 광중성자군을 고려한 17개군 동특성 인자를 적용한 반응도측정용 역반응도 관계식 도출

32

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



◆ 동적 파라미터 (β , λ , Λ) 생산을 위한 전산체계

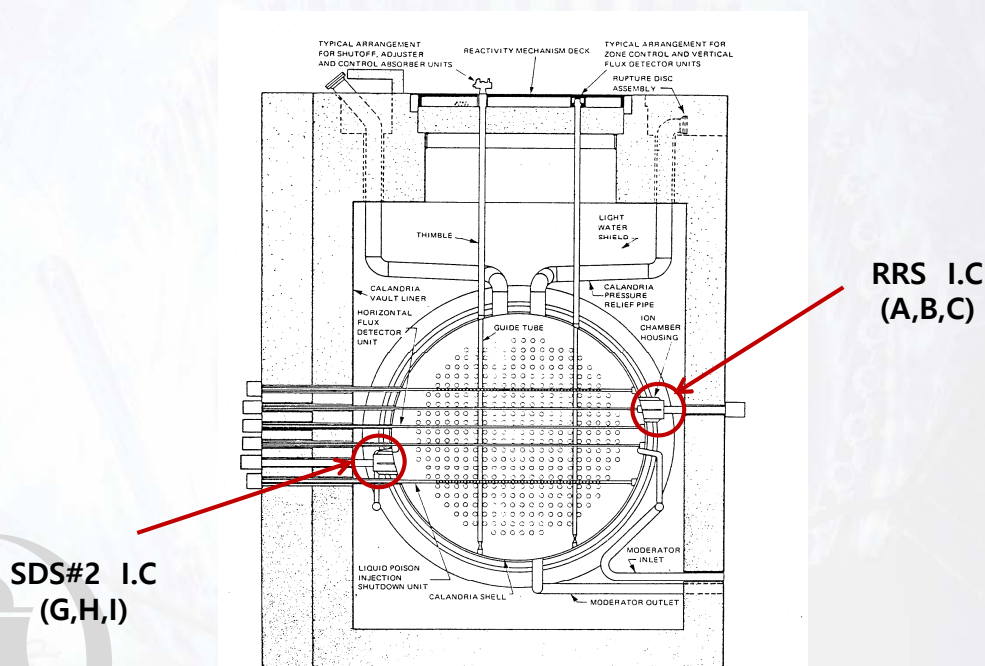


33

2-2 중수로 LZC 제어능 측정

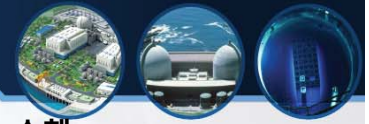


◆ 노외계측기 노심출력 대표성



34

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



월성 2호기 노내외 계측기 실측자료를 이용한 노외계측기 활용성 평가 수행

노내외 계측기 반응도 비교 (월성 2호기, 2009.9.11)

시험항목		In-Core (A, mk)	Ex-Core (B, mk)	편차 (A-B, mk)
CASE 1	1	0.083	0.086	-0.003
	2	0.083	0.088	-0.005
	3	0.087	0.082	0.005
	4	0.076	0.081	-0.005
	5	0.072	0.071	0.001
	6	0.080	0.087	-0.007
	7	0.073	0.082	-0.009
CASE 2	1	0.130	0.129	0.001
	2	0.123	0.123	0.000
	3	0.127	0.123	0.004
	4	0.111	0.112	-0.001
	5	0.113	0.111	0.002
	6	0.113	0.116	-0.003
	7	0.115	0.112	0.003
평균 편차(mk)				- 0.001

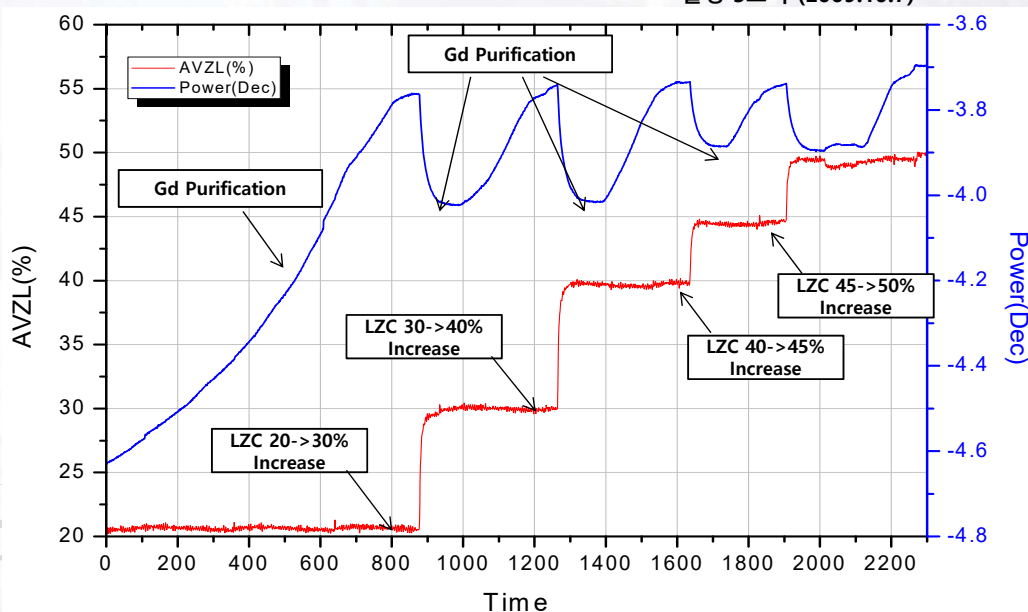
35

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



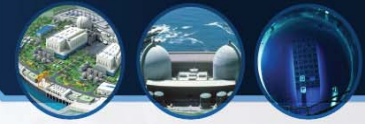
◆ 액체영역제어기 반응도 측정 예비시험 결과

월성 3호기 (2009.10.7)

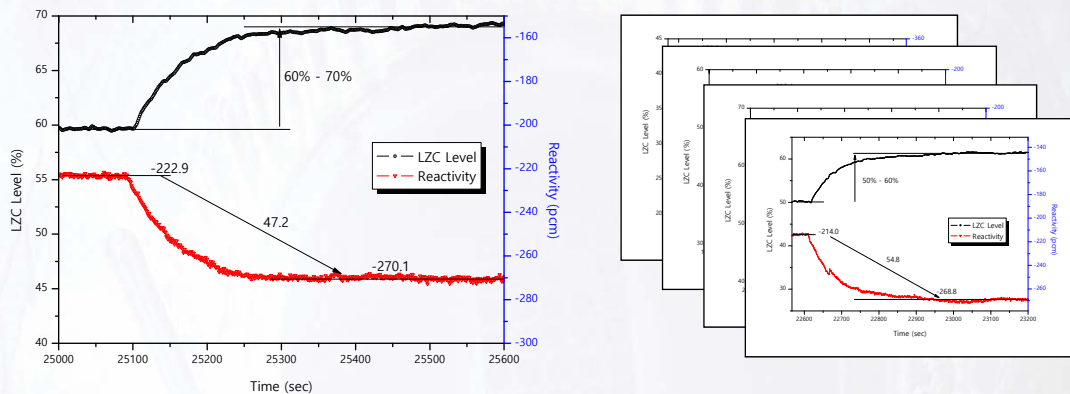


36

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



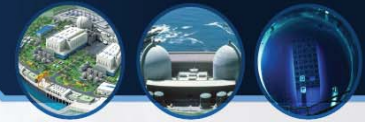
◆ 월성 2호기 액체영역제어기 반응도 측정 예비시험 결과



LZC 수위(%)		설계 반응도 (A, mk)	측정 반응도 (B, mk)	편차 (B-A mk, %)
변경전	변경후			
20.3	28.6	0.434	0.423	-0.011mk, -2.6%
31.1	39.6	0.446	0.463	0.017mk, 3.7%
40.4	49.3	0.471	0.466	-0.005mk, -1.1%
50.3	61.4	0.574	0.548	-0.026mk, -4.7%
59.8	68.8	0.471	0.472	0.001mk, 0.2%
합 계		2.396	2.372	0.024mk, -1.0%

37

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



◆ 월성2,3호기 액체영역제어기 반응도 측정 예비시험 결과

측정값과 시뮬레이션 결과 비교

Unit	Zone Level(%)		*Reactivity Change (mk)	Measured Worth (mk)	Difference (Mea. - Cal.)
	Before	After			
W-2 ¹⁾	20.3	28.6	0.434	0.423	-0.011mk, -2.6%
	31.1	39.6	0.446	0.463	0.017mk, 3.7%
	40.4	49.3	0.471	0.466	-0.005mk, -1.1%
	50.3	61.4	0.574	0.548	-0.026mk, -4.7%
	59.8	68.8	0.471	0.472	0.001mk, 0.2%
W-3 ²⁾	20.7	29.6	0.636	0.677	0.041mk, 6.1%
	29.8	39.7	0.681	0.690	0.009mk, 1.3%
	39.8	49.2	0.634	0.679	0.045mk, 6.6%

1) D, E, G, J 계측기 신호만 사용

2) D, E, F, G, J 계측기 신호만 사용(Gd 희석효과 미반영)

* WIMS/RFSP-IST 코드기반

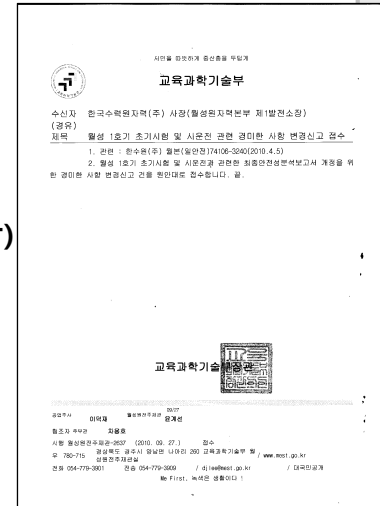
38

2-2 중수로 LZC 제어능 측정



연구 추진결과

- 훈련센터 시뮬레이터 1차 TEST : 2009. 2.13 (월성원자력본부 훈련센터)
- 훈련센터 시뮬레이터 2차 TEST : 2009. 2.27 (월성원자력본부 훈련센터)
- 훈련센터 시뮬레이터 3차 TEST : 2009. 3. 6 (월성원자력본부 훈련센터)
- KINS 사전 설명회 : 2009. 3.30 (KINS)
- 월성 4호기 Test : 2009. 7. 8 (월성원자력본부 4호기)
- 월성 2호기 Test : 2009. 9. 9 (월성원자력본부 2호기)
- 월성 3호기 Test : 2009.10. 7 (월성원자력본부 3호기)
- 인허가보고서 작성 (2009.12)
- 현장 시험절차서 개정(안) (2010.02)
- 월성 1 호기 최종안전성분석보고서 14.12.2.2a 개정(안) (2010.03)
- KINS 사전협의회 : 2010. 3.10 (월성원자력본부 제1발전소)
- 규제기관 인허가 취득 : 2010. 08



2-3 디지털 반응도계산기 개발



현장신호
출력영역 노외계측기 전류신호

핵설계 보고서
지발중성자 선행핵 생성분율
지발중성자 선행핵 붕괴상수
즉발중성자 수명
중요도 인자



PC
Reactor Kinetics Equation :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\ell} n(t) + \sum_i \lambda_i C_i + S$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\ell} n(t) - \lambda_i C_i$$

$$\rho(t) = \beta + \ell \left(\gamma_1 \frac{1}{n(t)} \sum_i \lambda_i C_i(t) - \frac{S}{n(t)} \right)$$

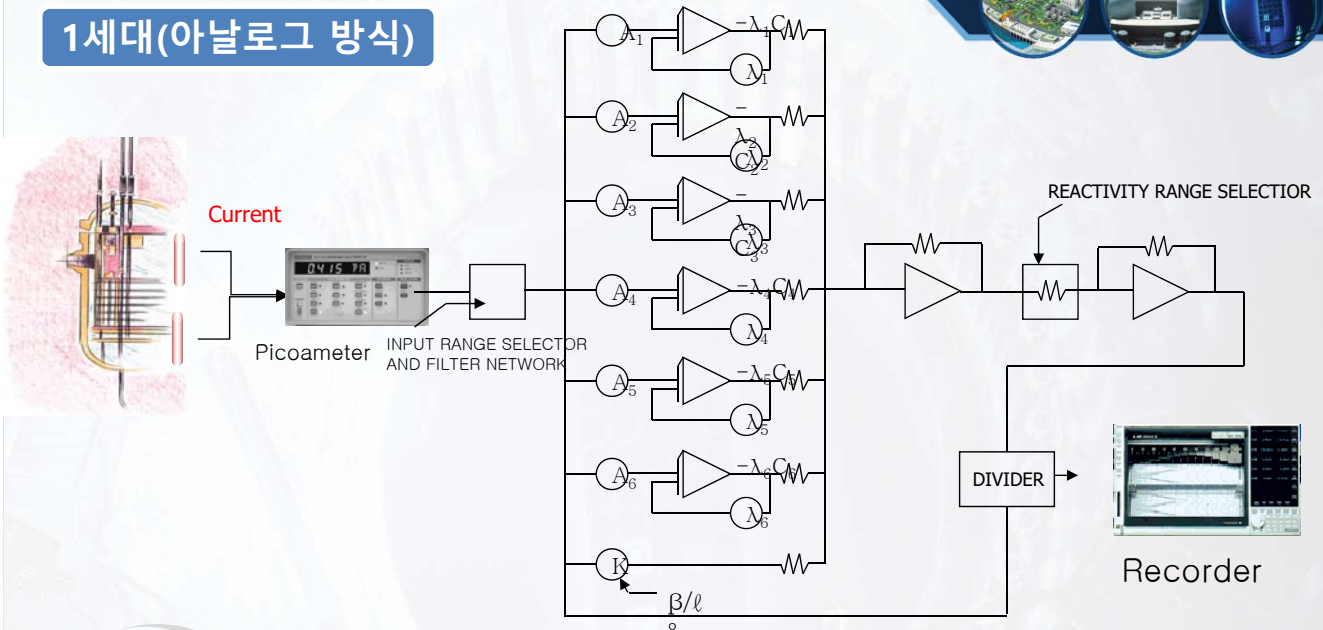


Analysis

BEP Measurement
ITC_MTC Measurement
Rod Worth Measurement
Exchange Rod Worth Measurement

2-3 디지털 반응도계산기 개발

1세대(아날로그 방식)



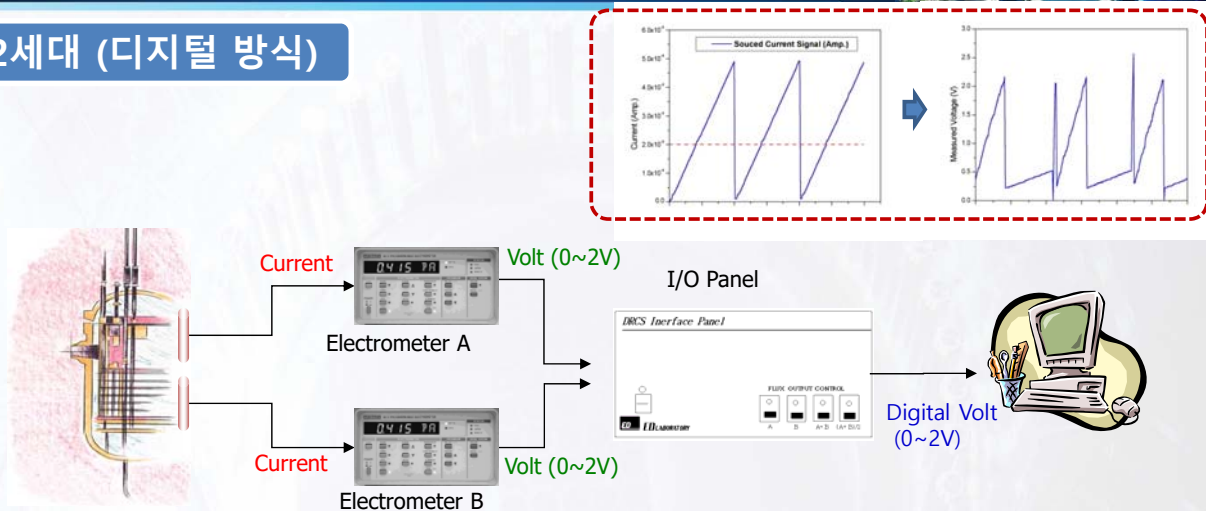
- Operational Amplifier로 표시된 반응도계산 방정식을 회로적으로 계산
- 반응도 계산기 입력상수는 Potentio-meter를 이용하여 하드웨어적으로 입력
- 장비 노후화, 교정 및 장비 조작자에 따라 정확도가 변함
- 정확한 반응도 계산을 위하여 설치후 자체 점검/진단 불가능 -> 외부 동적시험 필수

41

41

2-3 디지털 반응도계산기 개발

2세대 (디지털 방식)

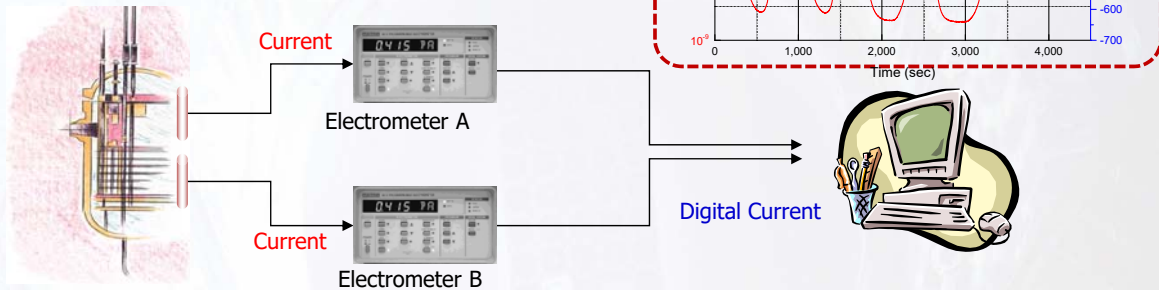


- 전산환경 및 계측기술 개선
- PR 계측기 아날로그 신호 -> 디지털 신호로 변환
- 개인용 컴퓨터에서 반응도계산 방정식을 수치해석적으로 계산
- Electrometer의 대역변동으로 연속적인 출력신호 취득이 불가능
- 설치/점검 ▪ 유지/보수 간편
- KINS 특허등록 ▪ 국내 업체 공급

42

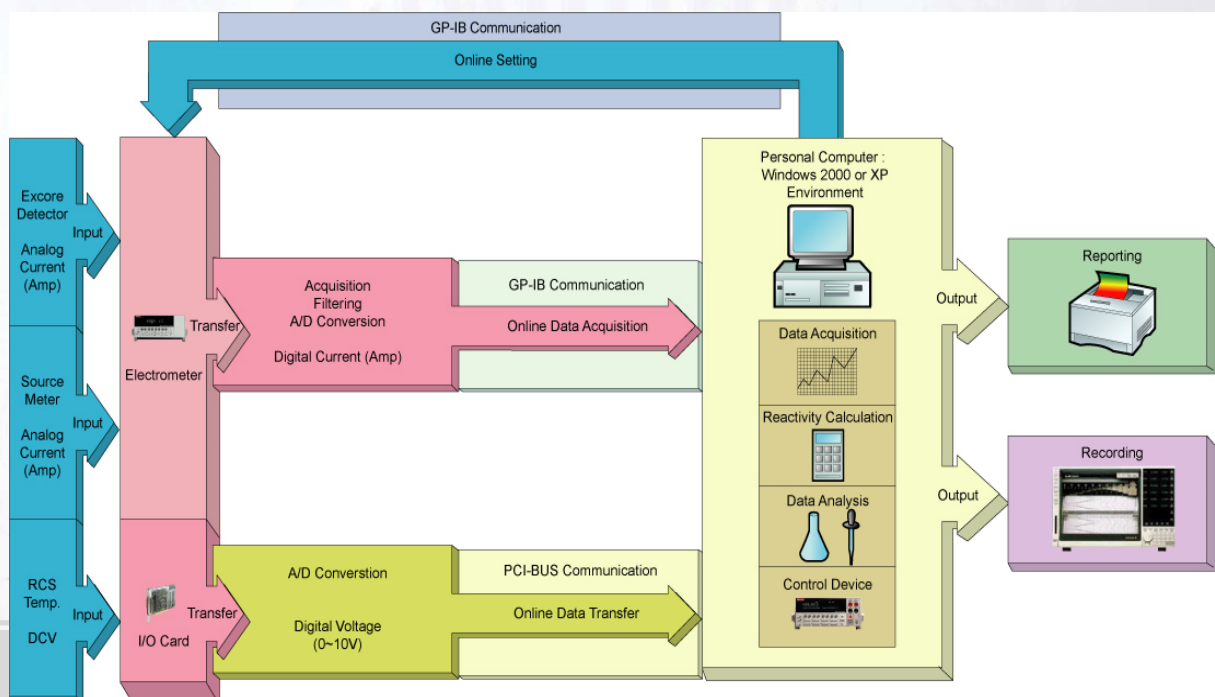
2-3 디지털 반응도계산기 개발

3세대 (디지털 방식)



- GPIB 통신을 이용하여 Electrometer로 부터 **디지털 전류신호**를 PC에서 직접 취득
- 연속적인 노외계측기 전류신호 측정이 가능 \Rightarrow DCRM 적용 가능
- 매 1초간격으로 측정 전류신호를 GPIB 통신으로 전송 \Rightarrow Sampling Rate 감소

2-3 디지털 반응도계산기 개발



2-3 디지털 반응도계산기 개발

현황

- 최근 국내 원전 LLPT 수행 중 동적 제어봉 제어능 측정(DCRM) 시 시험기준 불만족 사례 3차례 발생
 - 단일 제어봉 오차 : 불만족 사례 다수 있음
 - 전체 제어봉가 오차 : 불만족 사례 없음
- 지속적인 국내 원전의 DCRM 적용을 위하여 근본원인 규명 및 대책 수립이 필요

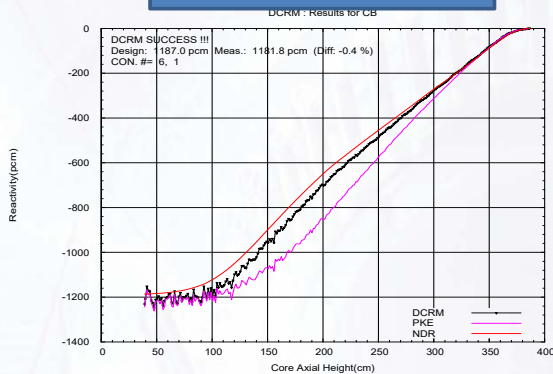
분석방법

- 해외 원전
 - INPO(Institute of Nuclear Power Operations)의 국제 온라인 정보교환시스템 자료 활용
 - 미국 내 WEC사의 DRWM 적용 원전의 실패사례 조사
- 국내 원전
 - DCRM을 적용하는 국내 모든 호기/주기를 대상으로 재분석
 - Roots & Cause 분석법 적용

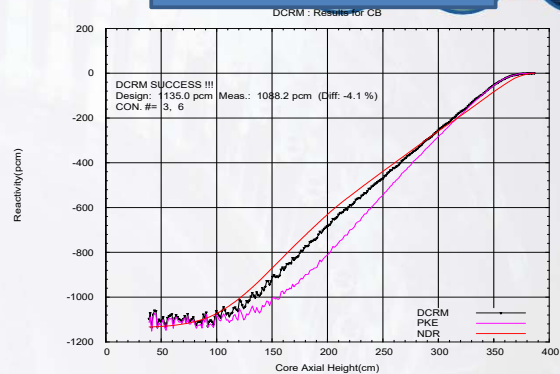
45

(국내 사례)

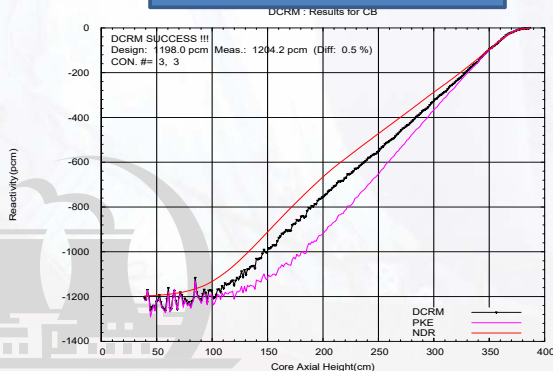
고리 3호기 19주기 (N41) : CB



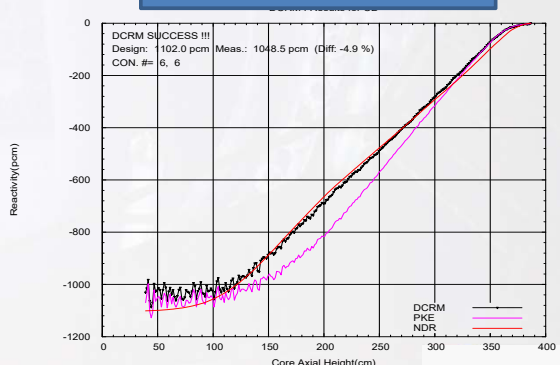
고리 3호기 20주기 (N41) : CB



고리 3호기 21주기 (N41) : CB



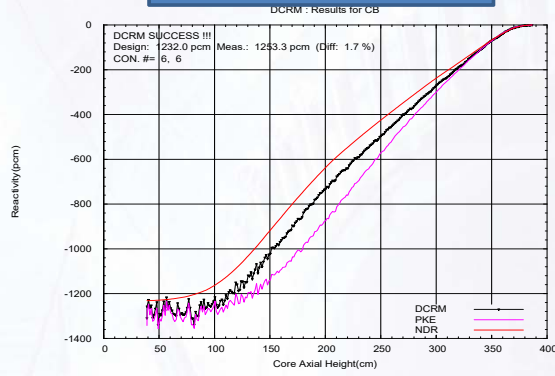
고리 3호기 22주기 (N41) : CB



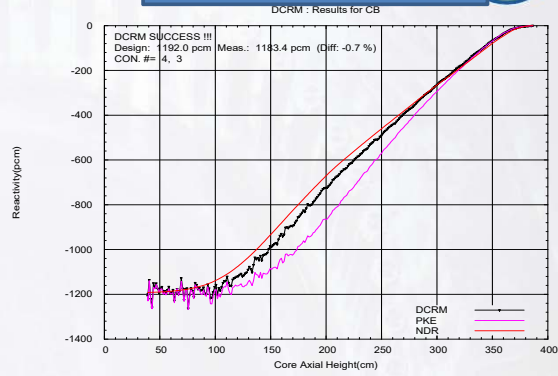
46

(국내 사례)

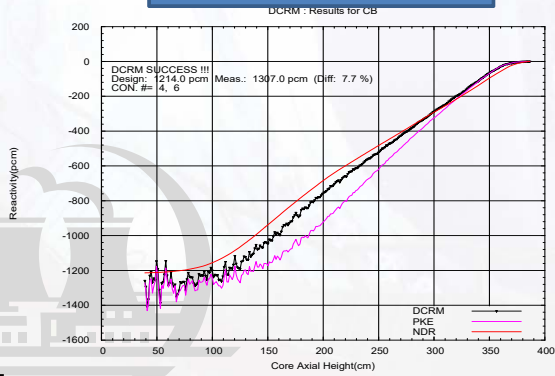
한빛 1호기 17주기 (N41) : CB



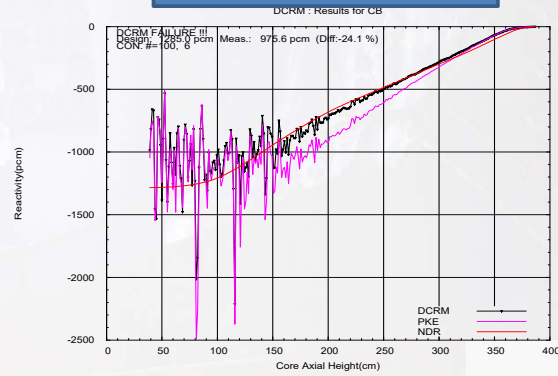
한빛 1호기 18주기 (N41) : CB



한빛 1호기 19주기 (N41) : CB



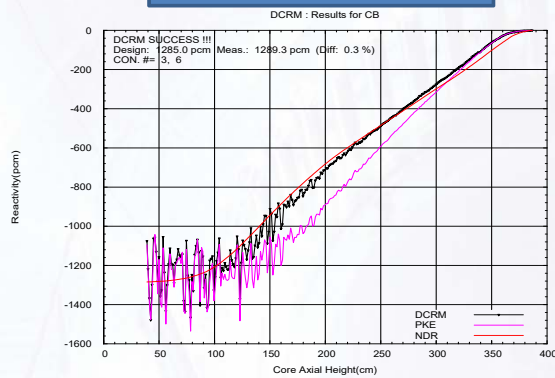
한빛 1호기 20주기 (N41) : CB



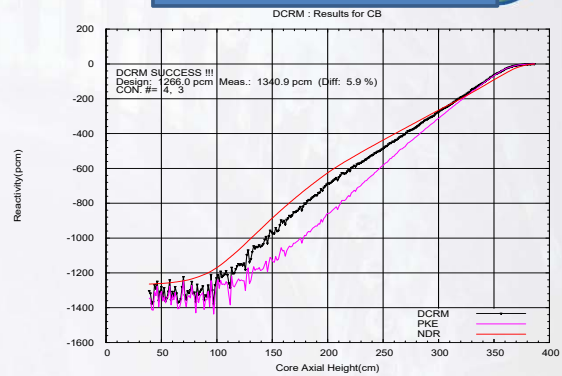
47

(국내 사례)

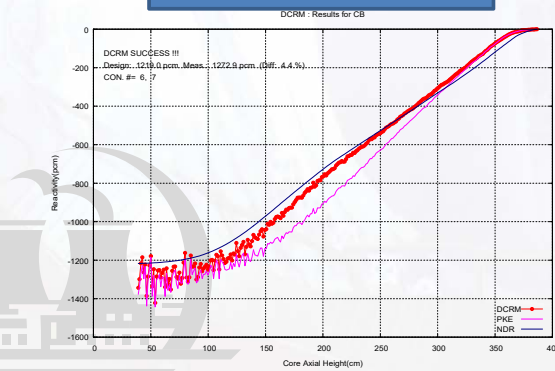
한빛 1호기 20주기 (N42) : CB



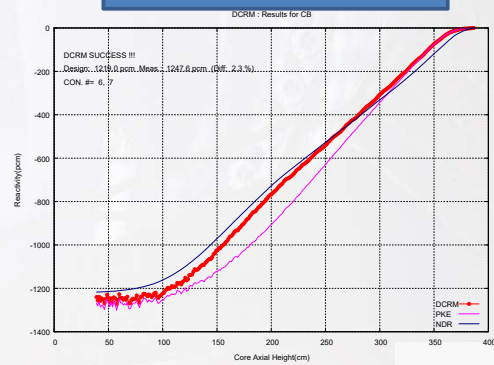
한빛 1호기 21주기 (N41) : CB



한빛 1호기 22주기 (N42) : CB



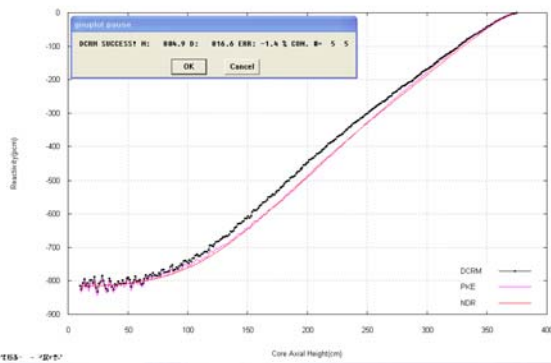
한빛 1호기 22주기 (N42) : CB



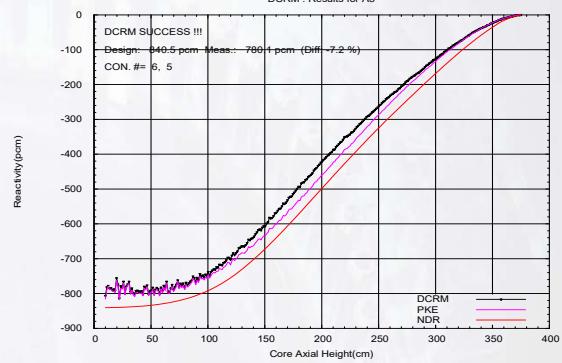
48

(국내 사례)

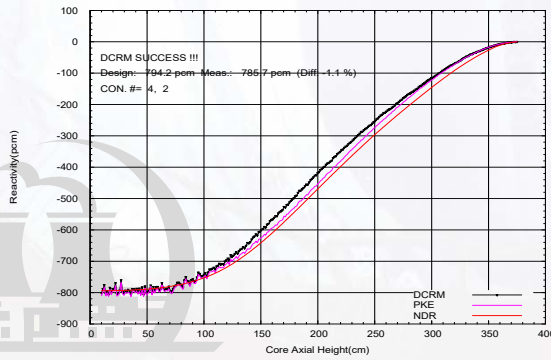
한울 5호기 3주기 (170nA) : A5



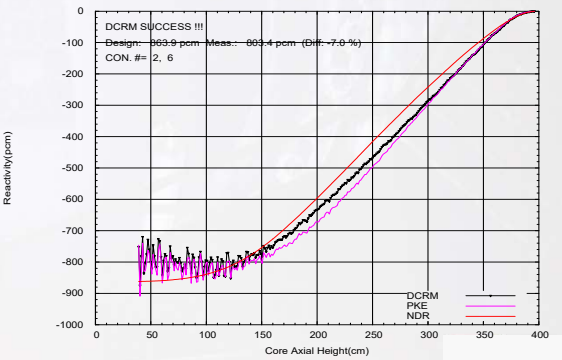
한울 5호기 4주기 (165nA) : A5



한울 5호기 5주기 (130nA) : A5

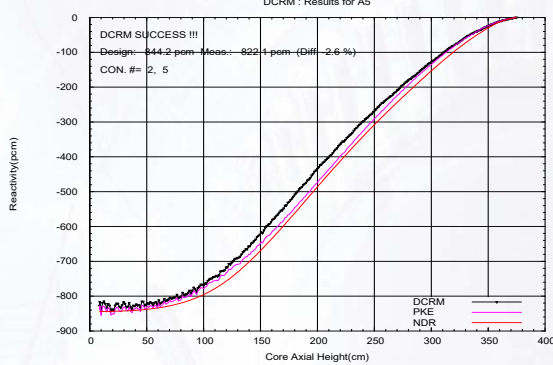


한울 5호기 7주기 (115nA) : A5

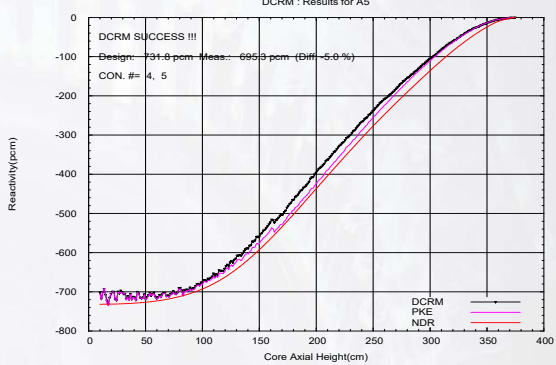


(국내 사례)

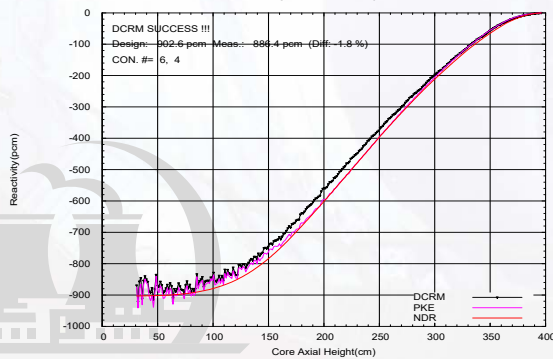
한빛 5호기 11주기 : A5



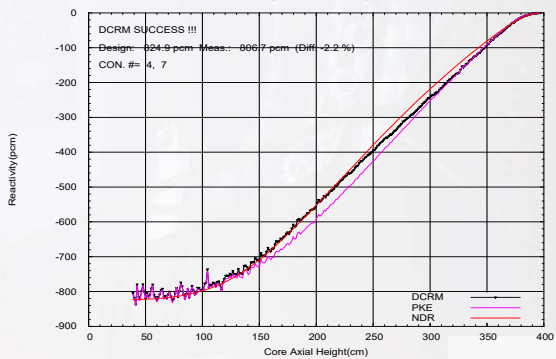
한빛 5호기 12주기 : A5



한빛 5호기 13주기 : A5

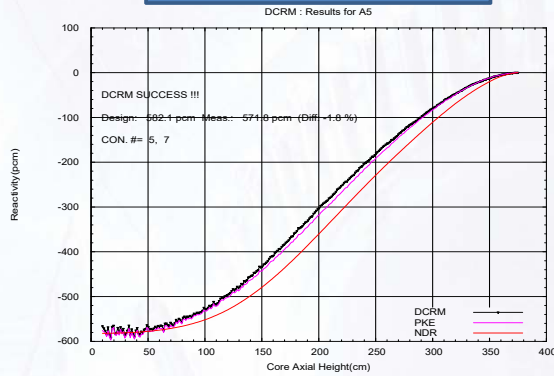


한빛 5호기 14주기 : A5

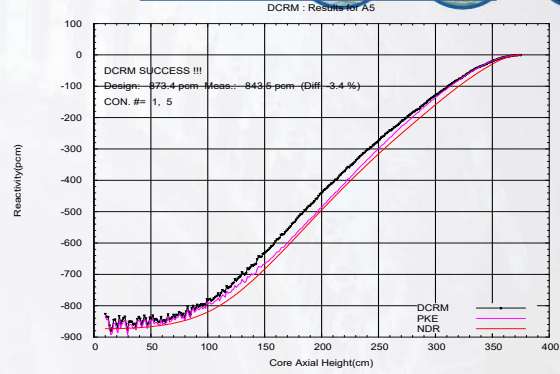


(국내 사례)

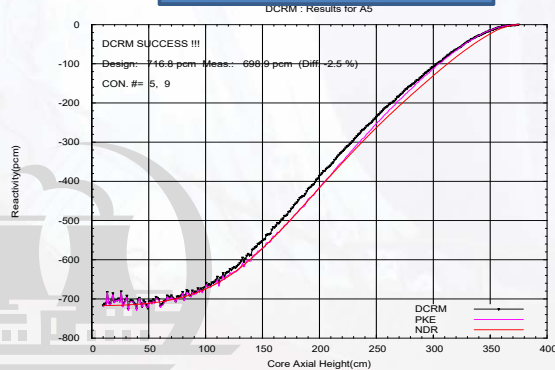
한울 6호기 3주기 (290nA) : A5



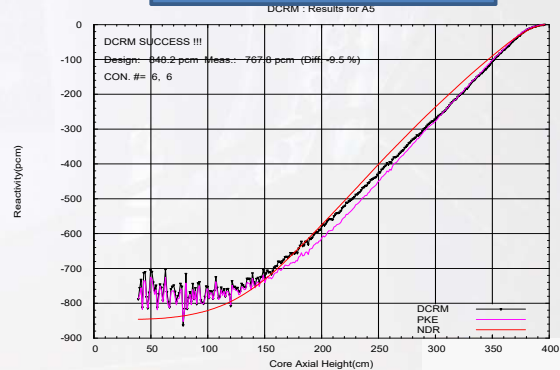
한울 6호기 4주기 (100nA) : A5



한울 6호기 5주기 (84nA) : A5



한울 6호기 7주기 (150nA) : A5



51

(해외 사례)

- ◆ 발전소 : McGuire M2C21 (Duke Energy)
- ◆ 공지일자 : 8/25/2011
- ◆ 현상 :
 - 처음 세개의 제어군(SE, SD, SC) 측정에서 기준 값을 만족하였으나, 낮게 측정
 - 제어봉가가 가장 큰 제어군(SB) 측정 시 기준 값 불만족
 - 원인 규명을 위하여 12시간 공정 지연
- ◆ 원인 :
 - ADRC의 감마누설전류 과소 보상
 - 노외핵계측계통 N43의 기저준위에서 노이즈 존재
- ◆ 대책 :
 - ADRC의 감마누설전류 재보상
 - ADRC의 감마누설전류 보상절차 개정

- ◆ 발전소 : Watts Bar Unit 1 Cycle 16 cycle 5 (TVA)
- ◆ 공지일자 : March 21, 2002
- ◆ 방법 : DRWM => Rod Swap
- ◆ 현상 :
 - 전체 제어봉가 오차와 제어군 CD의 개별 제어봉가 오차가 허용기준을 위반
 - 제어봉 교환법으로 제어봉가 측정
- ◆ 원인 :
 - 하부 계측기에 대한 ADRC의 감마누설전류 과소 보상
- ◆ 대책 :
 - 적절한 감마누설전류 보상을 위한 초기임계 및 LPPT 절차서 변경

52

(해외 사례)

- ◆ 발전소 : Oconee O2C22 (Duke Energy)
- ◆ 공지일자 : 1/22/2007
- ◆ 현상 :
 - 제어군 5의 개별 제어봉가 오차가 -14.9%로 허용기준 $\pm 15\%$ 에 근접
 - 전체 제어봉가 오차가 -7.87%로 Review 기준 $\pm 8\%$ 에 근접
 - 원인 규명을 위하여 12시간 공정 지연
- ◆ 원인 :
 - Gamma-Metric사의 핵분열함 핵계측계통 사용
 - High Gain Band Pass Filter (HGBPF) 전압신호의 비선형
- ◆ 대책 :
 - HGBPF 보정(Calibration) 및 보상(Compensation) 절차 개정

- ◆ 발전소 : Calvert Cliffs Unit 2 Cycle 16 (Constellation Energy)
- ◆ 공지일자 : 5/19/2005
- ◆ 현상 :
 - 제어봉가 측정을 제외한 나머지 시험항목 만족
 - 제어군 2의 개별 제어봉가 오차가 허용기준 $\pm 15\%$ 를 위반
 - 전체 제어봉가 오차는 허용 기준 $\pm 10\%$ 를 만족
- ◆ 원인 :
 - 시험동안 제어봉 하부 삽입위치를 실제 하부위치 보다 8.5인치 상향조정
 - 핵설계를 CE 방법론에서 WH 방법론으로 최초 적용한 주기.
- ◆ 대책 :
 - 제어봉 하부 삽입위치를 실제 하부위치와 동일하게 수행
 - LPPT 절차를 변경하여 핵설계에서 사용하는 위치까지 삽입.

(해외 사례)

- ◆ 발전소 : Indian Point 3 (IP3) Cycle 13 (Entergy)
- ◆ 공지일자 : Tue, 17 Jun 2003
- ◆ 현상 :
 - 전체 제어군 8개 중 6개가 개별 제어봉가 허용기준 $\pm 15\%$ 를 위반
 - 전체 제어봉가 오차는 허용 기준 $\pm 10\%$ 를 불만족 (22.6%)
- ◆ 원인 :
 - 반응도 계산에 사용되는 핵설계 자료가 불일치
- ◆ 대책 :
 - 적절한 핵설계 자료로 생산한 DRWM 상수 사용 후 재분석 결과 허용기준 모두 만족
 - WH사 DRWM 상수 생산절차 개선

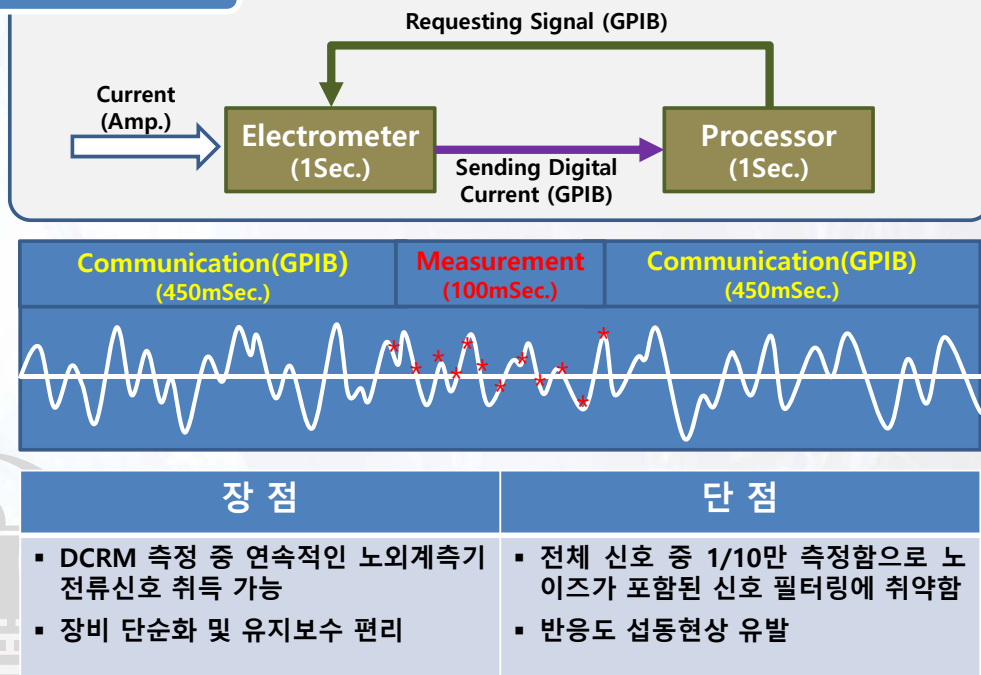
- ◆ 발전소 : South Texas Unit 2 Cycle 15 (Entergy)
- ◆ 공지일자 : Tue, 17 Jun 2003
- ◆ 현상 :
 - ADRC에 노외핵계측계통(N43) 신호 연결
 - 제어봉 삽입 후 낮은 출력상태에서 과도한 노이즈로 인하여 DRWM 진행 불가
- ◆ 원인 :
 - 노외핵계측계통(N43) 과도한 노이즈 발생
- ◆ 대책 :
 - 발전소 정지 후 N44로 교체하여 DRWM 진행
 - LPPT 시험 전 적절한 노외핵계측계통 선정 절차 추가

2-3 디지털 반응도계산기 개발



A. 기존 반응도계산기 문제점

기존 반응도계산기



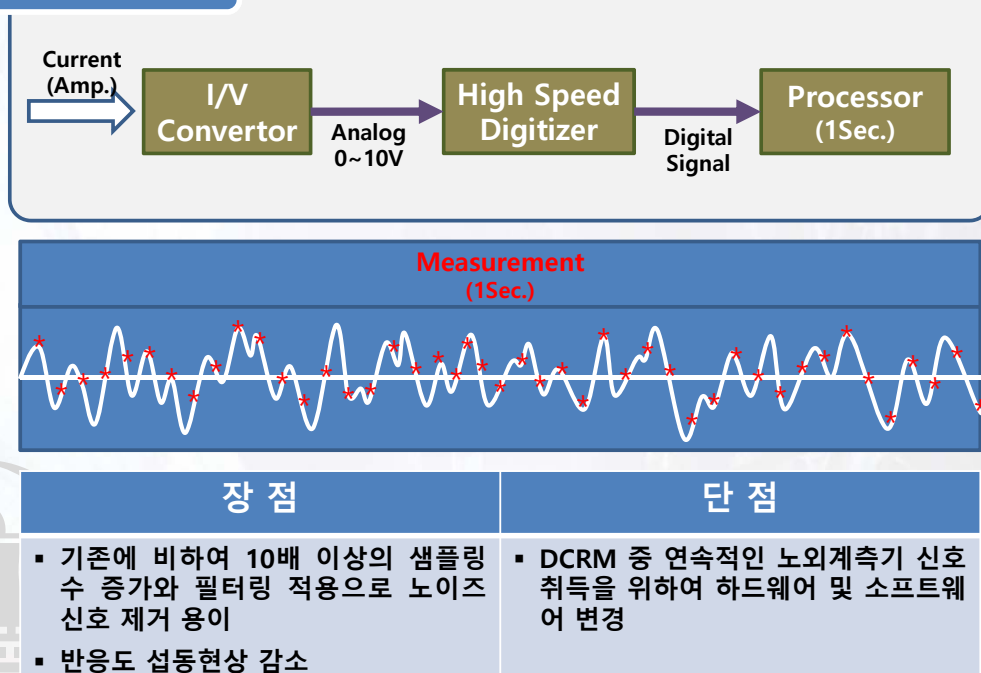
55

2-3 디지털 반응도계산기 개발



B. 개선형 반응도계산기 설계

신형 반응도계산기



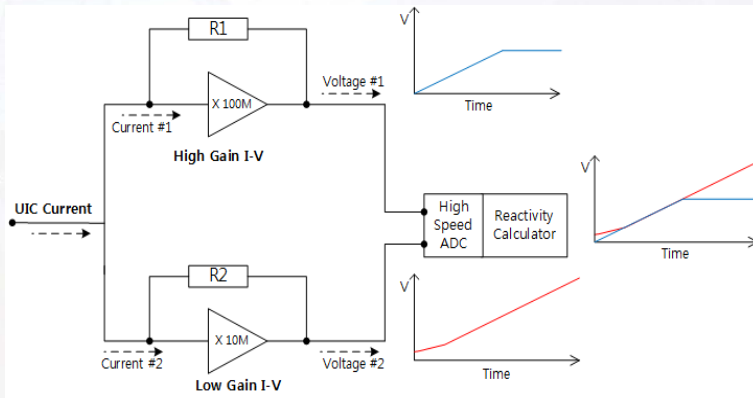
56

2-3 디지털 반응도계산기 개발



B. 개선형 반응도계산기 설계

- ❖ 전류계 Input Range 변환 방법 제거
 - 전류 복사 회로를 이용하여 고정 Input Range를 갖는 두개의 I-V 컨버터에 전류 신호 입력
 - 출력되는 2개의 전압신호를 조합하여 반응도 계산
 - LPPT 출력 전류에 최적화된 I-V 컨버터 설계
- ❖ 측정 정확도 향상
 - 고분해능(24bit, 기존장비 17bit), 고속 샘플링 ADC 사용(신월성, 신고리 검증 완료)



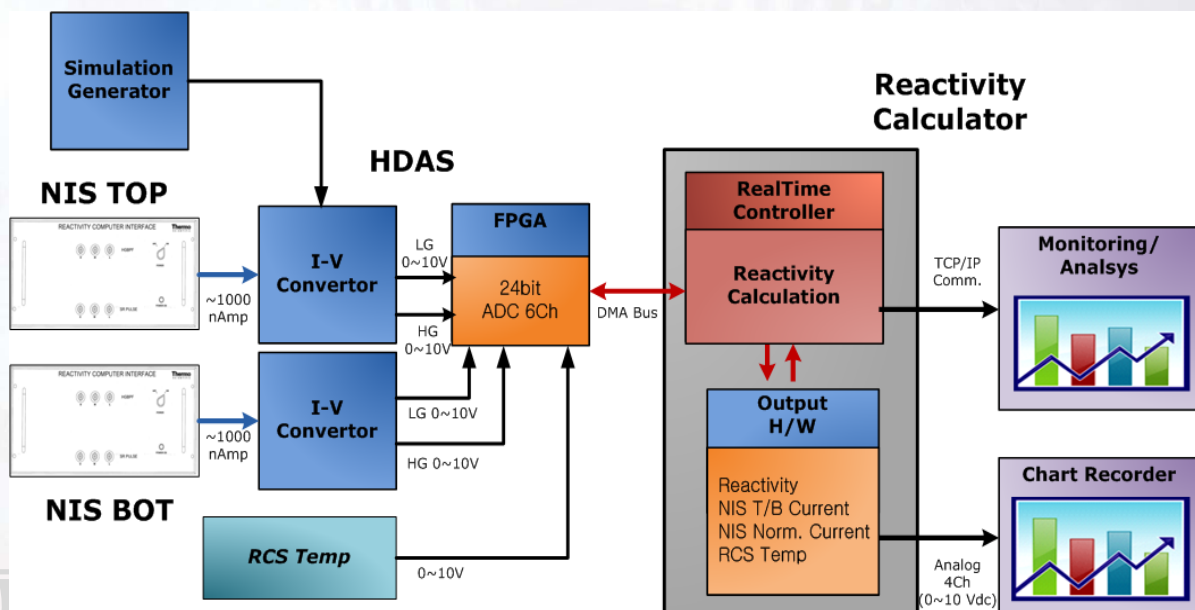
항목	입력 전류범위	출력전압	변환비
High Gain I-V	0.1 nA ~ 100 nAmp	0.01 Vdc ~ 10 Vdc	100 mV/nA
Low Gain I-V	10 nA ~ 1000 nA	0.1 Vdc ~ 10 Vdc	10 mV/nA

57

2-3 디지털 반응도계산기 개발



C. 개선형 반응도계산기 구성도



58

2-3 디지털 반응도계산기 개발



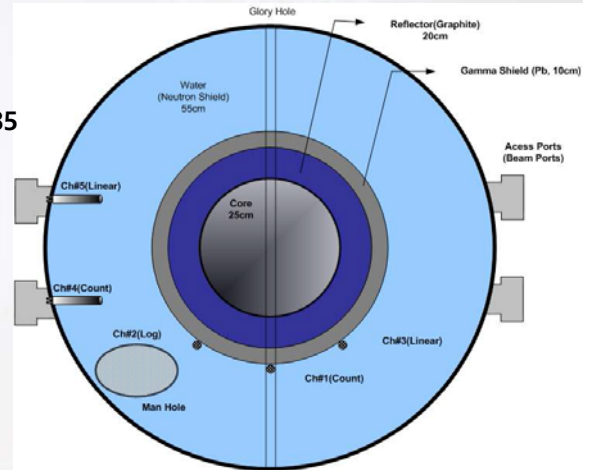
D. 연구로 시험

❖ 시험 장소 및 기간

- 시험 장소 : 경희대학교 원자로 연구 센터
- 시험 기간 : '14. 07. 17(목)~ '14. 07. 18(금)

❖ 시험 자원

- 시험 연구로 : 경희대 AGN-201K
 - 최대 출력 : 10 Watt , 최대 열중성자 속(Flux) : $4.5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \text{ -sec}$
- 중성자 검출기 : Uncompensated Ion Chamber
 - 제조사 : General Electrics Reuter-stokes
- 신호처리 시스템
 - 경희대 반응도계산 시스템 : 전류계 Keithley 6485
 - 개선헌 반응도계산 시스템 1식
 - I-V Converter
 - 전압 측정 모듈 : NI 9239



❖ 시험 항목

- 고/저감도 I-V 잡음 강인성
- 고/저감도 I-V 신호 선형성
- 고/저감도 I-V 신호 중첩성

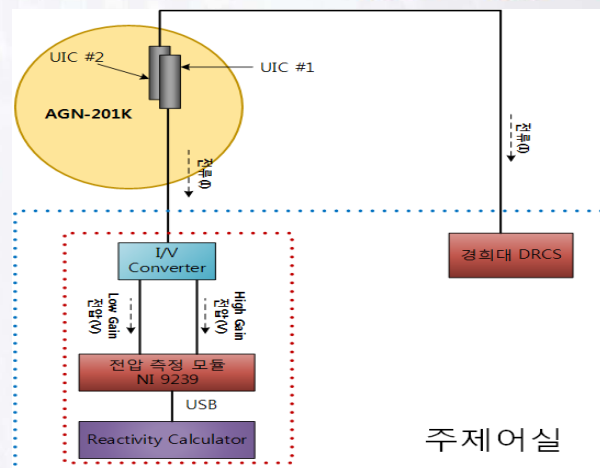
59

2-3 디지털 반응도계산기 개발



E. 연구로 시험 구성

- ❖ 검출기 포트에 UIC 검출기 삽입
- ❖ LPPT시 해당되는 4Decades의 출력신호를 얻기 위하여 검출기 위치 조정
- ❖ ANG-201K 60mW에서 임계 유지
- ❖ 시험 항목은
 - 고감도 I-V 시험 : 60mW~6W (2Decades)
 - 저감도 I-V 시험 : 60mW~0.6mW (2Decades)
 - 고/저감도 I-V 중첩성 : 0.6mW~6W (4Decades)



ANG-201K 출력 (mW)	UIC #1 (nAmp)	UIC #2 (nAmp)	발전소 출력 (% FP)	High Gain I-V 신호 (V)	Low Gain I-V 신호 (V)
0.6	0.1	0.07	10^{-6}	0.01	-
6	1	0.7	10^{-5}	0.1	0.01
60	10	7	10^{-4}	1	0.1
600	100	70	10^{-3}	10	1
6,000	1,000	700	10^{-2}	-	10

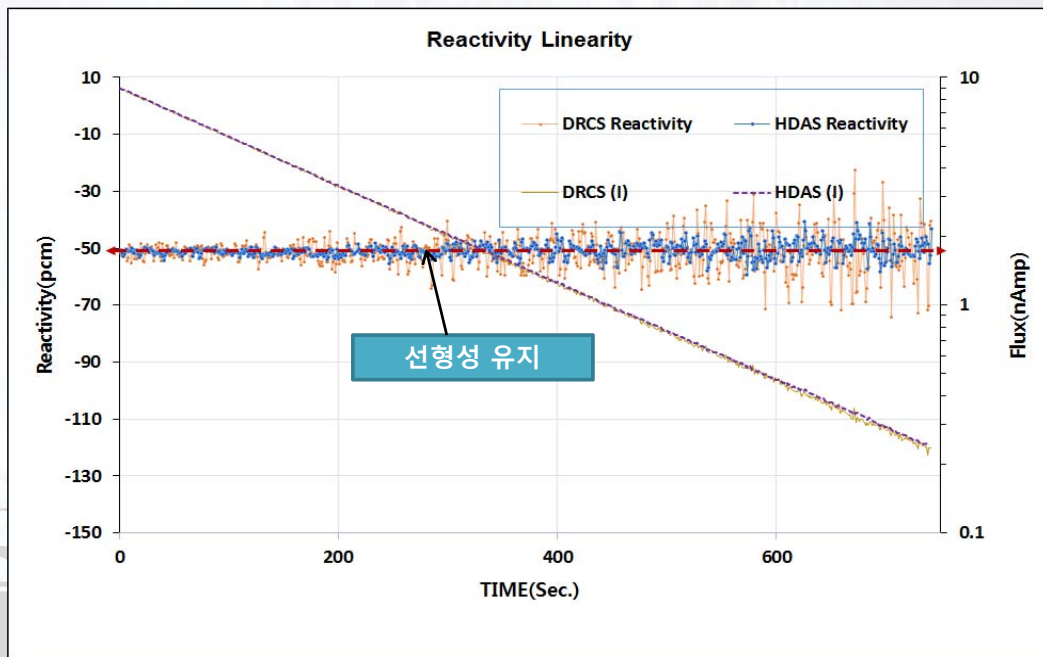
60

원자로 및 장비 입/출력신호

2-3 디지털 반응도계산기 개발



F. 저출력 구간 선형성

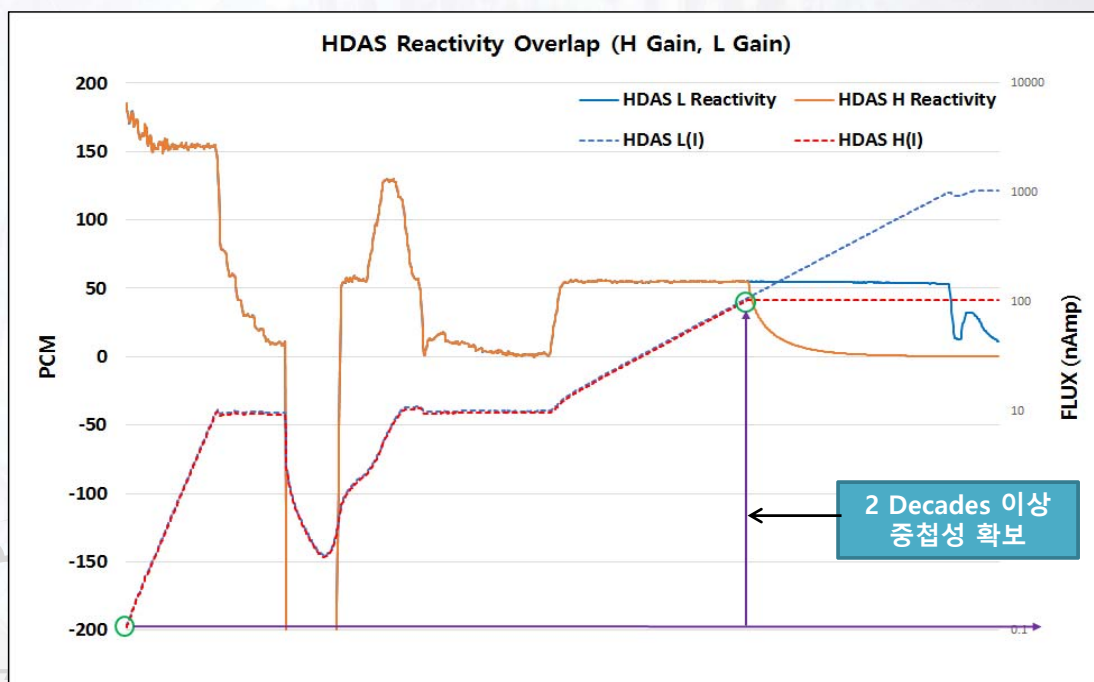


61

2-3 디지털 반응도계산기 개발

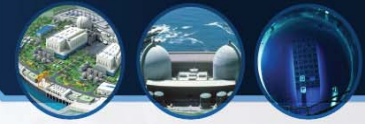


G. 신호 중첩성

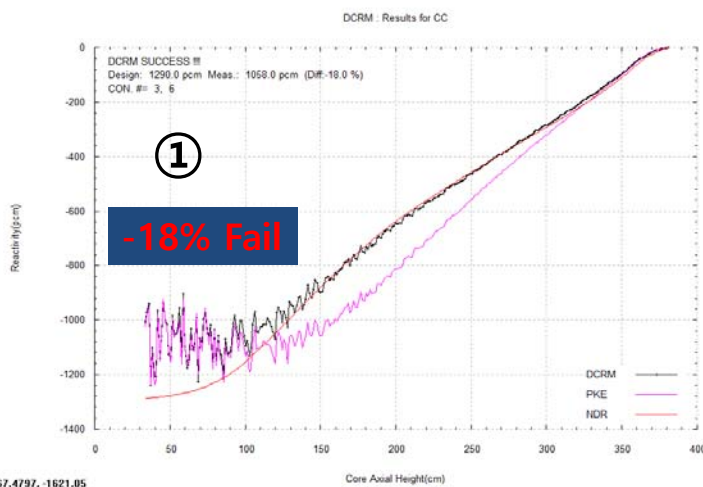


62

2-3 디지털 반응도계산기 개발

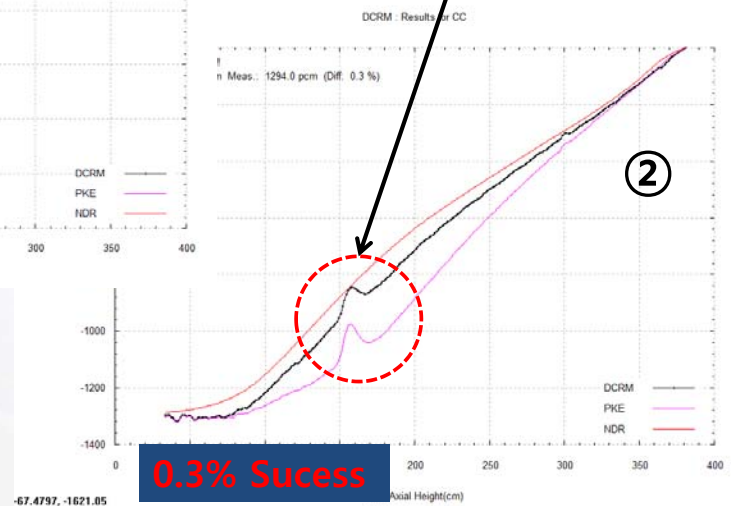


H. 발전소 시험 (고리2호기 28주기)



기존 반응도계산기 Electrometer가
2nAmp에서 대역 변경을 하며 생긴
Relay 노이즈

⇒ DCRM 반응도 평가에 영향 없음
⇒ 개선 반응도계산기 단독 사용 시
문제 없음

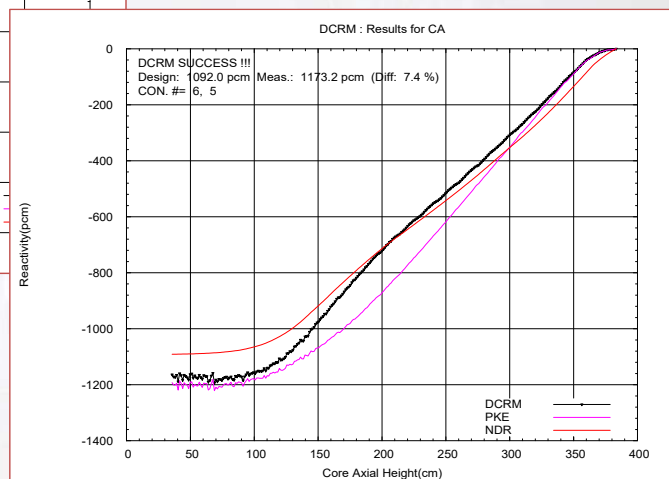
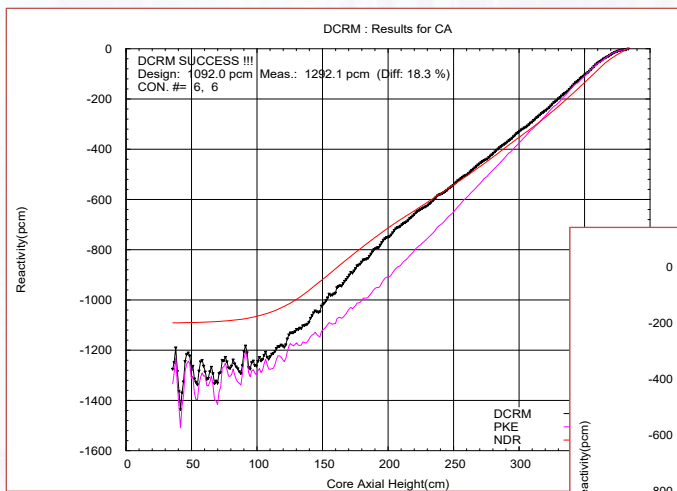


63

2-3 디지털 반응도계산기 개발



H. 발전소 시험 (고리1호기 30주기)

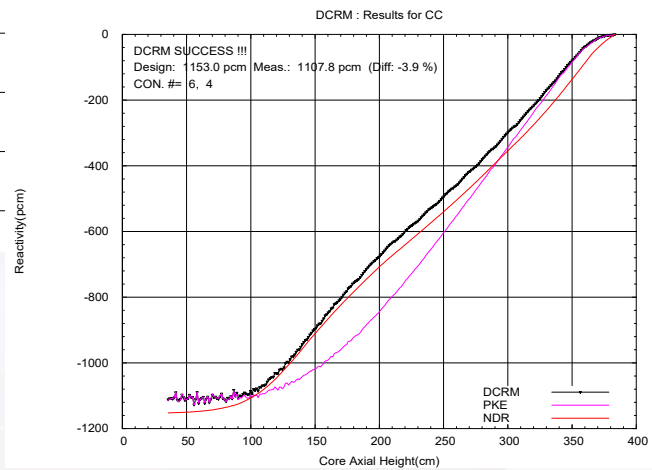
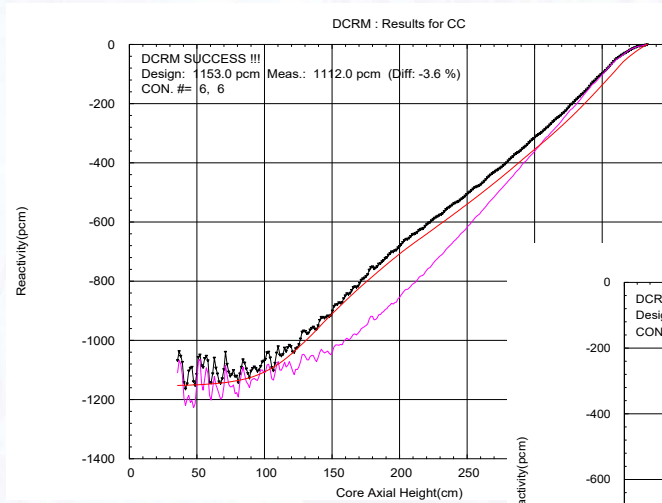


64

2-3 디지털 반응도계산기 개발



H. 발전소 시험 (고리1호기 30주기)

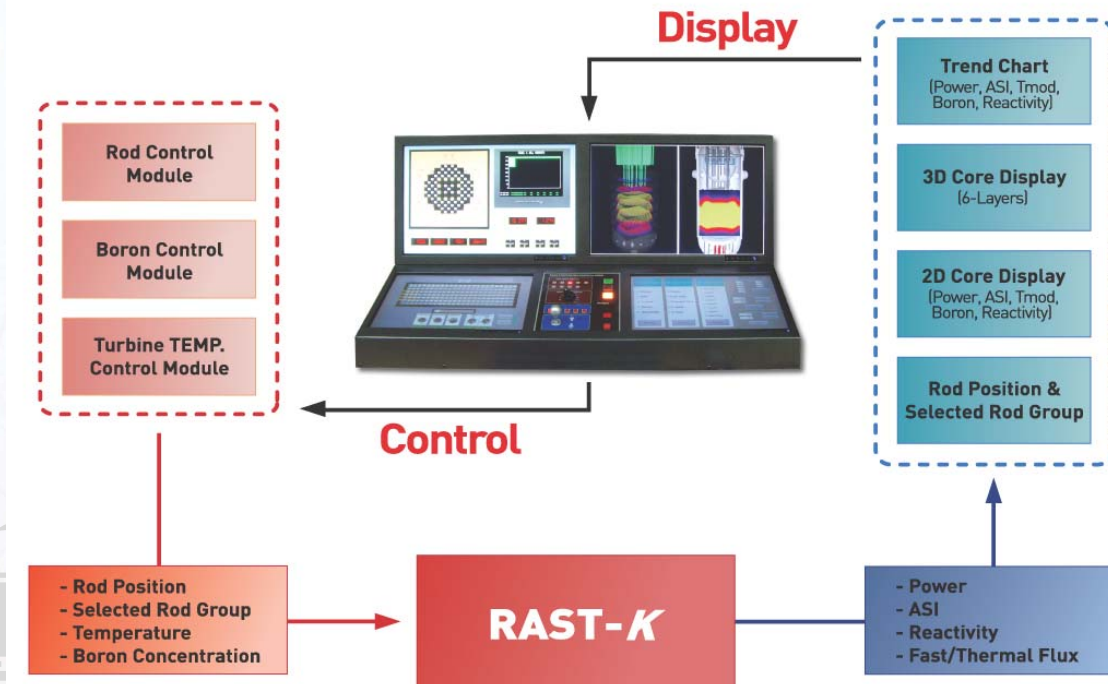


2-4 원자로특성시험 교육시스템 개발



	Full scope simulator	Specific scope simulator
Target	Reactor Operator & Turbine operator, etc	Staffs of core management & Reactor Operator
Purpose	Operations, Skills, Rule	Knowledge, Concepts, Symptom
Modeling	Most of component	Core
Methods	Simplified	Complicated
Accuracy	Reasonable or Allowable	High
Cost	Expensive	Reasonable

2-4 원자로특성시험 교육시스템 개발



67

2-4 원자로특성시험 교육시스템 개발



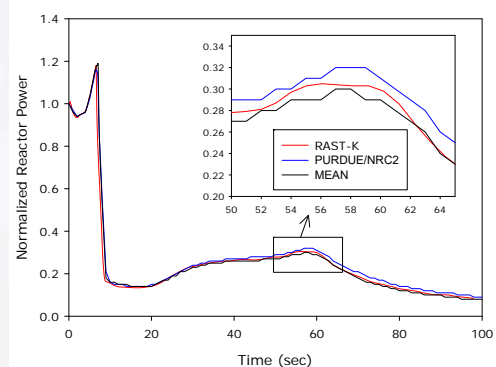
Computation

RAST-K is a computer code designed to calculate neutronics parameters using input such as control rod position, boron concentration and coolant temperature. RAST-K employs following calculation models :

- Three dimensional neutron diffusion model
- Three dimensional heat transfer model
- Three dimensional thermal-hydraulic model
- Point Kinetic Model
- Nuclear Cross Section Data updated based on Reactivity Feedback Model

0.7737	1.0743	1.1614	1.1010	0.9671	1.2799	1.0042	0.4363
0.7738	1.0744	1.1616	1.1011	0.9671	1.2799	1.0042	0.4363
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.0743	1.1997	0.7517	1.1400	1.1151	0.9457	1.2660	0.6162
1.0744	1.1999	0.7518	1.1400	1.1150	0.9457	1.2659	0.6161
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.1614	0.7523	1.2211	1.1121	1.3177	1.3644	1.1952	0.3458
1.1616	0.7525	1.2212	1.1120	1.3176	1.3642	1.1951	0.3458
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.1010	1.1383	1.1096	0.8683	1.0433	1.1953	1.0950	0.000
1.1011	1.1384	1.1096	0.8683	1.0432	1.1952	1.0950	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.9671	1.1122	1.3146	1.0428	1.3272	1.1262	0.3938	0.000
0.9671	1.1123	1.3145	1.0428	1.3270	1.1262	0.3938	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.2799	0.9454	1.3623	1.1837	1.1221	0.4148	0.000	0.000
1.2799	0.9454	1.3623	1.1837	1.1221	0.4148	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.0042	1.2630	1.1916	1.0891	0.3915	0.3915	0.000	0.000
1.0042	1.2630	1.1916	1.0891	0.3915	0.3915	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.4363	0.6147	0.3447	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.4363	0.6147	0.3447	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

RAST-K
ROCS
DIFF
MAX 0.000
AVG 0.000



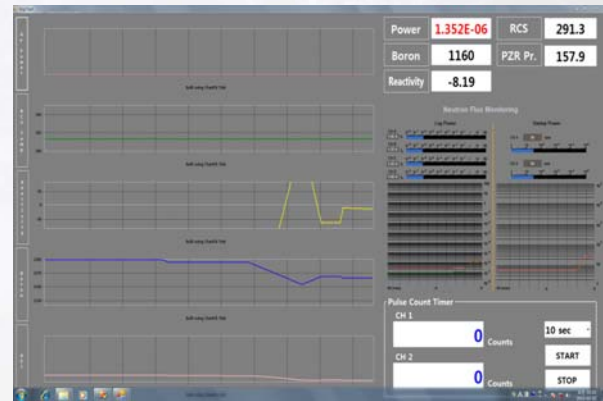
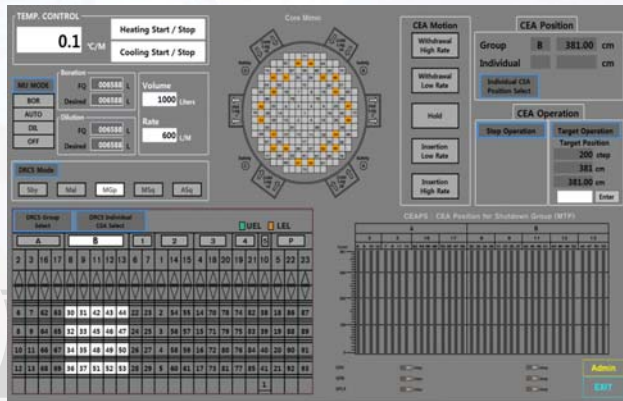
68

2-4 원자로특성시험 교육시스템 개발



Education/Training Modules with Vivid Graphic Visual

CoSi has display with vivid graphic visual similar to main control room and provides education/training modules based on commercial nuclear power plant operation procedure. Furthermore, CoSi is a portable modular system easy to carry, easy to maintain so that it can provide education/training for small group students.



69

2-4 원자로특성시험 교육시스템 개발



Input

CoSi adopts touch-screen and control stick for input data so that it is easy to enter input data.

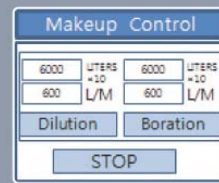
- Selection of Control Group, Selection of Mode (Individual or Overlap)
- Control Rod Insertion/Withdrawal
- Boron Dilution/Boration
- Coolant Temperature Control



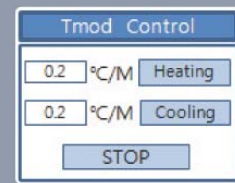
Selection of Control Group



Rod Control



Boron Control



Coolant Temperature Control

70

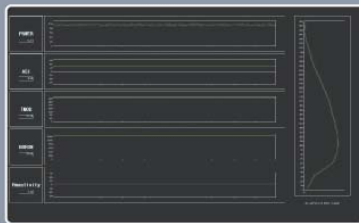
2-4 원자로특성시험 교육시스템 개발



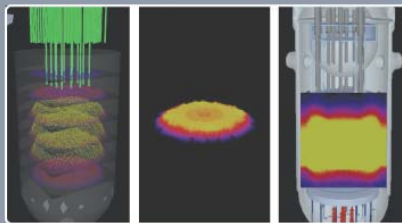
OUTPUT

RAST-K displays two dimensional graphic and three dimensional graphic results of boron concentration, Xe concentration, coolant temperature distribution, fast and thermal neutron flux distribution using rendering technique.

- Real-time two dimensional display : reactor power, coolant temperature, ASI, reactivity, boron concentration, axial power distribution
- Three dimensional rendering display : reactor power distribution, control rod position
- Digital display : control rod position, boron concentration, coolant temperature
- Incore, Excore detector signal : Digital and Analog



Real-time Charts



3D/2D Display



Control Panel Display

2-4 원자로특성시험 교육시스템 개발



Components of CoSi System



3. 결 론



- ❖ Safety
- ❖ Reliability
- ❖ Economics



73

Thank you !



74