한국원자력학회 2016년 추계 워크숍

노물리 시험과 분석

노물리시험의 대학교육 및 과제
(AGN-201K 이용)

교수 김명현

경희대학교 원자로센터

2016년 10월 26일
경주 화백컨벤션센터

목 차 2

1. 노물리 시험의 의미
2. AGN-201K의 특성
3. 실험 교육 현황
4. 원자로실험 교육 내용
5. 향후 과제

1. 노물리시험은?

1. 노물리시험(Physics Test)의 의미

원자로 운전의 특성

1) 운전 중 노내 정보의 부재
   Modern Control Theory 적용의 어려움
   가장 중요한 Reactivity의 측정이 부정확함

2) 운전 중 Power Ramp Rate의 제한 (PCMI 우려)
   과도한 제어봉 삽입/인출의 한계를 이해하여야 함
   → Rod Worth Curve의 확보가 필요함

3) 대부분의 운전 자료는 컴퓨터 시뮬레이션에서 생산
   실측치와 계산치의 부조화
   - 매우 제한된 조건에서의 실험치 (True Value)
   - 가정에 근거하였지만 막대한 양의 정보 (Predicted Value)

원자로 노내계측의 문제점

1) 중요하지만 측정이 불가능한 변수들이 너무 많음.
   - Thermal Flux Distribution
   - Fast/Thermal Flux Ratio – Local & Global
   - Pin Power Peaking
   - Intra Fuel Temperature Distribution
   - F.T.C. & M.T.C.
   - Excess Reactivity

2) 계측기 사용의 한계
   - 대형 중성자검출기는 노내에 위치하기 어려움
   - 노외 계측기는 저출력에서 노이즈 영향이 너무 많음
   - 노내 계측기의 저신뢰성

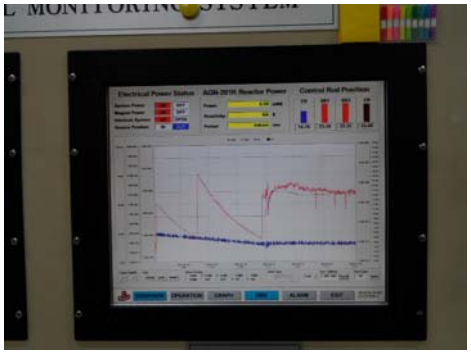
노물리 시험의 중요성

1) 실험을 통해 재장전 노심의 설계자료의 신뢰성 확인
   → 미분 제어봉가, 미분 붕산반응도가 등

2) 예측된 각종 운전 변수에 대한 Benchmarking
   → ITC를 통해 FTC, MTC를 간접 확인

3) 운전원들에게는 실제적인 운전 훈련의 유일한 기회
   → 측정 오차 및 기기 신호 노이즈

2. AGN-201K의 특성



Specification of AGN-201K

Thermal Power : 10. watt

Max. Neutron Flux : **4.5 $\times 10^8$ #/cm^2-sec**

Fuel : UO_2-Polyethylene solid homogeneous disk (9 disks)

LEU Core (U-235 19.5w/o)

4 Control Rods : 2 safety rods, 1 coarse rod, 1 fine rod

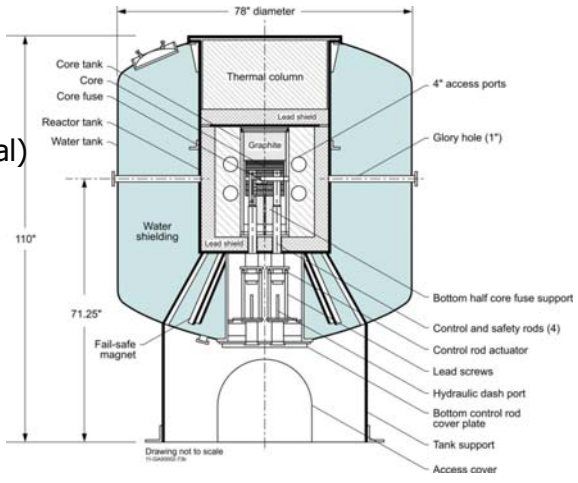
No active coolant and cooling system

Neutron Source : Ra-Be 10 mCi

Very High Negative Feedback Effects

(α_T **= - 2.75 $\times 10^{-4}$ /℃**)

Design Power : 20 Watts (1977 USNRC Approval)



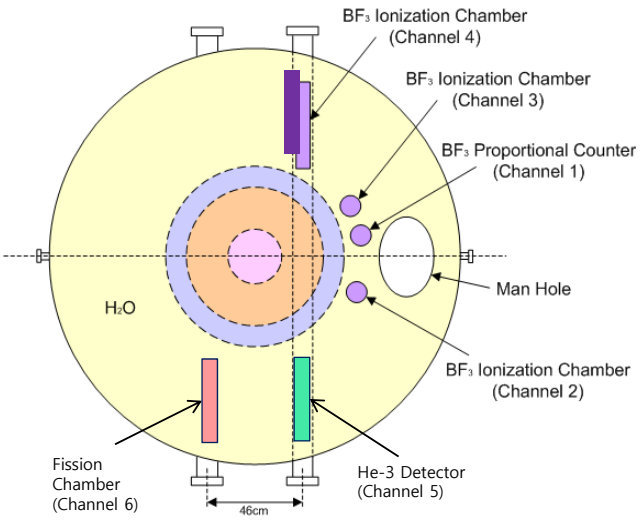
Max. Power: 10 Wt
Max. Flux : 3.0x10^8 #/cm^2 sec

➡ Ideal for Student Training (Safe & Good enough)

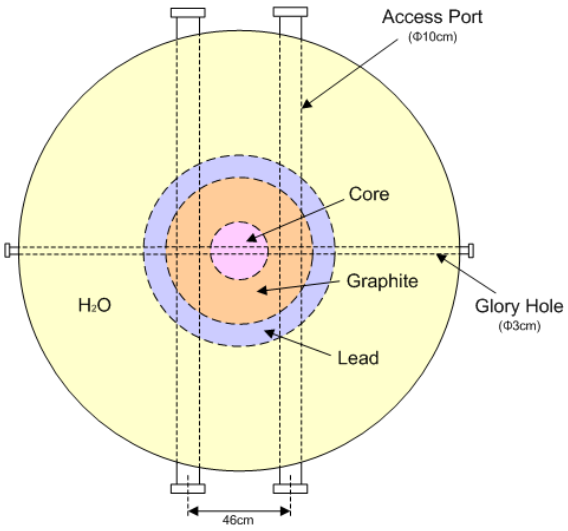
Duel Consoles (Analog Console with modern digital console)

➡ The only reactor allows student touch & feel

7개의 중성자 계측기



Glory Hole & Beam Ports



4개의 중성자 계측기는 위치 이동이 가능하다.
Irradiation Sample의 노내 접근성이 매우 높다.

Movable Detectors
at In & Out of Core
Access to the Core Boundary
→ Ideal for Experiment Planning
Ideal for Detector Testing

Compact & Dry Core
Homogeneous Core
→ No Calculation Error from Heterogeneity
Least Error from Neutron Counters

대형 상업용 발전소	소형 AGN-201K
저출력에 맞추어 진 계측기는 Source Range Detector 하나 뿐	여러 개의 detector 운영 저출력에만 맞추어져 있음.
온도효과, 제논 효과 무시 못함 Physics Test의 오류가 예상됨	온도효과, 제논 효과 무시할 수준 Physics Test 오류가 적음
노내 중성자 거동이 복잡함 계산 값의 신뢰도가 높지 않음	노심 구조가 간단하여 계산 오차 최소화 되어있음
중성자계측기의 위치가 고정 노내 계측기 운영 경험이 많음	중성자 계측기 위치 변경 가능 노내 계측기 개발 필요
노심이 매 재장전이후 크게 변화됨 실험 결과 자료의 축적이 적음	재장전이 없어, 노심이 변화되지 않음 실험 결과 자료의 축적이 많음
반복 실험이 현실적으로 어려움	반복 실험이 가능함

3. 실험 교육 현황

국내 교육 참가자 (2016년 8월까지)

대학	참가 횟수	수강생 수
KHU students	6	79
Chosun University	8	73
Jeju Nat'l University	8	**89**
UNIST	8	**86**
KAIST	3	28
DongGuk University	3	29
Hanyang University	2	32
Seoul Nat'l University	1	6
Postech	1	9
KAERI	1	11
	40	**442**

외국인 교육 참가자 (2016년 8월까지)

	Program	# of Courses	# of Trainee
Japanese Universities	Kinki University	**6**	65
KUSTAR Graduate students	KAIST-KUSTAR	**3**	16
Jordan Atomic Energy Commission	KAERI OJT	**1**	18
Malaysian Nuclear Agency	KAERI OJT	**1**	6
		11	105

종합 통계 (2016년 8월까지)

	참가 횟수	수강생 수
경희대학교	**6 (11.5%)**	**79 (14.4%)**
타대학 방문자	**35 (67.3%)**	**363 (66.4%)**
외국인 방문자	**11 (21.2%)**	**105 (19.2%)**
	52	**547**

4. 원자로실험 교육 내용

4. 원자로실험 교육 내용

원자로실험 교과 과정-1/2

	시간	활동 계획	내용
제1일 (수요일)			
0	9:00-10:00	환영식 및 센터소개	방문자 등록 및 과정 소개
0	10:00-12:00	방사선 안전 교육 원자로 특성 설명	
	12:00-13:30	중식	교직원 식당 (우정원)
1	13:30-17:00	원자로 운전 실습 및 임계도 탐색	강의 및 개인 실험
	18:00-20:00	환영 만찬	
제2일 (목요일)			
	9:00-10:00	실험1의 발표회	조별 발표 및 토론
2	10:00-12:00	원자로주기 측정 및 반응도 계산	강의 및 조별 실험
	12:00-13:30	중식	교직원 식당 (우정원)
3	13:30-17:30	임계 질량측정 (1/M Experiment)	강의 및 조별 실험
	17:30-20:00	자유시간	발표회 준비
제3일 (금요일)			
	9:00-10:00	실험 2 & 실험 3의 발표회	조별 발표 및 토론
5	10:00-12:00	제어봉가 측정 실험	강의
	12:00-13:30	중식	교직원 식당 (우정원)
5	13:30-16:00	제어봉가 측정 실험	조별 실험
4	16:00-18:00	열중성자속 측정 (NAA)	강의
	18:00-20:00	자유시간	

4. 원자로실험 교육 내용

원자로실험 교과 과정-2/2

	시간	활동 계획	내용
제6일 (월요일)			
	9:00-10:00	실험 5의 발표회	조별 발표 및 토론
4	10:00-12:00	열중성자속 측정	개별 측정
	12:00-13:30	중식	교직원 식당 (우정원)
6	13:30-16:00	온도궤환 및 반사체 효과 실험	강의 및 단체 실험
	16:00-20:00	자유 시간	
제7일 (화요일)			
	9:00-11:00	실험 4 & 실험 6의 발표회	조별 발표 및 토론
	11:00-12:00	수료식 및 평가회	수료증 수여 및 종합 토론
	12:00-13:30	중식	
	13:30-14:00	해산	

	Title of Experiments	Activities
1	Reactor Operation Practice	Understanding of Reactor Physics Principles
2	Measurement of Reactor Period	Measurement Statistics, Calculation of Reactivity
3	Critical Mass Approach Experiment	1/M experiment
4	Control Rod Calibration	Period Measurement Method/ Swap Method / Drop Test
5	Thermal Flux Measurement	Au Foil Activation / Cd Ratio / MCA with HPGe Detector
6	Reflector Effect / Temperature Feedback	Conditional Change of Reactivity
7	Neutron Radiography	Neutron Transmission Image
8	Measurement of beta-value	Calculation from rod drop test
9	Radiation Detection & Shielding	Use of neutron & gamma detectors

Nuclear Design Data of AGN-201K

(1) Fuel Loading	
(a) Critical Mass	687 gram in ^{235}U
(b) Excess Reactivity at 20℃	0.18 % Δk/k
(2) Neutron Flux Level	
Avg. thermal flux	3.0 E+08 #/cm^2-sec at 10 watt
Max. thermal flux	4.5 E+08 #/cm^2-sec at 10 watt
(3) Reactivity Worth	
(a) Safety Rod & Coarse Control Rod	1.25%
(b) Fine Control Rod	0.31%
(c) Temp. Feedback Coefficient	-0.0275 % per ℃

Experiment -3

Experiment -5

Experiment -4

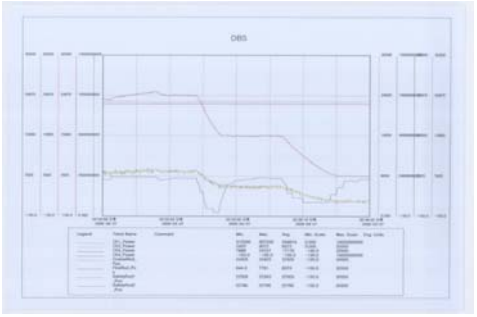
Experiment -6

Reactor Physics Tests in NPP

Critical Boron Concentration Measurement
Differential Boron Worth Measurement
Isothermal Temperature Coefficient Measurement
Control Rod Worth Measurement
Flux Symmetry Measurement
Power Distribution Measurement
HZP to HFP Reactivity Measurement

원리적으로는 AGN-201K에서 모두 실행하고 있음.

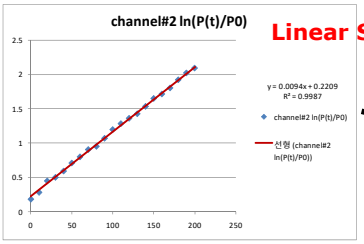
(1) Reactor Operation Practice 24



Familiarization
Linearity check of detectors
Meaning of criticality

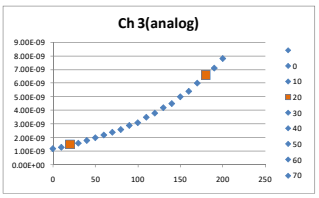
Q. 현장에서는 얼마나 자주 계측기의 보정을 수행하는가?

(2) Period and Reactivity



Linear Square Fitting

Statistical Average



Random Sampling

Measurement of T

Error Treatment

$$\rho(t) = \frac{l_p}{T + l_p} + \frac{T}{T + l_p} \sum_{i=1}^{6} \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T}$$

Inhour Equation

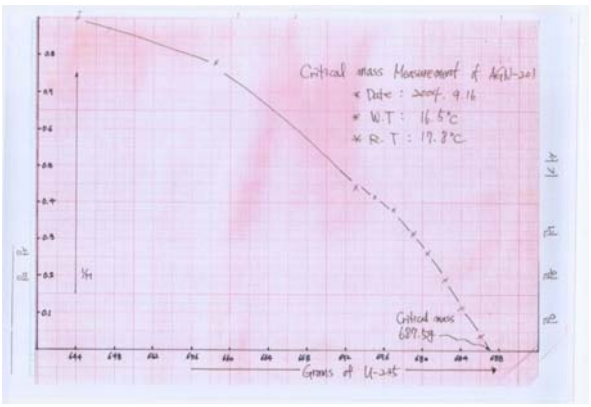
Evaluation of Δρ

Noise and Error
Inhour Equation
Reactivity Meter

Q. 현장 운전원들이 Reactor Kinetics를 잘 이해하고 있을까?

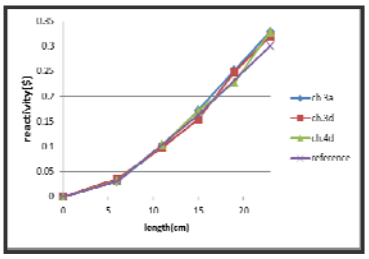
(3) Criticality Approach Experiment

Subcritical Multiplication
Data Fitting
Detector Response

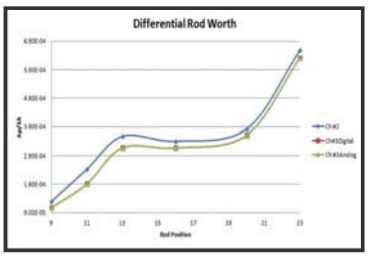


(큰 오차를 보이지 않는 실험이다.)
Q. 현장에서 2-3번의 반복 실험을 하는가?

(4) Rod Worth Measurement



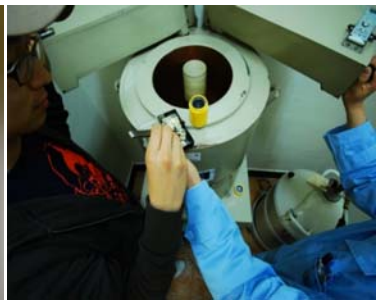
Integral Rod Worth Curve
Differential Rod Worth Curve

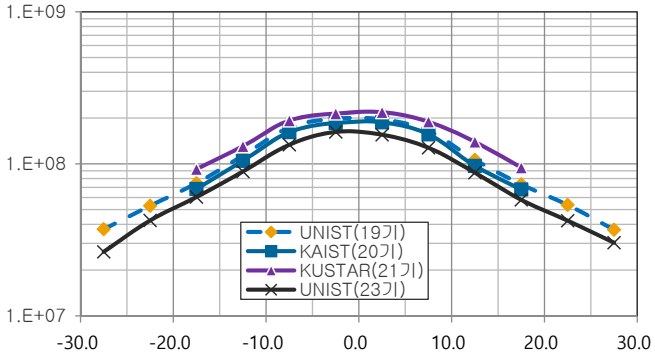


(매우 큰 오차를 보이는 실험이다.)

Q. 현장에서 2-3번의 반복 실험을 하는가?

(5) Thermal Flux Measurement (NAA)

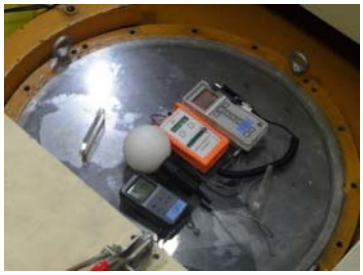


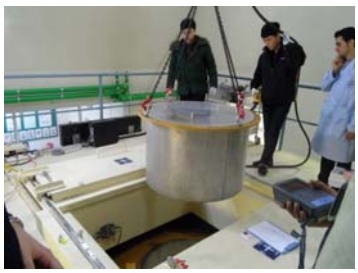


N.A.A.
Gamma Detection
Flux Mapping
Calibration

Q. 현장에서는 출력의 절대값을 어떻게 보정하는가?
중성자속 -- 계측기 값 -- 열출력

(6) ITC & Reflector Effect





Case	Rod Position (cm)		Temp (℃)	Reflector
	CR	FR		
A	22.00	**10.80**	**18.0**	**graphite**
B	22.00	**7.12**	**16.3**	**graphite**
C	22.00	**14.48**	**16.3**	**water**

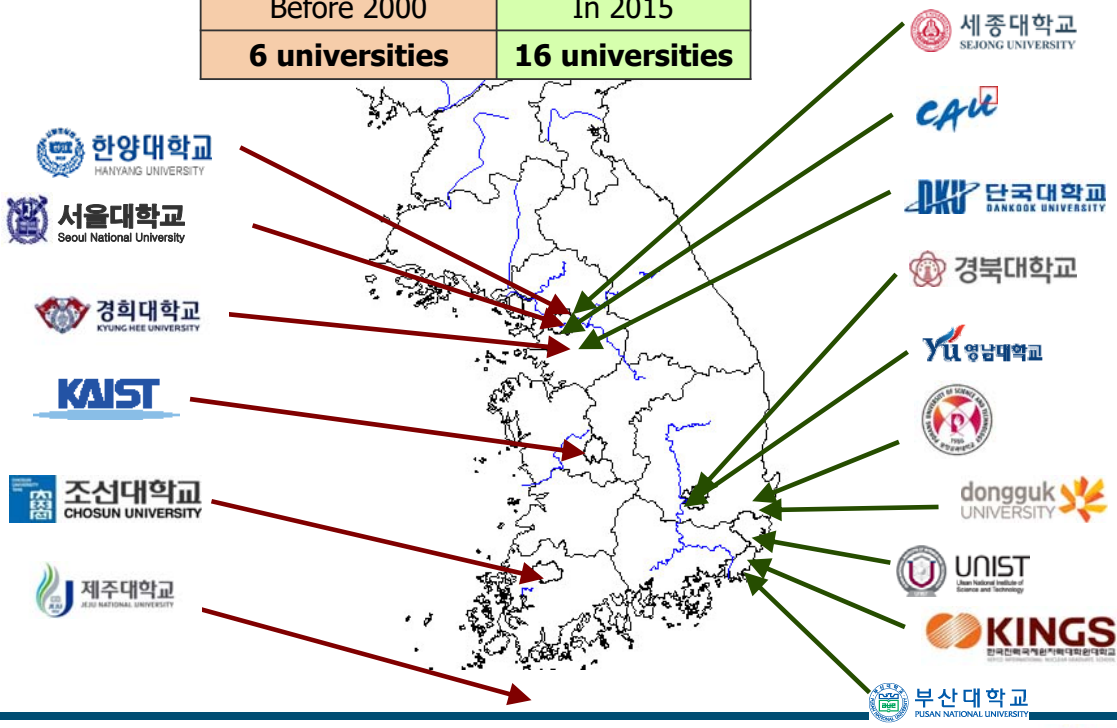
Measurement of ITC
Reflector Effect to Criticality
Radiation Shielding

(매우 큰 오차를 보이는 실험이다.)
Q. 현장에서 ITC 의 오차 범위는 얼마인가?

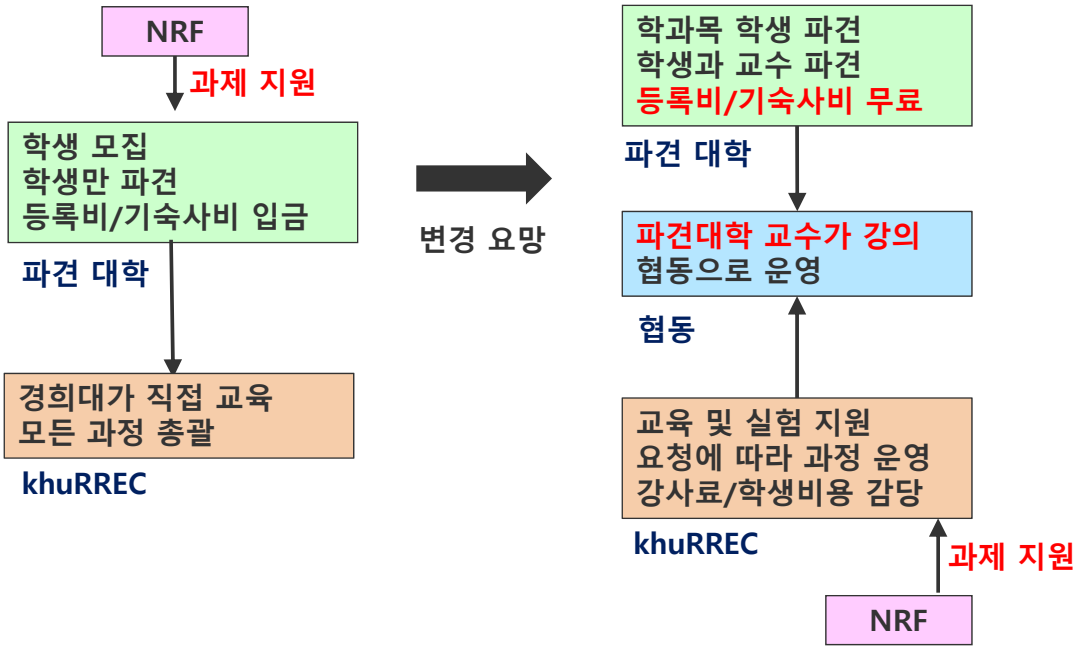
5. 향후 과제

원자로실험 (노물리 시험)의 교육 수요의 증가?

Before 2000	In 2015
6 universities	**16 universities**



국내 16개 대학 및 산업체 교육지원 체계개편



Internet Reactor Laboratory

Internet Reactor Experiment
Virtual Laboratory
Distance Learning
Internet-Assisted Education
Web-Casting Experiment
Interactive Distance Experiment

국내 대학과 연결하여
모든 대학에 교육 기회 제공

병행하여
아시아 지역 거점 교육센터의 역할

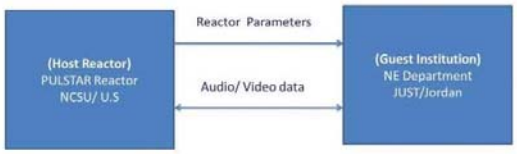
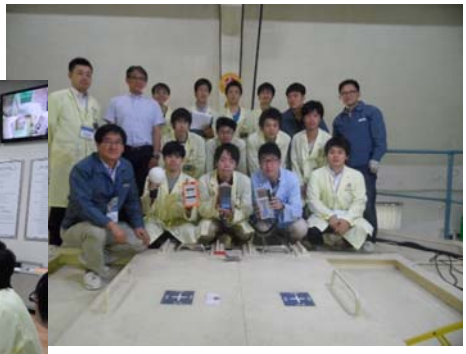


Figure 1. Schematic diagram illustrating the connection between the PULSTAR reactor and JUST.

Figure 2. The PULSTAR reactor control room and the virtual console as viewed by students at JUST.

近畿大学 KINDAI UNIVERSITY
京都大学 KYOTO UNIVERSITY
九州大学 KYUSHU UNIVERSITY
名古屋大学 NAGOYA UNIVERSITY
福井大学 UNIVERSITY OF FUKUI
경희대학교 KYUNG HEE UNIVERSITY



일본과의 교육협력 사업은 1차 3년 사업 후, 높은 기여도 인정을 받아 2차 사업 3년(2016-2018)이 계획되어 있음.
→ 일본의 교육용원자로 공백을 이용하여, 아시아 거점센터가 됨
국내 산학연 전문가와 대학 교수의 참여가 필요

제안

(1) 경희대 원자로센터를 국가 공용시설로 공개
- 교수와 학생이 방문하여 연구 및 교육하는 장소가 되기를 희망
- '원자로실험'의 외부 강사진 필요
- 추가적인 실험 교과목 개발

(2) ANENT 하의 IRL 유치 및 운영에 많은 분들이 참여
- 외국 학생을 위한 internet 강좌
- 외국 학생의 방문 실험을 유치

(3) 한수원 산업체 직원의 교육 기회
- 현장과 대학과의 교류 필요함

감사합니다.

Q & A