

# 하나로 전략계획(안)

2016. 10. 26.

박 승 일

하나로 이용연구본부, 한국원자력연구원

# 하나로 전략 계획 수립 목적

하나로 가동 20년 경과,  
우수 성과 창출 기대,  
하나로 장기 정지,  
기장 연구로 건설 및 제2원자력연구원 추진

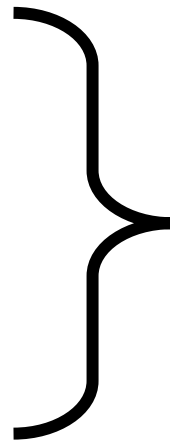
이와 같이 변화하는 환경에 맞춰,  
시설의 활용도를 높이기 위함

# 추진 경과

- 3월 첫 주 : TFT 운영 구성
- 3월 09일 : 1차 회의
- 3월 30일 : 2차 회의
- 4월 12일 : 3차 회의
- 5월 03일 : 4차 회의
- 5월 17일 : 5차 회의
- 6월 01일 : 6차 회의
- 6월 03일 : 한양대 김용균 교수 초청, 자문회의 개최
- 6월 14일-15일: 하나로 전략계획 브레인스토밍
- 6월 29일 : 7차 회의
- 7월 12일 : 8차 회의
- 7월 19일 : 9차 회의
- 7월 26일 : 10차 회의
- 8월 11일: 전략사업부원장 보고
- 8월 12일: 원장 보고
- 현재: 관계자 의견 수렴 중

# 현황 분석 내용

- 시설 현황
- 반성과 교훈
- 잠재 역량
- 이해 관계자
- 전략 이슈
- 조직과 인력
- SWOT 분석



전략

# 시설 현황

# 원자로 사양

- Type Open-tank-in-Pool
- Max. Th. Power 30MWth
- Coolant Light Water
- Reflector Heavy water
- Fuel Materials  $U_3Si$ , 19.75% enriched
- Absorber Hafnium
- Reactor Building Confinement
- Typical flux at port nose  $2 \times 10^{14}$  nv
- 7 horizontal ports & 36 vertical holes
- Vertical hole for cold neutron source
- Operation Cycle 4 weeks x 9 cycles/yr

한국원자력연구원(<http://www.kaeri.re.kr>)

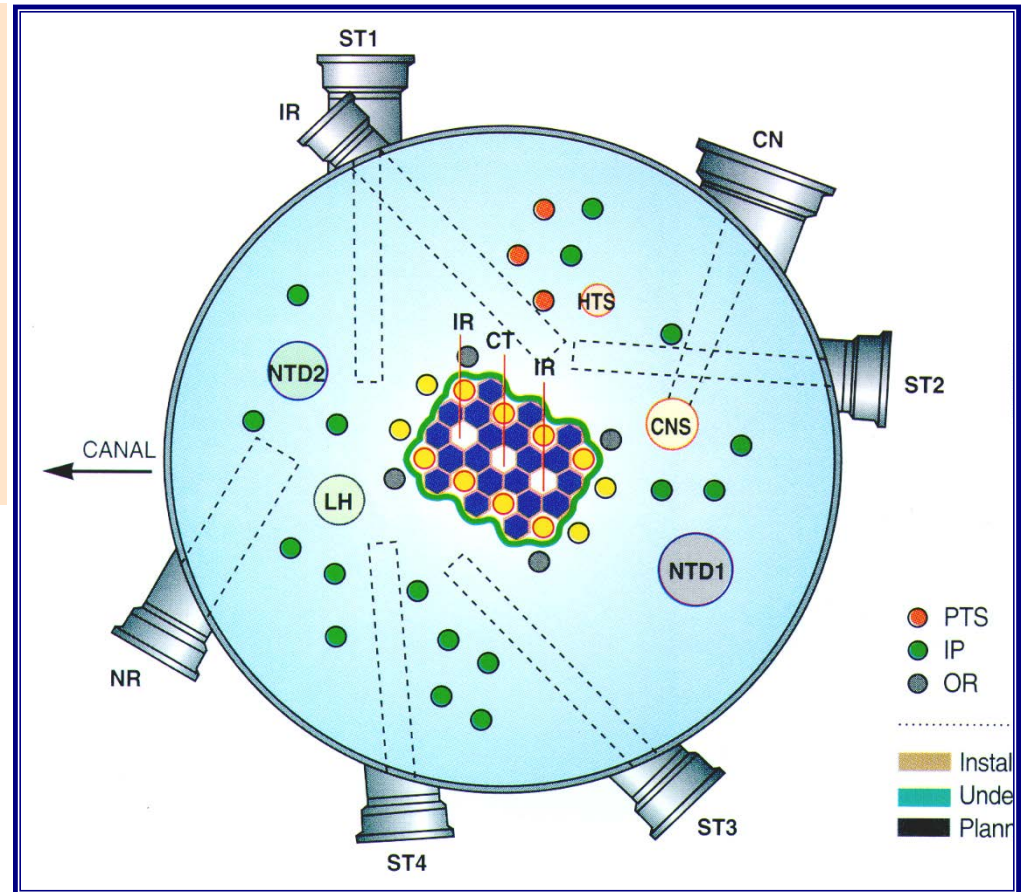
# 수직공 현황

## Installed

IR,CT: Capsule Irradiation Facility  
 OR : Capsule Irradiation & RI Production  
 IP : RI Production  
 HTS : Hydraulic Transfer System  
 for RI Production  
 PTS : Pneumatic Transfer System  
 for Neutron activation Analysis  
 NTD : Neutron Transmutation  
 Doping of Silicon  
 CNS : Cold Neutron Source

## Under-development

IR: Fuel Test Loop



# 조사시험 시설

Small Size Specimens

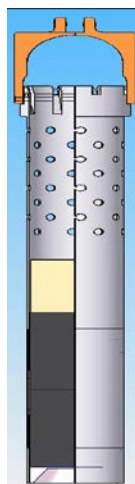
: RABBIT

Standard Size Specimens

: CAPSULE

Si Doping

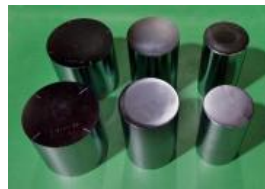
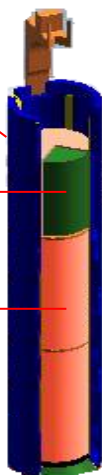
: NTD



container

upper  
graphite

Si ingots



5,6,8 inch Si

KAERI (200mm) Korea Atomic Energy Research Institute



Rabbits (RI rig, PTS)

Al

(L60 / Dia. 24mm)

*Rabbit*



Non-Instrumented Capsule

(L870 / Dia. 60mm)

*Non-Instrumented Capsule*



(L870 / Dia. 60mm) (CT/R)

Instruments

*Instrumented Capsule*



*Capsule Control System*

# 동위원소 생산 시설



Bank II (11 Cells)

$^{166}\text{Ho}$ ,  $^{32,33}\text{P}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ , HDR  $^{192}\text{Ir}$



Bank III (6 Cells)

$^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$



Bank I (4 Cells)

$^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{169}\text{Yb}$



Bank IV (4 Cells)

$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$  Generator

# 방사화분석 시설

중성자 포획 반응 기반 핵분석 기술 연구 개발

세계 최고 수준의 핵분석 기술 기관화

최상위분석법

세계1류 NAA



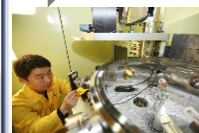
중성자방사화  
분석장치(INAA)



열중성자  
PGAA 장치



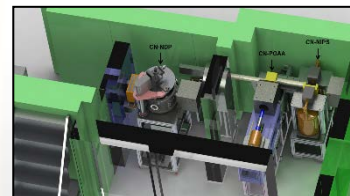
냉중성자  
PGAA/NIPS



냉중성자  
NDP



DNAA  
For U/Pu/Th



CONAS  
(냉중성자방사화스테이션)

고부가가치 표준물질 시장 창출

첨단산업 및 신산업 분야 발전에 기여

국가 표준물질 품질 향상으로 국가 과학 기술 경쟁력 향상

'95

'02

'10

'12

'13

'17

'25

# 중성자 빔 연구 시설 @ 원자로 홀



# 열중성자 빔 연구 시설

빔 포트	설치 장치/시설	비고
IR	ENF	
ST1	RSI, PGAA <sup>†</sup>	<sup>†</sup> : 일시 제거
CN	-	냉중성자 유도관, 주개폐기 등
ST2	HRPD, FCD	
ST3	HIPD*, Bio-C, Bio-D	*: 미완성
ST4	Thermal-TAS**	** : 작업 중
NR	NRF	

# 중성자 빔 연구 시설 @ 가이드 홀



# 냉중성자 빔 연구 시설

빔 포트	설치 장치/시설	비고
CG1	G-TS*, REF-V	*: 작업 중
CG1&2B	CONAS	
CG2A	40M-SANS	
CG3	DC-ToF	
CG4A	-	
CG4B	KIST-USANS, Bio-REF, 18M-SANS	
CG5	Cold-TAS*	*: 작업 중

# SWOT 분석

# 강점 Strength

- 세계적 수준/국내 유일의 연구로와 연구 시설 보유
  - 중성자 속, 중성자 이용 연구 시설 다양성과 규모



- 다목적 연구로에 경험 많은 내부 역량 보유
  - 운전 경험, 수출로 지원 경험
  - 활용 시설/장치 개발 경험: NB, IR, NAA, RI, NTD
  - 시설 활용 경험

# 약점 Weakness

- 전체적인 시설 노후화
  - 유지, 보수 부담 커짐
- 일반적 성능의 활용 장치, 일부는 완성도 부족
- 인력 부족 및 노화
  - 다목적 연구로의 다양한 연구분야 감당 어려움
  - 기능인력 부족, 비정규직 의존 심화
- 첨단 연구 시설/장비/기술/경험 부족
  - 물질 물성 연구, 조사재 취급 연구 등
- 성과대비 비용이 높은 특수성
- 시설 활용보다 운영에 더 관심을 쏟는 문화
- 활용 시설 개발/운영과 연구의 경계 불확실
- 다른 대형연구시설에 비해 인지도가 낮음

# 기회 Opportunity

- 미래 원전 개발과 발전소 폐로에 따른 연구 수요 증가
- 국내 산업 고도화에 따른 연구 수요 증가
- 국외 연구로 노후화 및 폐로
  - 국외 이용자 관심 증대
- JRTR 등 해외 연구로 수출 기여 및 활용 시설 수출 기반 확대
- 국내외 연구로 건설에 따른 연구 및 교육, 훈련 역할 기대
- ICNS2017 대전 개최로 인식 제고 가능

ICNS: International Conference on Neutron Scattering



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

한국원자력학회 2016 추계학술발표회

# 위기 Threat

- 2년 가동 중단으로 인한 연구, 이용자 기반 상실
- 국내외 경쟁 연구 시설 증가
  - 국내외 중성자원, 유사 대형연구시설, 기장 연구로
- 다양한 규제 확대
  - 보안, 안전, 인력
- 국내/지역 원자력 수용성 저하

# 분석 결과 도출한 대응 전략

시설 활용 극대화

질적 성장

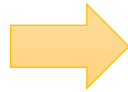
새로운 수요 창출

사회적 기여

# 시설 활용 극대화 전략

S-W-T

성과에 대한 기대



국가전략기초, 산업혁신 기여 고려  
'선택과 집중' 전략 사용

국가전략기초



범용 장치: 인적 자원 배치, 양적 성과 극대화

기타 장치: 내부 연구, 핵심 이용자 체제 운영

국가전략산업

=

원자력

항공우주/국방

자동차/에너지

기술혁신

# 질적 성장 전략

W-O

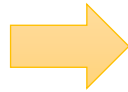
- 아이디어를 가진 **이용자 유치**
  - 소수의 핵심 이용자 육성, 공동 연구 체제로 운영
  - 가능하면 시설 지분도 과감하게 양도
  - 신규 활용 시설은 이용자가 제안
    - ⇒ 내부 전문 인력 부족, 아이디어의 한계 극복
    - ⇒ 핵심 인재 유치
- 하나로에 **정예 인력 육성 필요**
  - 내부에 수준급 연구 능력 확보 노력
  - 시설/장치/장비 엔지니어링 전문성 확보
    - ⇒ 존경받는 연구원 배출



# 새로운 수요 창출 전략

S-O

이용자 수요



시설 확충

단 이용자, 수요자 주도로 추진



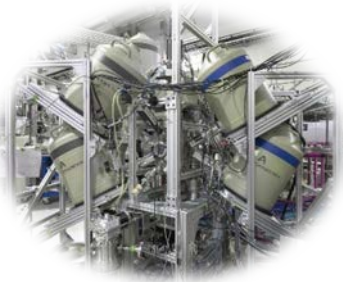
수요자, 인력/예산 기여

기초과학: 미래부, IBS, KBSI, KRISS, PAL, 대학  
산업/국방: 산업부, 국방부, 기업  
원자력: 미래부(원자력), 한수원

조사시료 측정,  
원자로 홀 장치  
이설:



:양전자  
소멸분광 시설



# 사회적 기여 전략

T-O

- 동위원소 생산 & 기술 이전
- 차세대 과학기술자/운영자 교육 훈련
  - 석박사 학위과정 운영
  - UST, 해외 우수대학 연계 및 학연 제도 활용
- 시설의 안전한 그리고 안정적 운영은 필수
- 투명한 시설운영
  - 하나로 운영위원회
  - 국제 자문단
  - IAEA ICERR



ICERR: International Center based on Research Reactor

# 비전과 미션

“미래를 창조하는 중성자 과학기술의 원천”(기존 비전)

비전

## “세계 수준의 중성자 연구시설”

1. 중성자를 이용한 과학/의료/산업 분야 신지식 개발,  
2. 원자력 기술 개발의 도구 역할 수행  
3. 기장 연구로 활용과 운영을 위한 기술 개발  
4. 국가거대과학시설로서의 역량 강화”(기존 미션)

미션

중성자 과학기술 진흥  
산업/국방 수요·적용 창출  
사회적 기여 확대  
시설의 안정적 가동 보장

“국가 대형 연구 시설인 하나로 및 중성자 연구시설을 세계 수준으로 운영하여, 중성자 과학 연구 및 산학연 연구 수요·적용 창출”

# 비전의 의미



- '세계 수준의 중성자 연구시설'

- 하나로의 강점을 살리면 실현 가능
- 양보다 질을 추구

- 비용 대비 효율이 높은 시설

- 높은 수준의 질적 성과
- 존경 받는 연구원 다수 배출
- 다목적 연구로를 여러 가지 목적에 잘 활용

# 중성자 과학기술 진흥

## 1-1. 중성자 산란장치 이용 연구 확대 노력

- 융합연구 확대
  - 핵심 인재 유치, 여러 기관 참여, 기초분야 연구
- 산란장치 성능 개선과 첨단화
- 경쟁력 있는 장치 우선 지원
- 일반 이용자 지원과 내부연구/핵심이용자 중심의 다중 이용자 체계 운영

## 1-2 응용 핵물리 연구 활성화

- 연구로 이용 국가인증표준물질 공동연구 추진
- 양전자소멸분광, 기초중성자물리 등 관련 실험 기반 구축

# 산업/국방 수요·적용 창출

## 2-1. 조사시험 능력 획기적 향상

- 조사시험 핵심 기술 개발
- 조사 후 재료 취급 시설 확충 (핫셀 개조)

## 2-2. 조사재료/핵연료의 비파괴물성 측정

- 조사한 재료의 물성 측정
- 원자로 홀 내 산란장치 이용 측정 수요 대응

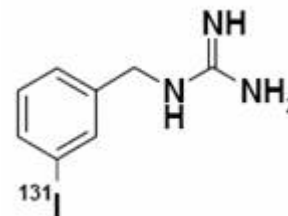
## 2-3 산업/국방 연구를 위한 시설 확충

- 신규 열중성자 유도관에 산업/국방 장치 설치
- 산업응용 및 국방연구 협력 센터 운영

# 사회적 기여 확대

## 3-1. 동위원소 백업 공급

- 기장로 본격 가동 일정에 맞춤
- 동위원소 제품화 기술 민간 이전
  - 경구용 I-131 방사성의약품 등



## 3-2. 희귀 방사성의약품 및 연구용 핵종 지속 공급

- I-131 mIBG 등

## 3-3. 원자력 홍보 및 국제협력

- 새로운 형태의 홍보 전략: STEM 교사 연수 등
- 국제 자문단, IAEA ICERR
- 연구로 수출 기여

## 3-4. 차세대 과학기술자의 교육, 훈련

- 대학(원)생에게 교육, 훈련 기회 제공 / DRC, UST 연계 학연과정 운영

# 시설의 안정적 가동 보장

## 4-1. 노화 관리 및 시설 개선

- 노화 관리: 1차 펌프 등 예비품 확보
- 성능 개선: 계통, 기기 설계 개선 등

## 4-2. 지속 운전 기반 확립

- 사용 후 핵연료 저장용량 증대 (향후 40년 운전 대비)
- 중수 내 삼중수소 농도관리
- 주기적 안전성 평가 수행 및 후속조치 이행
- 핵연료 노내 조사시험 시설(FTL) 계획 수립 및 조치

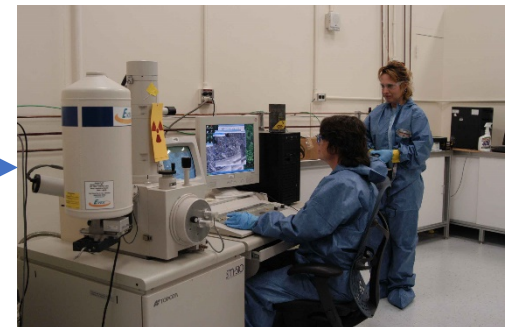
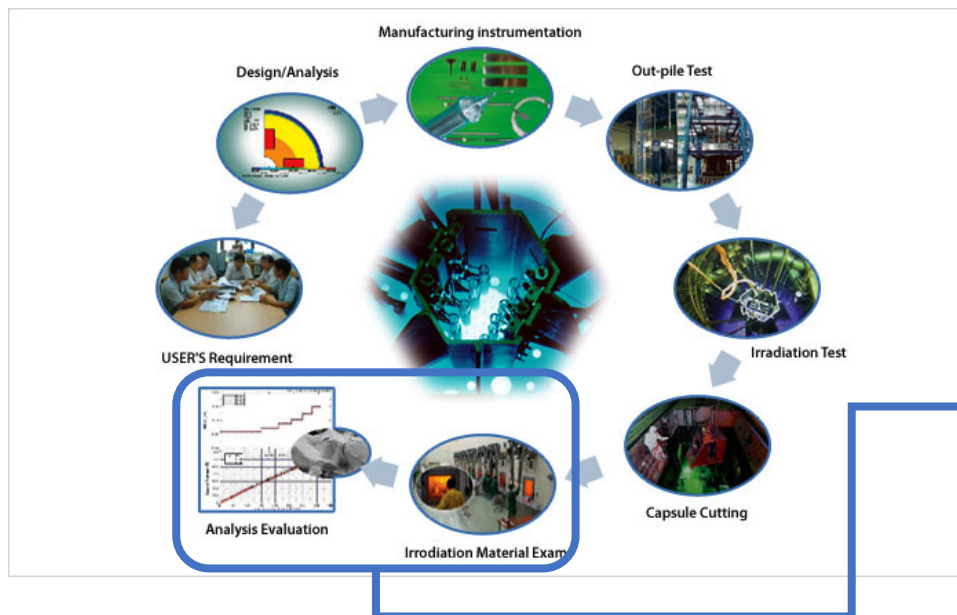
# 기대 성과: 기초과학

- 연간 이용자 수 1,000명, SCI 논문 100편 돌파
- 상위 10% 영향력 있는 논문 기대



# 기대 성과: 원자력

- 조사 후 물성 측정 활성화  
⇒ 조사시험 분야 성장
  - 미래원자로/폐료/안전연구에 도움



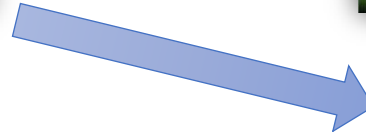
# 기대 성과: 산업/국방

- 미래부 외 타부처 투자 기대
- 다양한 기관이 시설 건설, 운영, 공동 연구
- 산·학·연 공동 연구 센터



# 기대 성과: 인력 양성 외

- 활용분야 석·박사, 연구로 운전원과 기술자
- 동위원소 생산, 기장으로 보완
- 향후 40년간 안정적 운영 기틀



# 추진 일정



# 향후 계획

- 회람 및 의견 수렴: ~10월
  - 하나로 이용자협의회
  - 각 이용자 단체 (한국 중성자빔 이용자협회 등)
  - 정부, 규제기관 등
  - 원자력 학회, 10월
- 실행 계획 수립: 11월
- 보고서 수정, 발간: 12월
- 정책 과제 추진: 12월~

**끝.**

**감사합니다!**

한국원자력학회 2016년 추계 워크숍  
연구용 원자로 기술 개발 및 수출 현황

# 교육용 원자로 AGN-201K의 활용 현황 및 미래 발전 전략

교수 김명현  
경희대학교

2016년 10월 26일  
경주 화백컨벤션센터



경희대학교 원자로센터

1. 원자로센터의 연혁 및 현황
2. 원자로센터의 역할
3. 원자로실험 교육현황
4. 센터의 당면 문제
5. 미래 발전 전략



# 1. 원자로센터의 연혁

## 경희대 AGN-201K 원자로는

1967년에 Colorado State University에 설치되었던 것을

1976년에 경희대학교로 옮겨 온 것으로

1982년12월부터 교육용으로 사용되어 왔음.

현재 똑같은 원자로가 전세계 5군데에서 운영 중임.

USA – Texas A&M Univ., U of New Mexico, Idaho State Univ.

Italy – U of Palermo

Korea – Kyung Hee University

## <연혁>

1976.3. : US DOE의 주선으로 CSU가 경희대학교에 기증

1980-1982 : 건설허가 및 설치

1982.12. : 원자로 가동 및 명명식

**2003-2007 : 제1차 원자로 개량 프로젝트**

2007.10 : 운영 허가 취득

**2008. 9 : “원자로센터” 설립**

2009. 1 : 전국 원자력공학 전공 학생용 “원자로실험” 개방교육 개시

**2011-2012 : 제2차 원자로 개량 프로젝트**

2013. 7 : 초중고 교사초청 원자력체험 교실 운영 개시

# 1. 원자로센터의 연혁 – 1차 시설 개선

4



출력 100배 증가에 따른 (01 watt → 10 watt)  
차폐 벽체 및 platform 설치 (2007년)

중성자속 증대  
 $3.0 \times 10^6 \rightarrow 3.0 \times 10^8 \text{ \#/cm}^2\text{-sec}$  (Core Average)





기존 운전용 콘솔의 개선 및  
교육용 디지털 콘솔 추가 설치



New Digital Monitoring Console

Old Rewired Analog Console

## Specification of AGN-201K

Thermal Power : 10. watt

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

Fuel :  $\text{UO}_2$ -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

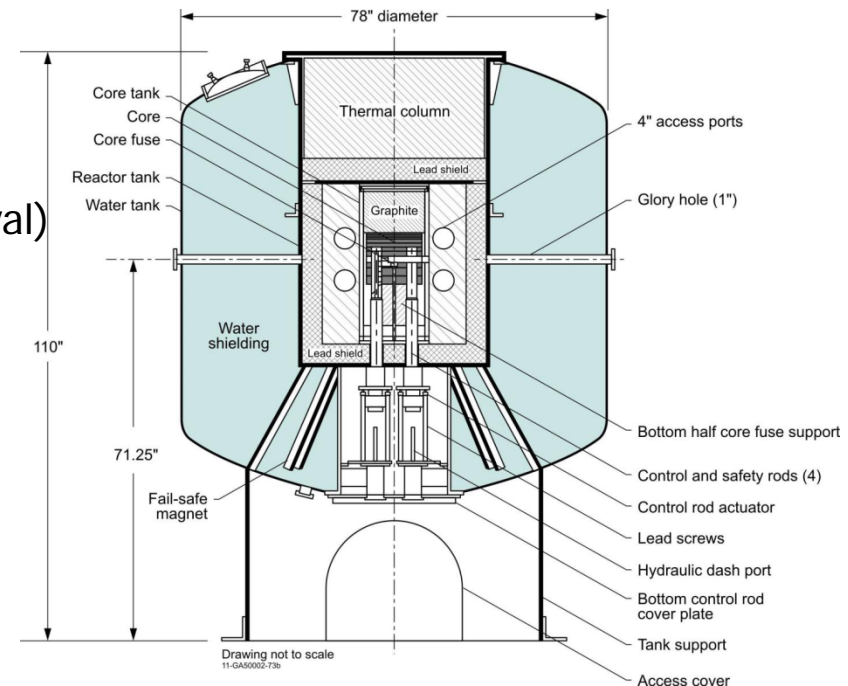
No active coolant and cooling system

Neutron Source : Ra-Be 10 mCi

Very High Negative Feedback Effects

$(\alpha_T = -2.75 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C})$

Design Power : 20 Watts (1977 USNRC Approval)





Max. Power: 10 Wt  
Max. Flux :  $3.0 \times 10^8$  #/cm<sup>2</sup> sec



Ideal for Student Training  
(Safe & Good enough)

Duel Consoles  
(Analog Console with  
modern digital console)



The only reactor allows student  
touch & feel



Two refurbishment projects  
2004-2007 and 2010-2011



Well simulated Physics Test in NPP

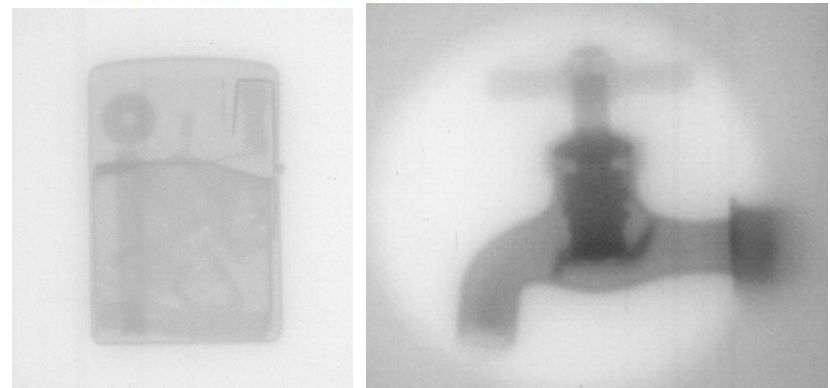
Good platform for many experiments



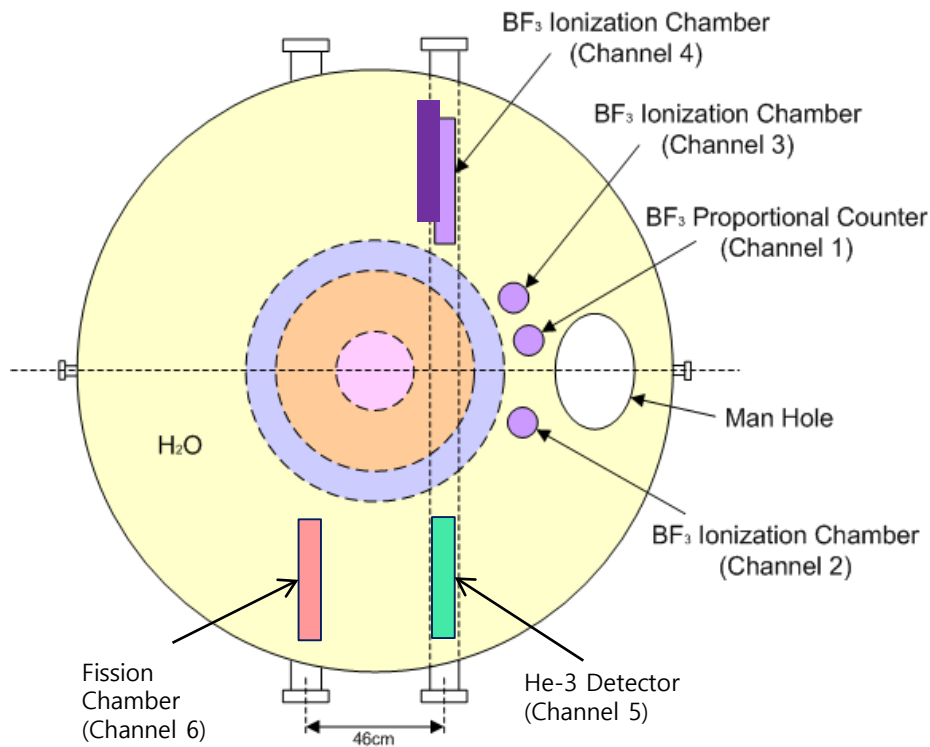
NAA with HPGe Detectors



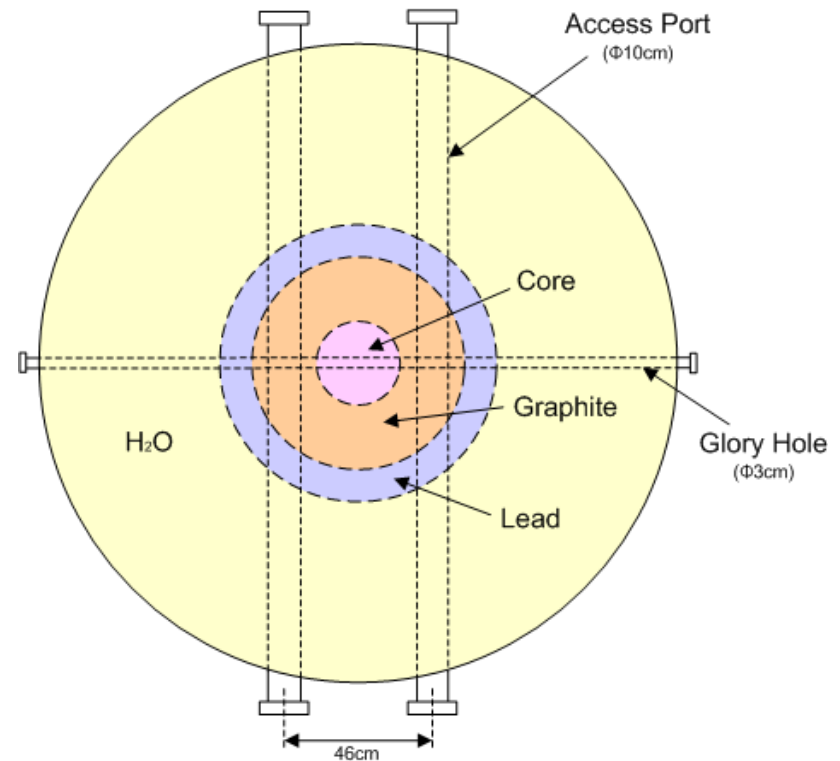
Neutron Radiography Image



## 7개의 중성자 계측기



## Glory Hole & Beam Ports



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

## 부총장 직속 독립기관

원자로 운전 및 안전관리, 교내 방사선 안전관리, 핵통제 관리  
교육 과정 운영 (전공 원자로실험, 주말과정, 체험학습과정)



센터장  
김명현 교수  
SRO Licensee



연구위원 (강사)  
홍서기 교수

기술직원 (과장)  
한정섭  
RO Licensee



‘16년 1월 타부서 이동

기술직원(계장)  
이민한  
RO Licensee  
SRI Licensee



# 원자로센터의 역할



연구로의 20%는 대학 원자로임  
university reactors.

	Institute Reactors	University Reactors	Total	Ratio
America	53	29	82	35%
Asia	97	12	109	11%
Europe	61	16	77	21%
Africa	6	0	6	0%
Total	217	57	274	20%

(from IAEA data at Yr-2003)

2015년 연구용 원자로의 숫자는 246개이며, 계속 감소 추세이다.  
그러나 대학원자로의 수요는 아시아, 아프리카를 중심으로 늘어날 것임.  
왜냐하면...

현재 개발도상국가의 연구용 원자로는 너무 노후했음.  
예전처럼 무상 지원이 없을 것이나,  
몇몇 나라는 원자력 도입과 HRD에 관심을 보임.

### 1) Education

- ◆ Experiment Course for KHU students
- ◆ Training Courses for students from outside
- ◆ Training Courses for international students

### 2) Research

- ◆ Subcriticality Measurement
- ◆ Neutron Radiography
- ◆ Neutron Activation Analysis

### 3) Service

- ◆ Neutron Detector Calibration



### Interaction with Public (School Teachers)

- ◆ Nuclear Experience Class (Science Camp)  
Three-days experimental training course

### Interaction with High School Students

- ◆ Nuclear Education School

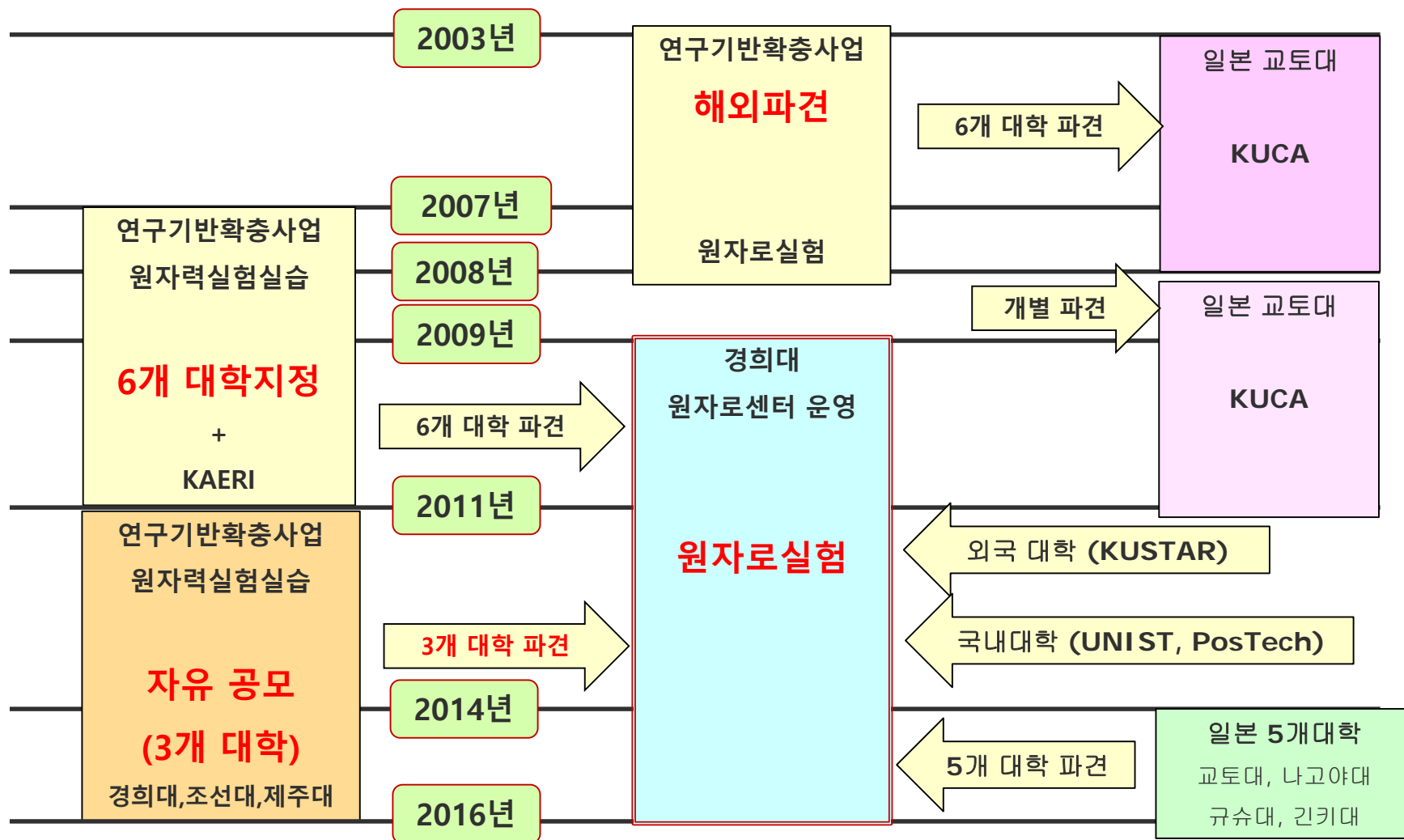
현재 경희대 원자로센터는  
전공 교과목 “원자로실험” 교육과정을 제공하는 유일한 기관  
→ 준국가 시설이 되었음.

1995년 이전: 서울대학교, 한양대학교 – 공릉동 TRIGA 원자로에서 실험 (전공필수)

1995년 이후: 하나로에서 유사 실험 제공

2003년-2008년: 6년간, 6개 대학 파견실험 (교토대학교 원자로실험 과정 연수)





국내외 교육 활용도는 매우 높으며, 앞으로 더 높아짐

국가	학교 (기관)	원자로	현황
일본	교토대학교	100 watt KUCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HEU (LEU 변환필요)</li> <li>• 시설안전검사 수검중</li> <li>• 2016년 하반기 재가동 목표</li> </ul>
	긴키대학교	1 watt UTR	
중국	CIAE	27 KWt MNSR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HEU 사용 (LEU 변환중)</li> <li>• 정보 및 교류 부족</li> </ul>
말레이시아	(MNA)	1 MWt TRIGA	학생실험에 거의 사용하지 않음
베트남	(DNRI)	500 KWt DRR	학생실험에 거의 사용하지 않음
인도네시아	(NAEA)	2 MWt TRIGA	학생실험에 거의 사용하지 않음

### 연구 활용도는 높지 않음

- Detector Calibration : 3차례 서비스
- Sub-criticality Measurement : 2명 석사학위 논문
- Neutron Radiography : 1명 석사학위 논문
- 동위원소 생산 : 시설 및 운영인력 필요
- NAA : Flux가 낮아 활용성이 낮음.

### PA 활용도는 매우 높음

#### 1) 초중고 교사대상 체험학습 교실

	Period	Participants (School Teachers)	# of Teachers
1	July 23-25, 2013	JeonNam, GwangJu, GyeongJu	11
2	July 25-27, 2013	GwangJu, JeonNam, UIJin	13
3	Sep. 14-15, 2013	GyeongGi	28
4	Jan. 6-8, 2014	Seoul, Pusan, Incheon	19
5	Jan. 9-11, 2014	Seoul, Pusan, Incheon	20
6	July 23-25, 2014	Seoul, Daejon, Pusan	16
7	July 28-30, 2014	Seoul, Daejon, Pusan, YoungDuk	18
		<b>Total</b>	<b>125</b>

현재 인력 및 자원 부족으로 중단한 상태



만족도	아주 만족	만족	보통	불만족	매우 불만족
강좌 내용	82%	18%	-	-	-
교육의 질적 수준	82%	18%	-	-	-
강좌 참여도	67%	33%	-	-	-
학교 교육 활용도	79%	21%	-	-	-
교육자료의 가치	64%	28%	8%		

### 2) 고교생 방문 교육

2016년부터 고교생에게 개방하고 있음.

목적: 원자력 홍보/ 진학안내/ 원자력교육 학습

기수		탐방일자	탐방고교	참여인원(명)
비공식	1차	2013.08.27-28	울진평해공고 (한국원자력마이스터고)	30
	2차	2014. 06. 23 (월)	서울 동북고	30
	3차	2015. 05. 02 (토)	서울 동북고	20
	4차	2015. 08. 12 (수)	대전 충암고	21
	5차	2016. 04. 29 (금)	서울 동북고	22
공식	1기	2016. 05. 21 (토)	경기 삼괴고	26
	2기	2016. 05. 28 (토)	경기 광명북고	20
	3기	2016. 06. 11 (토)	서울 세종고	25
	4기	2016. 06. 12 (일)	한국 삼육고	16
	5기	2016. 07. 17 (일)	서울 수도전기공고	30
	6기	2016. 08. 07 (일)	서울 수도전기공고(심화)	7
	7기	2016. 08. 27 (토)	서울 잠실여고	30
총 참석인원				277

# 원자로 실험 교육 현황



	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

## 원자로실험 교과 과정-1/2

	시간	활동 계획	내용
<b>제1일 (수요일)</b>			
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	
<b>제2일 (목요일)</b>			
	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
<b>제3일 (금요일)</b>			
	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	

## 원자로실험 교과 과정-2/2

	시간	활동 계획	내용
<b>제6일 (월요일)</b>			
	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	
<b>제7일 (화요일)</b>			
	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	

## 원자로실험 교육 실적-1/3

	Education Period	Participants	Number of Trainee
1	Jan. 19-23, 2009	CSU UG students	8
2	Feb. 2-6, 2009	SNU UG & KHU Graduate students	6
3	Feb. 16-20, 2009	JNU UG students	13
4	Apr. 27- May 1, 2009	HYU UG students	24
5	Jun 22-26, 2009	KAIST Graduate students	12
6	July 6-10, 2009	KAERI HANARO operators	11
7	Sep.-Nov., 2009	KHU UG & Graduate students	11
8	Jan. 27-Feb.2, 2010	JNU UG & KAIST Graduate student	11
9	Feb.3-9, 2010	CSU UG students	12
10	Feb.17-23, 2010	DGU UG students	8
11	Nov.1-5, 2010	HYU UG students	8
12	Sep.-Nov., 2010	KHU UG & Graduate students	6
13	Jan.26-Feb.1, 2011	CSU & DKU UG student	9
14	Feb.9-15, 2011	DGU UG students	12
15	Feb.16-22, 2011	JNU UG students	9
16	July 11-12, 2011	KUSTAR Graduate students	7
17	Jan. 11-17, 2012	CSU UG students	8
18	Jan. 26-31, 2012	KAIST UG students	8

## 원자로실험 교육 실적-2/3

	Education Period	Participants	Number of Trainee
19	Feb. 1-7, 2012	UNIST UG students	16
20	Feb. 8-14, 2012	JNU & UNIST UG students	15
21	July 3-5, 2012	KUSTAR Graduate students	4
22	Aug. 13-17, 2012	UNIST UG students	11
23	Aug. 20-24, 2012	UNIST UG students	11
24	Sep.-Dec. 2012	KHU UG Students	5
25	Dec. 3-7, 2012	Malaysian Nuclear Agency	6
26	Jan. 16-22, 2013	KAIST UG students	8
27	Jan. 23-29, 2013	JNU UG students	11
28	Jan. 30-Feb.5, 2013	CSU UG Students	12
29	Mar.-Jun., 2013	KHU UG Students	23
30	Jun.24-26, 2013	KUSTAR Graduate students	5
31	July 31-Aug.6, 2013	UNIST UG students	7
32	Aug. 7-13, 2013	UNIST UG students	13
33	Jan.22-28, 2014	JNU UG students	11
34	Feb.5-11, 2014	CSU UG Students	8
35	Mar.-Jun., 2014	KHU UG Students	18
		total	367

## 원자로실험 교육 실적-3/3

	Education Period	Participants	Number of Trainee
36	July 3-6, 2014	Kinki & Nagoya University	10
37	Aug. 18-22, 2014	UNIST UG students	8
38	Sep. 11-14, 2014	Kinki & Kyushu University	10
39	Jan. 12-16, 2015	Jordan Atomic Energy Commission	18
40	Jan. 19-22, 2015	Postech Graduate Students	9
41	Jan.28 – Feb.3, 2015	JNU UG students	10
42	Feb.4-10, 2015	CSU UG students	8
43	Mar.-Jun., 2015	KHU UG Students	16
44	July 7-10, 2015	Nagoya, Kinki & Kyoto University	11
45	July 15-21, 2015	DGU UG students	9
46	August 18-21, 2015	Kinki, Kyushu & Kyoto University	10
47	August 24-28, 2015	UNIST UG students	8
48	Jan. 6-12, 2016	CSU UG students	8
49	Jan. 13-19, 2016	JNU UG students	9
50	July 19-22, 2016	Kindai, Kyoto, Kyushu, Nagoya	12
51	Aug. 16-19, 2016	Kyoto, Kyushu, Kindai, Fukui	12
52	Aug. 22-26. 2016	UNIST	12
		total	547

## 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
	<b>40</b>	<b>442</b>

#### 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

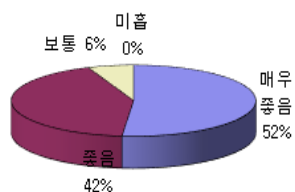
#### 종합 통계 (2016년 8월까지)

	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

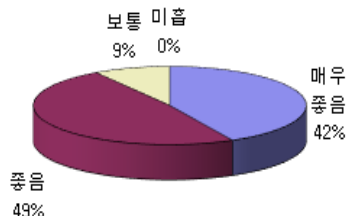


## 참가자 실험 교과과정 만족도 조사 결과

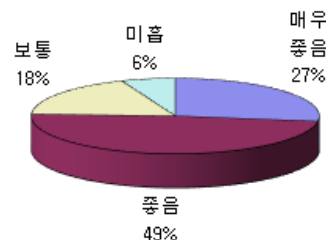
1. 교육내용과 구성의 적절성



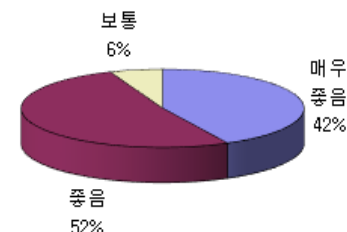
2. 교육 만족도



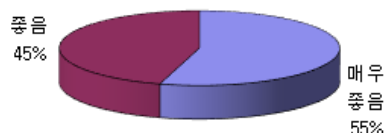
3. 교육 참여 의지도



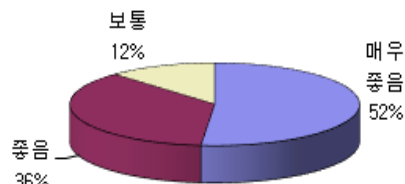
4. 교육 활용도



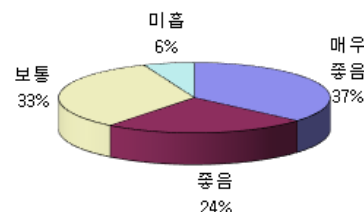
5. 교육시설의 만족도



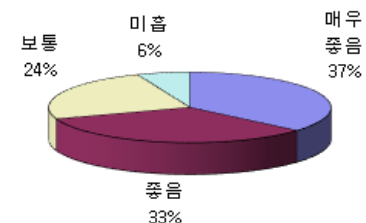
6. 강사에 대한 만족도



7. 기숙사 시설의 만족도



8. 제공된 식사의 만족도

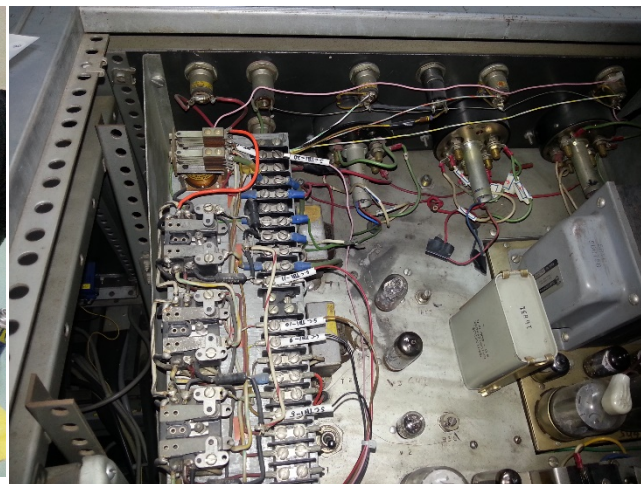


## 참가자 실험 내용별 만족도 조사 결과

	실험 1	실험 2	실험 3	실험 4	실험 5	실험 6
매우 좋음	23	16	15	14	21	20
좋음	9	11	13	12	6	8
보통	1	6	5	5	6	4
미흡	0	0	0	2	0	1
매우미흡	0	0	0	0	0	0

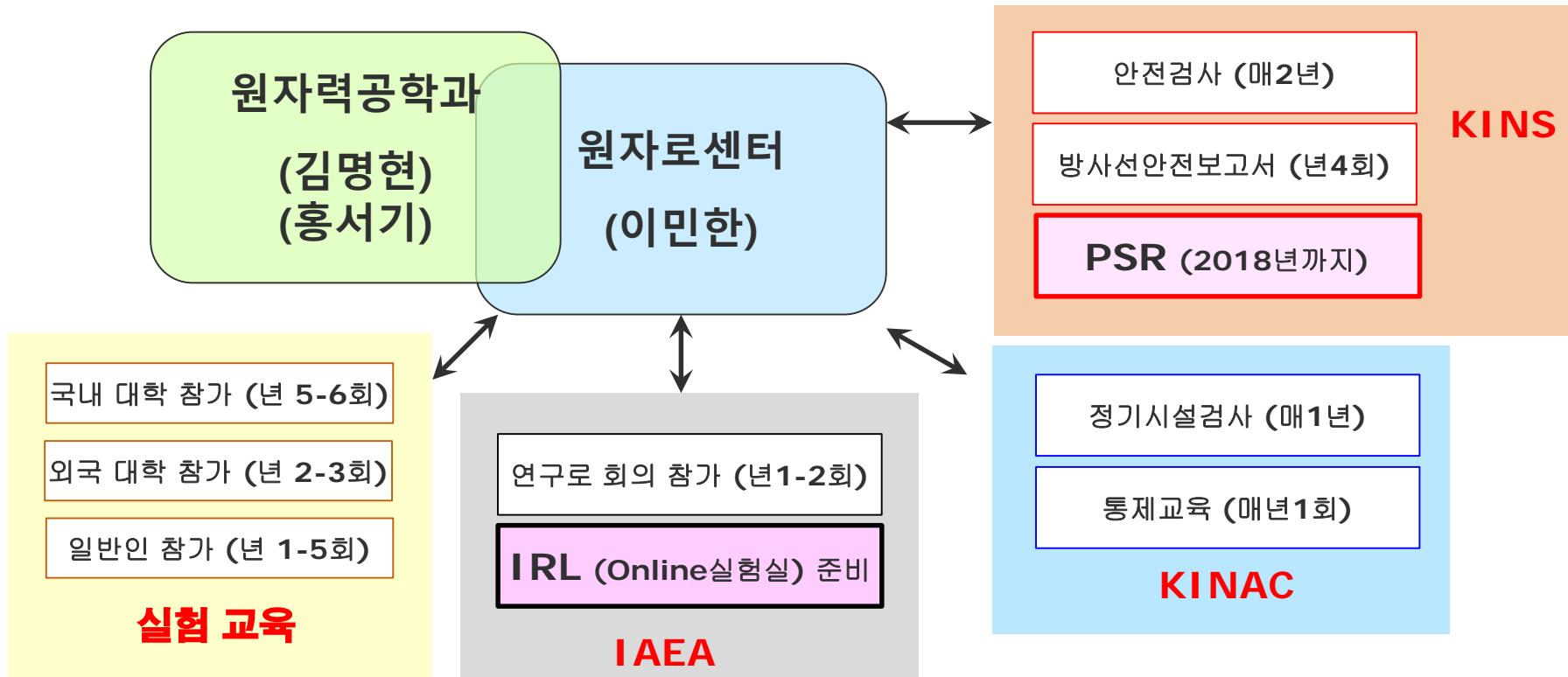
1. 원자로 운전 실습
2. 원자로 주기와 반응도 측정
3. 임계질량 측정 실험
4. 제어봉가 측정 실험
5. 열중성자속 측정 실험
6. 반사체 효과 및 온도궤환 효과 실험

# 센터의 당면 문제



### 1) 막중한 업무 부담

- 교수 2인 담당 (연구+교육)  
센터 업무 추가부담 → 전담 강사진 필요
- 직원 1인 담당 (행정+운영)  
RO 자격증 계약직 직원 필요



## PSR 작성

2015년 7월 23일 공문 통보



### 원자력안전위원회



수신자: 한국원자력연구원장, 경희대학교총장

제목: 연구용 및 교육용원자로 주기적 안전성평가 시행 알림

1. 관련 : 원자력안전법 제23조(주기적 안전성평가), 제34조(준용)
2. 원자력안전법이 개정되어 시행(2014.11.22.)됨에 따라 연구용원자로 및 교육용원자로에 대해서도 주기적 안전성평가를 실시하도록 규정 되었습니다.
3. 이에 따라 **연구용원자로 및 교육용원자로의 운영허가를 받은 자는 최초의 주기적 안전성평가를 2018년 12월 31일까지 마치고 그 평가결과를 우리 위원회에 제출하여야 함**을 알려드리오니,
4. 동 주기적 안전성평가 실시 일정에 맞추어 평가보고서가 제출될 수 있도록 준비에 만전을 기하여 주시기 바랍니다. 끝.

원자력안전위원회위원장

IAEA Safety Standards  
for protecting people and the environment

Periodic Safety  
Review for  
Nuclear Power Plants

Specific Safety Guide  
No. SSG-25



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

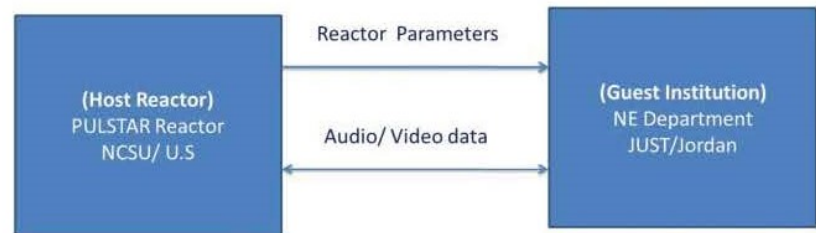


Figure 1. Schematic diagram illustrating the connection between the PULSTAR reactor and JUST.



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

## IRL 준비

### IAEA 협력 사업 – Internet Reactor Laboratory

- 2015년 1월 16일 IAEA Director가 방문하여 제안함.
- 한국원자력연구원에서는 말레이시아 원자력연구원으로 잠정 결정하고 별도 추진 중이다가, 경희대에 참여 의사를 물어 봄 (2015년 11월 25일)
- 2015년 12월 ANENT 회의(IAEA)에서 경희대를 포함 재검토기로 함.
- 3월 7일-10일 경희대 원자로센터 현장 점검

Internet Reactor Laboratory (IRL) 유치 가능성 점검  
(2인 방문; 프랑스, 요르단)

- 3월 21일(월)~3월 24(목) : ANENT 코디네이터 미팅 - IRL-Asia center를 선정
- 최근 IAEA에서 비공식적으로 경희대학교 지정 의사를 보내 옴
- 경희대학교 부총장 명의 참여의향서가 IAEA 관계자에게 접수되었음.



### 2) 기관의 정체성 확립

- 실험교육 서비스는 공공 서비스  
(유료이기는 하지만 수익사업이 아님)
- 홍보기관으로서의 잠재성 확인 (교사, 학생)
- 국제적인 교육센터 가능성 높음 (UAE 학생, 일본 학생)

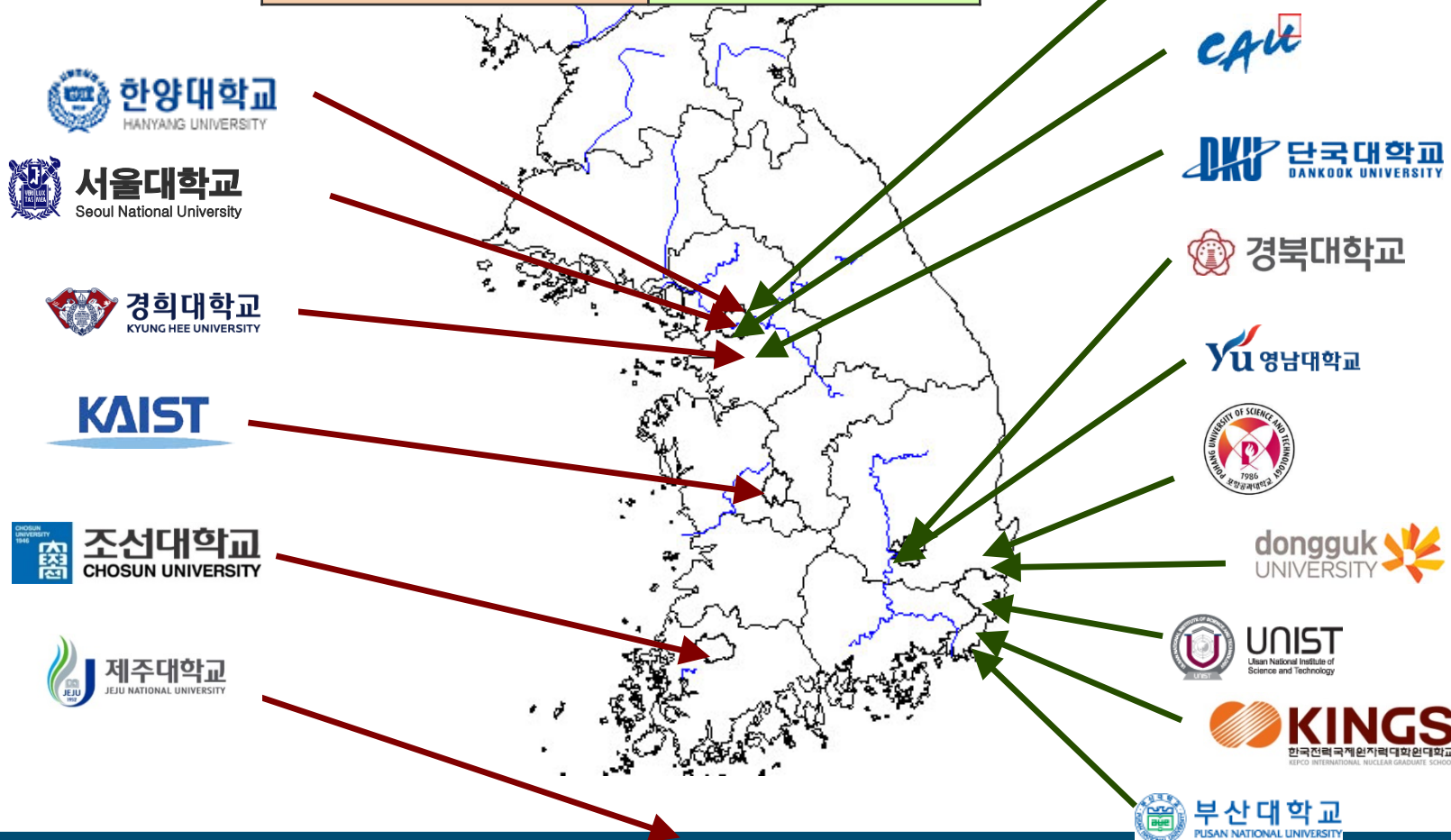
준 국가기관의 역할 담당  
한국을 대표하는 원자로 교육기관

반면, 하나로 연구로에 준하는 감독, 의무를 가짐

따라서, 공공성을 중요시하여,  
사립대학 시설이지만 정부의 위탁 교육센터가 되어야 함.

실험실습 과제의 현재 형식은 문제점이 있음. (교육 수요 급증)

Before 2000	In 2015
6 universities	16 universities



### 3) 운영 비용 및 적절한 인력 확보의 문제

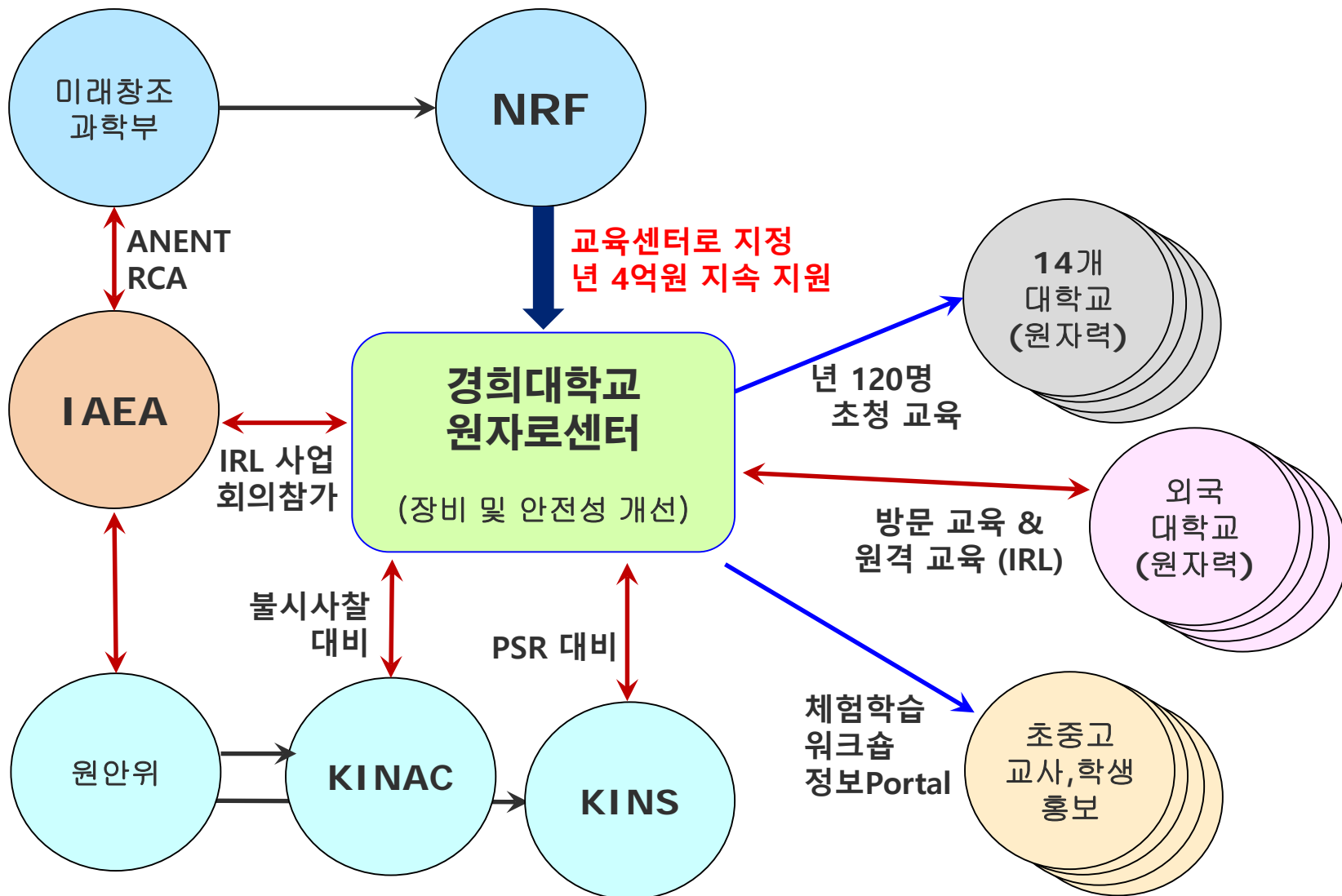
#### 필요성

- 주기적 안전성 평가 보고서 작성 (많은 비용과 인력 필요)
- 늘어나는 교육 수요에 비해 인력은 부족
- IAEA 협력회의 및 협력사업에 자체 비용이 필요함
- 대국민 (초중고 교사/학생) 대상 홍보 사업의 지속
- 계측 기기 및 시설의 보완  
(개인 용도 연구 장비가 아니고, 안전 및 교육 장비의 교체)  
(대학이 직원 인건비, 교육비, 기기 검·교정비는 부담함)

센터명	원자로 출력	교원수	직원수
<b>Kyoto University</b> Reactor Research Institute (KUCA) <a href="http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/en">Http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/en</a>	100 Wt	77명 중 4명이 담당	행정직원: 5명 기술직원: 30명
<b>Kinki University</b> Atomic Energy Research Institute <a href="http://www.kindai.ac.jp/rd/research-center/aeri/staff/index.html">http://www.kindai.ac.jp/rd/research-center/aeri/staff/index.html</a>	1 Wt	15명	행정직원: 6명 기술직원: 1명
<b>경희대학교</b> Reactor Research & Education Center <a href="http://rrec.khu.ac.kr">http://rrec.khu.ac.kr</a>	10 Wt	2명	기술직원: 0.5명

# 미래 발전 전략





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



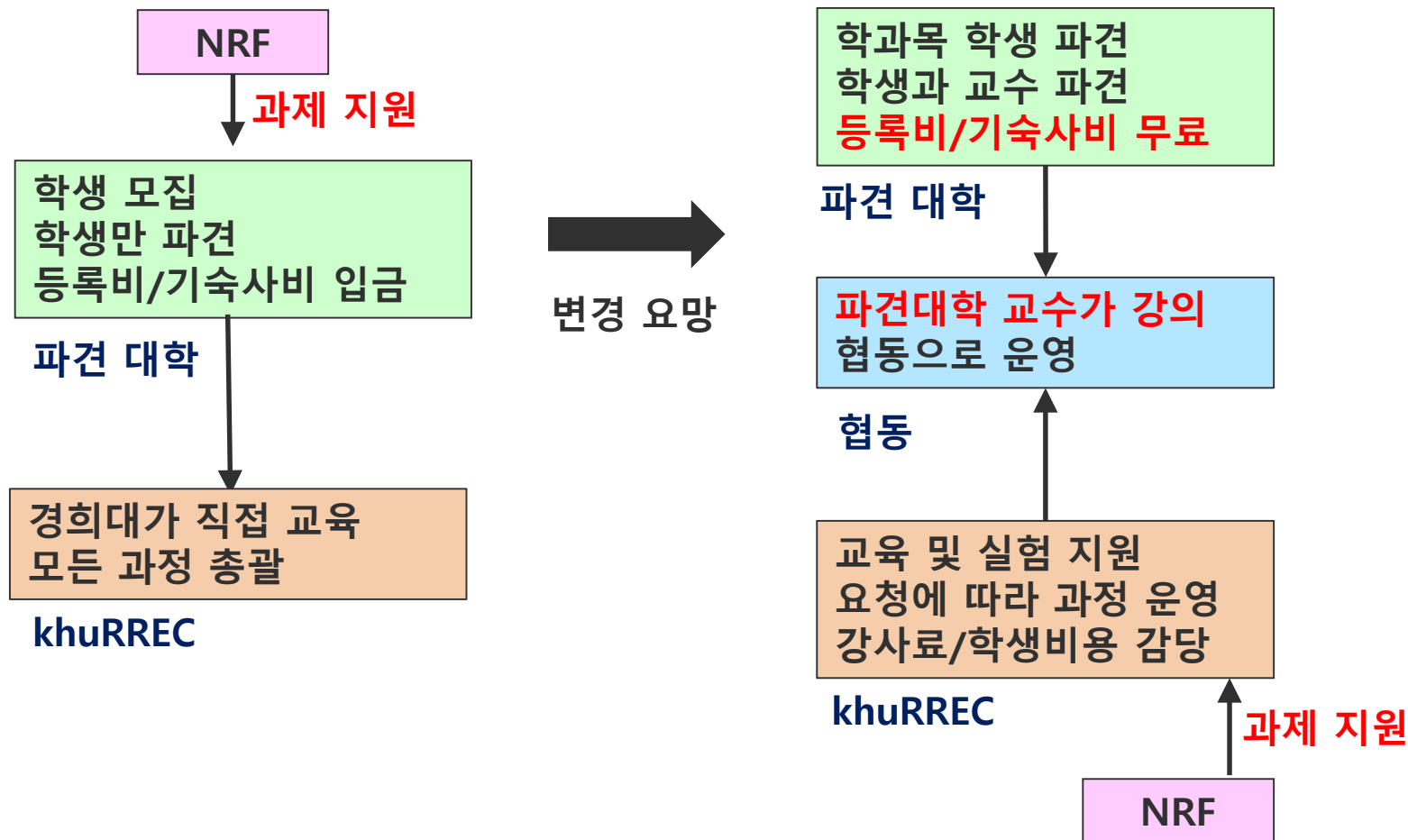
외국대학의 정규 방문 장소 → 국제협력 기대

HRD through Remote Learning  
under ANENT

ANENT



## 국내 16개 대학 및 산업체 교육지원 체계개편



**감사합니다.**

**Q & A**

# 기장연구로(KJRR) 사업 추진 현황

2016. 10. 26

이 두 정  
([djlee1@kaeri.re.kr](mailto:djlee1@kaeri.re.kr))

한 국 원 자 력 연 구 원

# 목 차

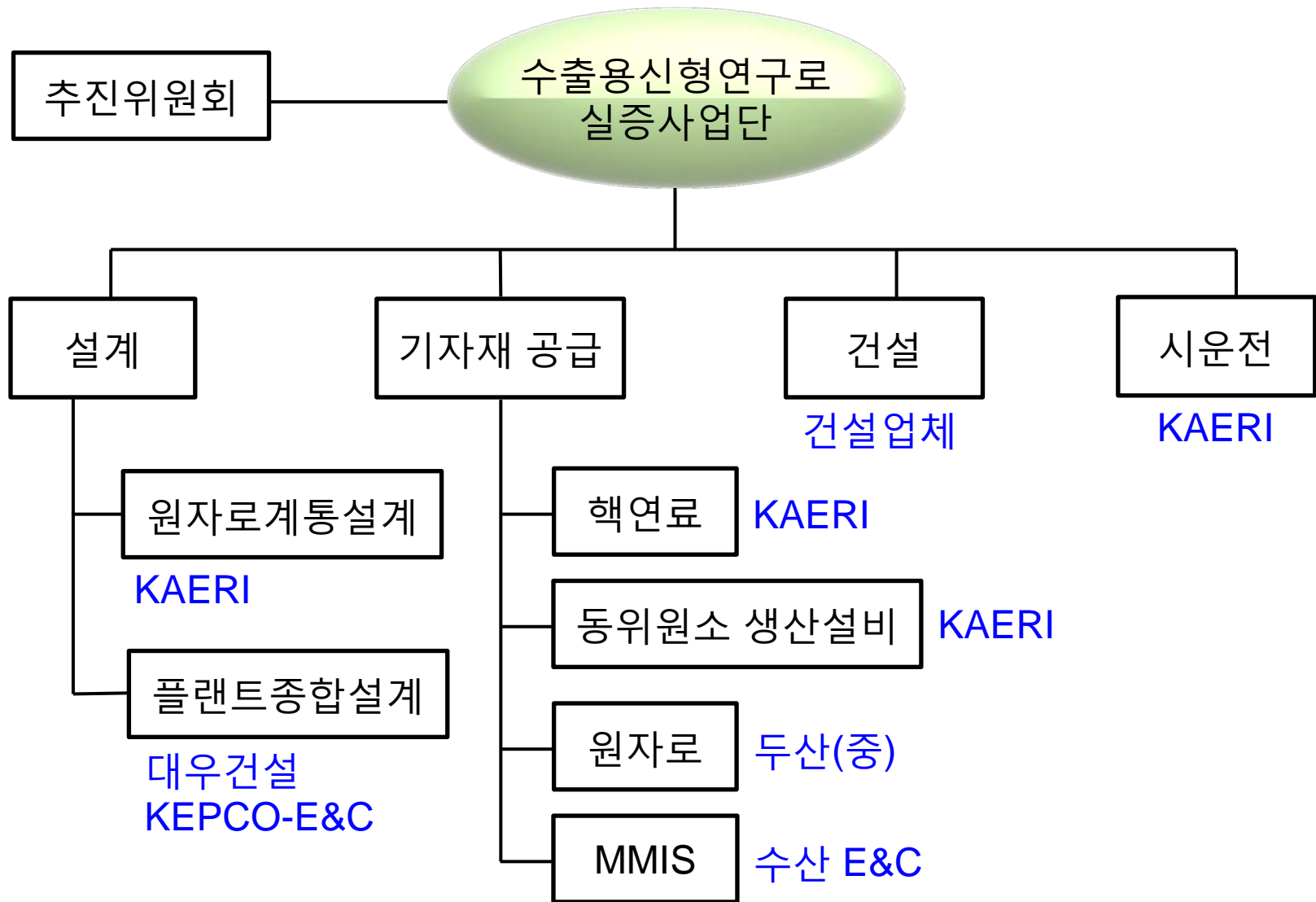
- 사업개요
- KJRR 설계특성
- 맺음말

# 1. 사업 개요

사업명	수출용신형연구로 개발 및 실증사업
사업목표	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 의료 및 산업용 방사성동위원소의 국내공급 안정화와 수출</li> <li>- 연구용원자로 핵심기술 실증을 통한 연구로 수출 경쟁력 강화</li> </ul>
사업내용	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 15MW 수출용 신형연구로 구축</li> <li>- 방사성동위원소 생산시설 및 중성자도핑 시설 구축</li> </ul>
사업기간	2012. 04. 01 ~ 2019. 03. 31
위치	부산시 기장군 “동남권 방사선 의·과학산업단지”



# 사업 추진 체계



# 사업추진일정

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Feasibility Study Report (2011.02)	◆								
Project Launching (2012.04)		◆							
Contract with A/E (2013.04)			◆						
Apply Construction Permit (2014.11)				◆					
Construction start (2017.1)						◆			
Reactor Critical (2019.03)			60% progress as of Oct. 2016					◆	
Reactor Full Power (2019.11)									◆
Fission Moly Production (2019.11)									◆

※ 사업일정은 사업예산과 연동되어 조정될 수 있음

# Project Budget



◆ License & Site Investigation

◆ Plant Construction

◆ Fuel Design & Supply

◆ RIPF & R&D Facility

◆ LEU Target/FM Facility

◆ Neutron Irradiation Facility

◆ RWTF

◆ Site (130,000 m<sup>2</sup>)

◆ Infra-Structure

➤ Entrance Road (two-lane)

➤ Elec.Supply(154kV, 20MVA-2)

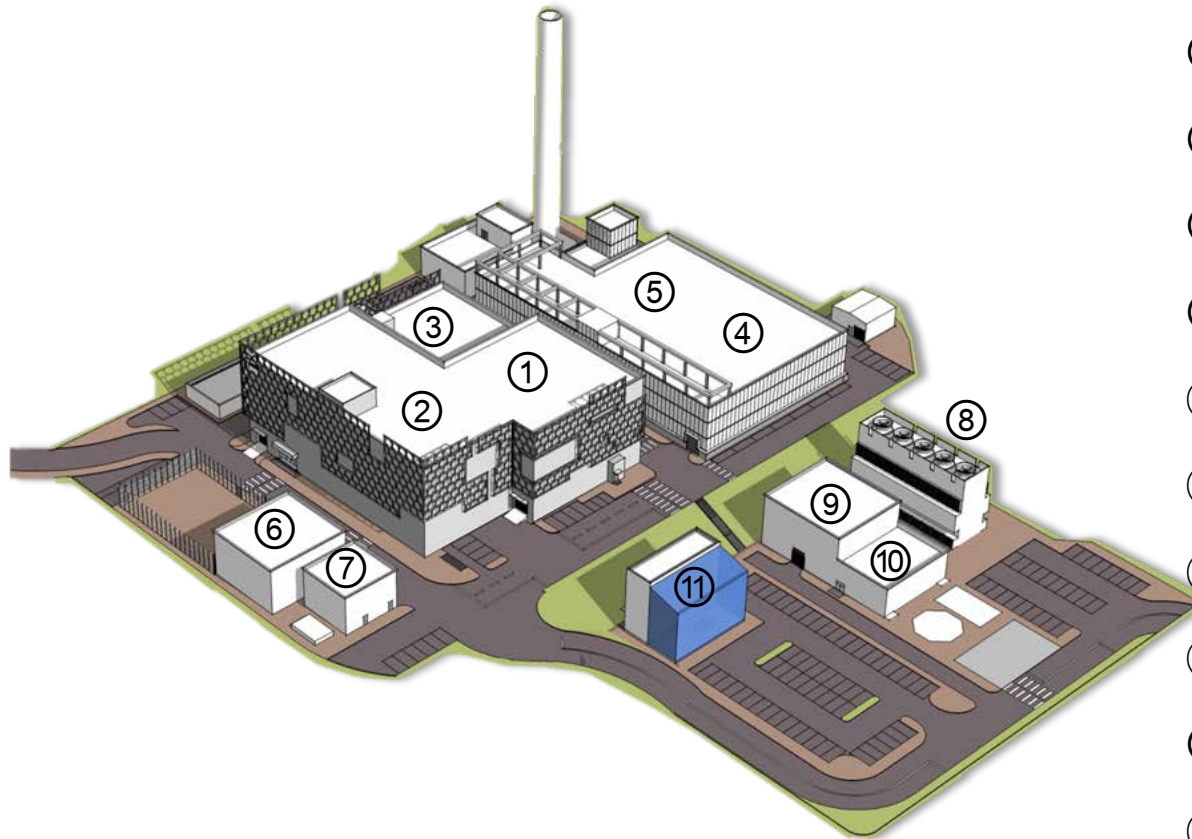
➤ Water Supply(1,200t/day)

# KJRR Specification



Power	15 MW
Type	Open Tank in Pool type
Max. thermal neutron flux (n/cm <sup>2</sup> s)	> 3.0x10 <sup>14</sup> (Central Trap)
Operation day	~300/year
Design Life Time	50 year
LEU Fuel	U-7Mo plate type (U loading : 6.5, 8.0 g/cc)
LEU FM Target	UAlx plate type (2.6 g/cc)
Reflector	Be and Gr
Coolant and flow direction in operation	H <sub>2</sub> O, downward forced convection flow
Reactor building	Confinement
Decay heat removal	Safety Residual Heat Removal System
Robust Design, Aircraft Crash, 0.3g SSE, Digital I&C, Cyber Security, etc.	

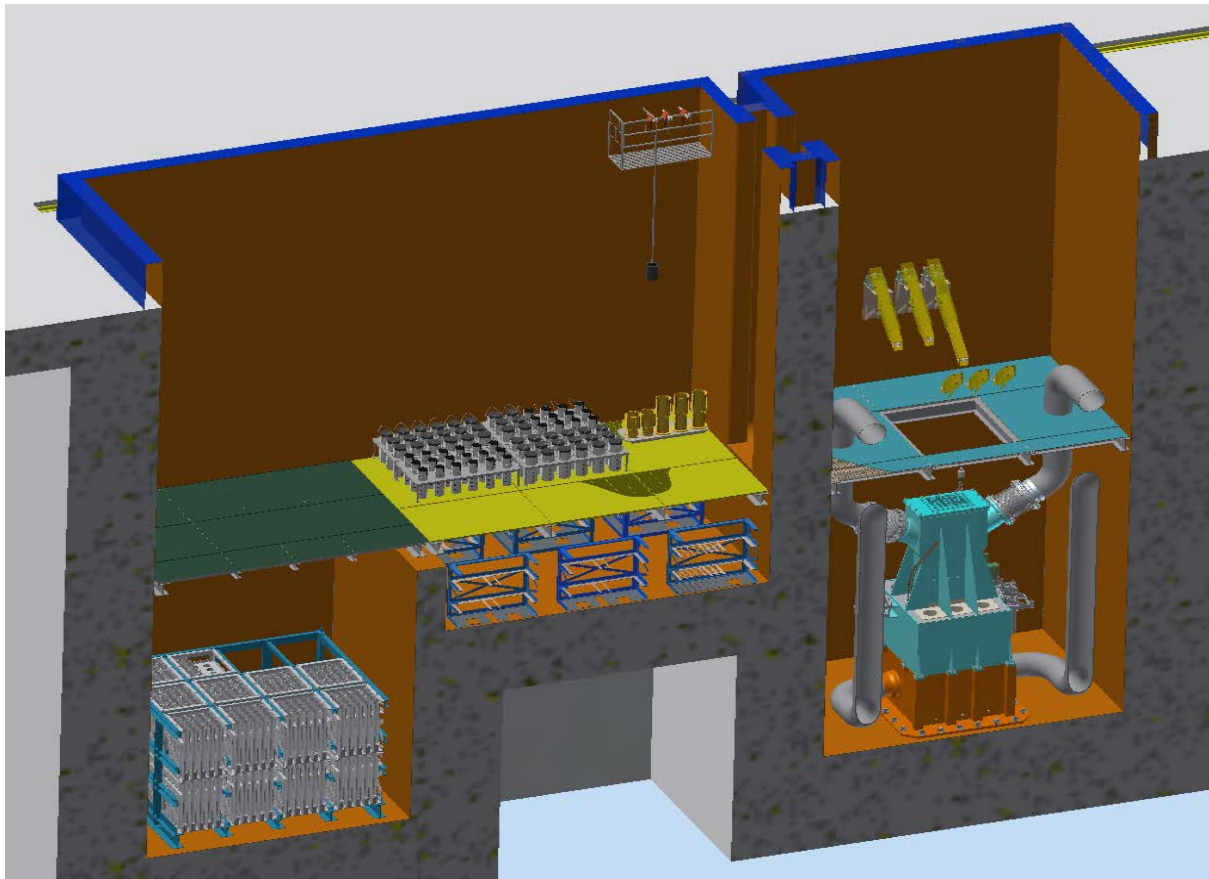
# Site Plot Plan



- ① Reactor Building
- ② Utility Building
- ③ FM Building
- ④ RIPF Building
- ⑤ RWTF Building
- ⑥ Electric Building
- ⑦ DG Building
- ⑧ Cooling Tower
- ⑨ Demi-water System
- ⑩ Pump House
- ⑪ Natural Evaporation Building

## 2. KJRR 설계특성

- Open Pool Type Research Reactor
  - Downward Flow



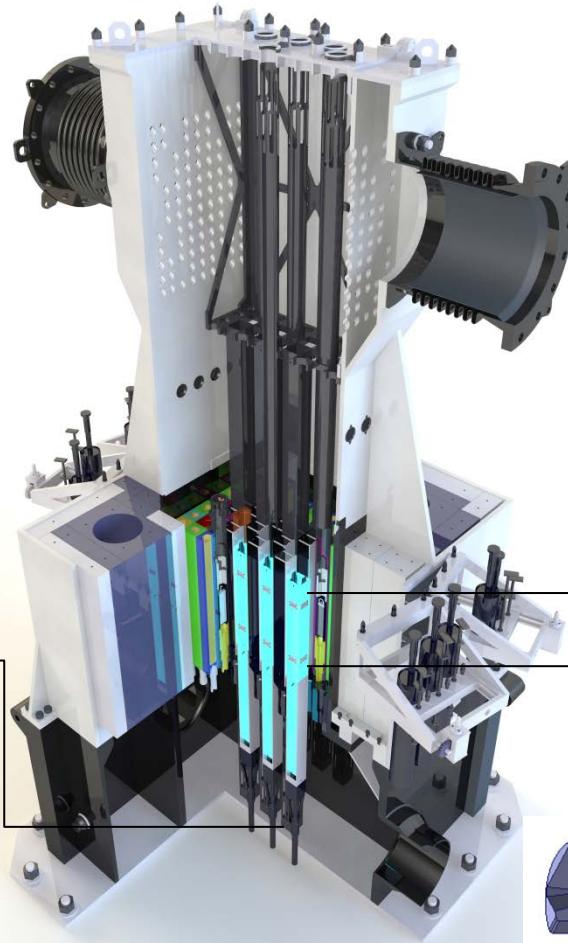
Spent Fuel Pool

Service Pool

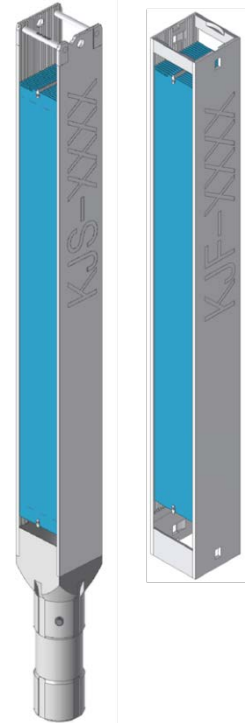
Reactor Pool

# Reactor Structure

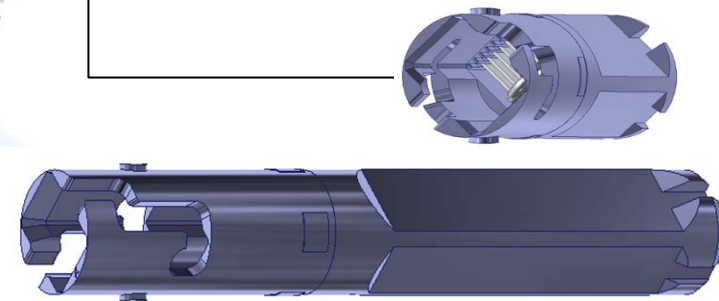
Reactor Structure



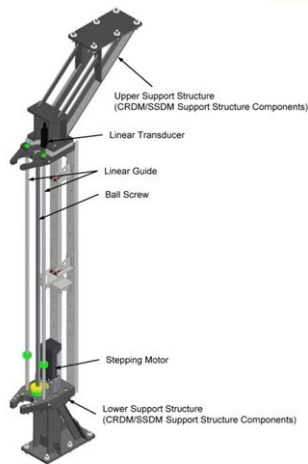
U-Mo Fuel



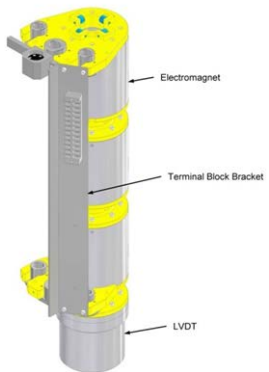
Fission Moly Target



Bottom Mounted CRDM



CRDM Drive Assembly

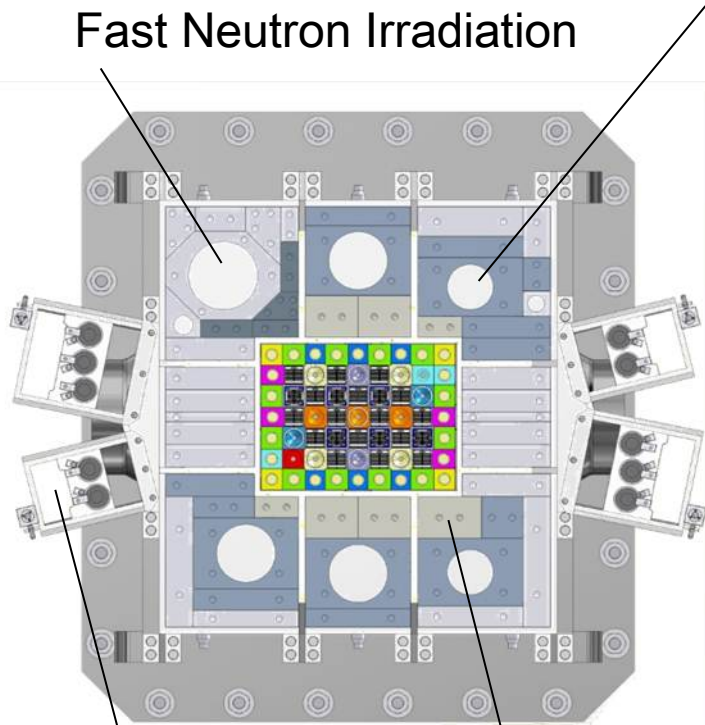


Electromagnet Assembly

# Core Design

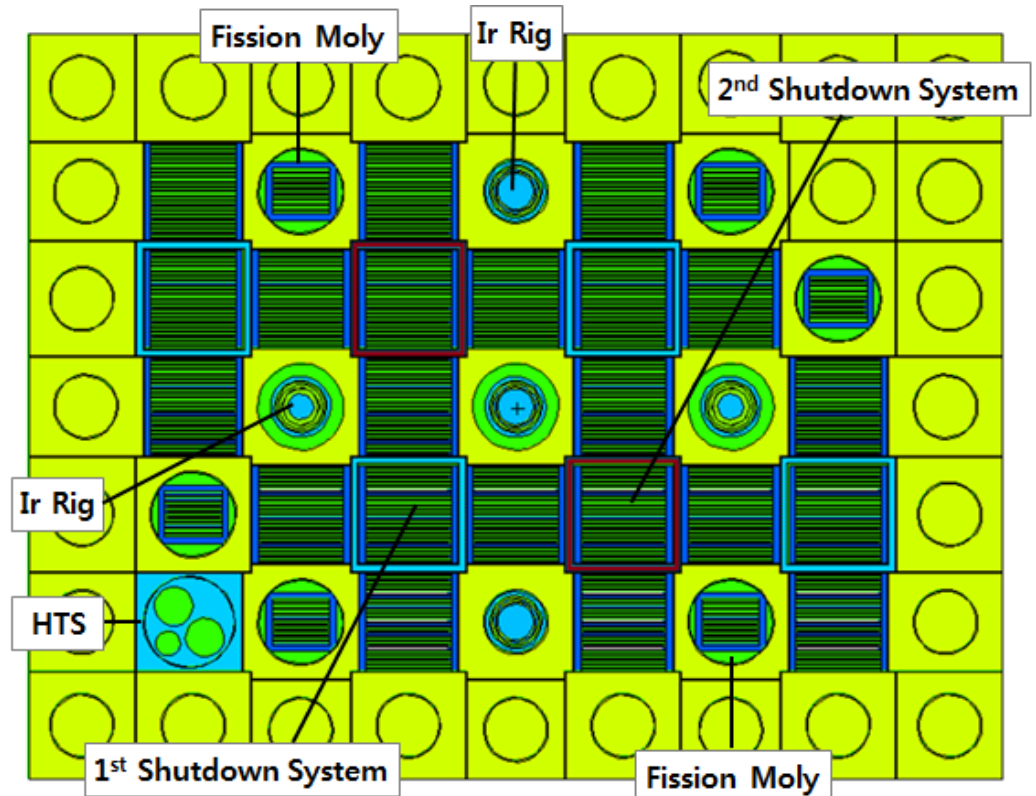
Neutron Transmutation Doping

Fast Neutron Irradiation



Neutron Detector

Be Reflector Block



# U-Mo Fuel



연구용원자로 (Research Reactor)  
More Neutron Flux ← Compact Core  
고농축 우라늄 사용 (93%)



핵 비확산 : HEU 연료 → LEU 연료  
(93%  $U^{235}$ ) (20%  $U^{235}$ )  
1.6 g U/cc

RERTR  
Program



$U_3Si_2$  - Al Dispersed Fuel  
(4.8 g U/cc)

High Flux, High Performance Reactor  
- ATR, HFIR, MIT, MURR, NBSR  
- ILL, JHR, BR-2, FRM-II, MIR



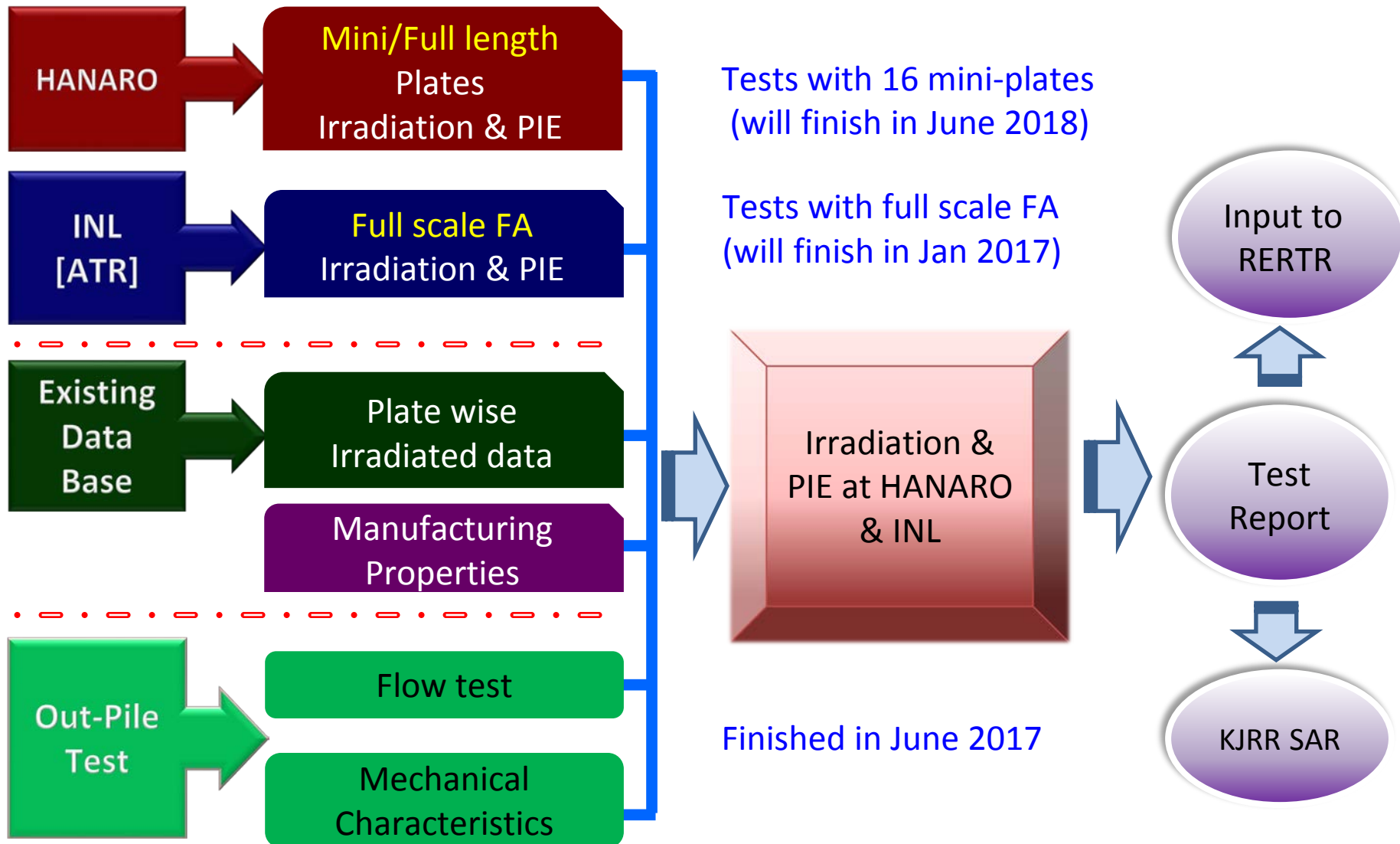
$U_3Si_2$  - Al Dispersed Fuel로  
LEU 전환 불가능

U-Mo 분산 연료 (8 ~ 9 g U/cc)  
U-Mo Monolithic 연료 (~16 g U/cc)



KJRR : The 1<sup>st</sup> U-Mo Fuel RR  
- U7%Mo-Al5%Si dispersed : 8 g U/cc  
- 독자적 U-Mo분말제조기술

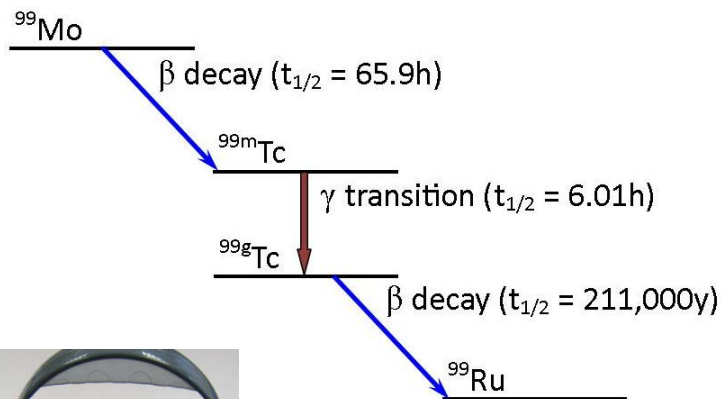
# U-Mo Fuel Qualification



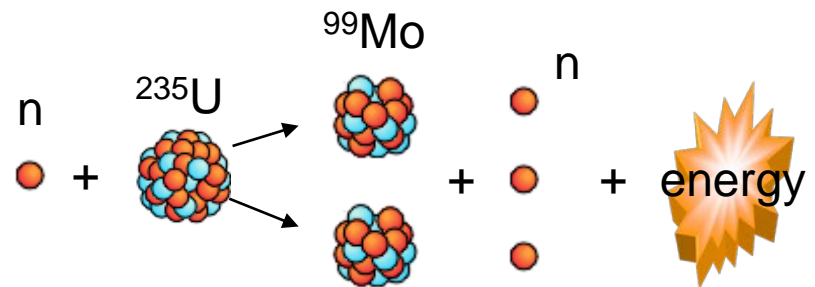
# Fission Mo 생산

- Tc-99m : radioisotope for diagnosis
- Production of Mo-99

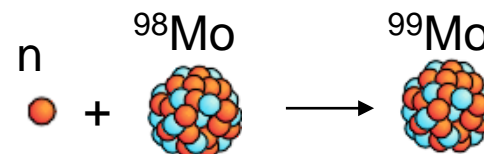
## Mo-99/Tc-99m generators



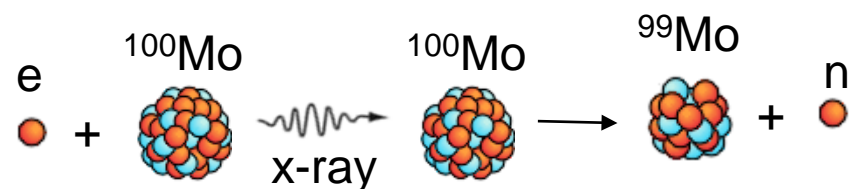
## Nuclear Fission : 65,000 Ci/g



## Neutron Activation : 3 ~ 42 Ci/g



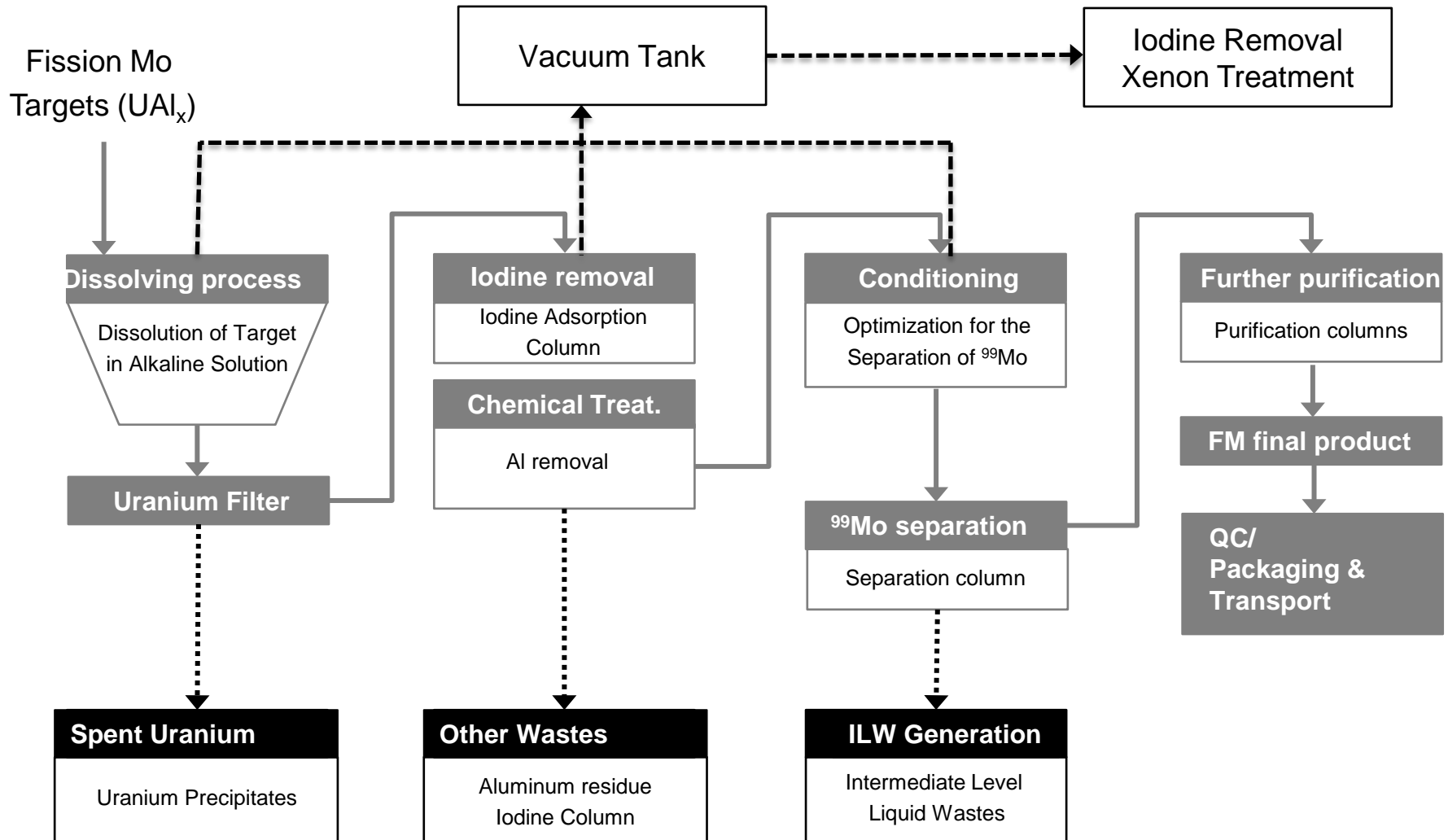
## Particle Accelerator : 3 ~ 42 Ci/g



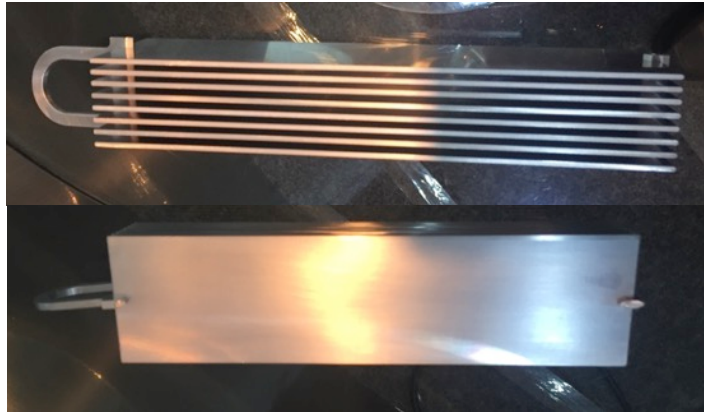
# Fission Mo 생산용 연구용원자로

Type	Reactor	Location	Target/Fuel	Year
Large-scale producers	NRU	Canada	HEU/LEU	1957
	BR2	Belgium	HEU/HEU	1961
	SAFARI-1	South Africa	LEU/LEU	1965
	HFR	the Netherlands	HEU/LEU	1961
	Osiris reactor	France	LEU/HEU	1966
Regional producers	OPAL	Australia	LEU/LEU	2006
	MPR RSG-GAS <sup>[42]</sup>	Indonesia	LEU/LEU	1987
	RA-3 <sup>[43]</sup>	Argentina	LEU/LEU	1961
	MARIA	Poland	HEU/HEU	1974
	LVR-15 <sup>[44]</sup>	Czech Republic	HEU/HEU	1957

# Fission Mo Production Process Scheme



# Fission Mo 생산공정 개발



~400Ci용 LEU 표적 집합체



생산실증용 FM 공정장치

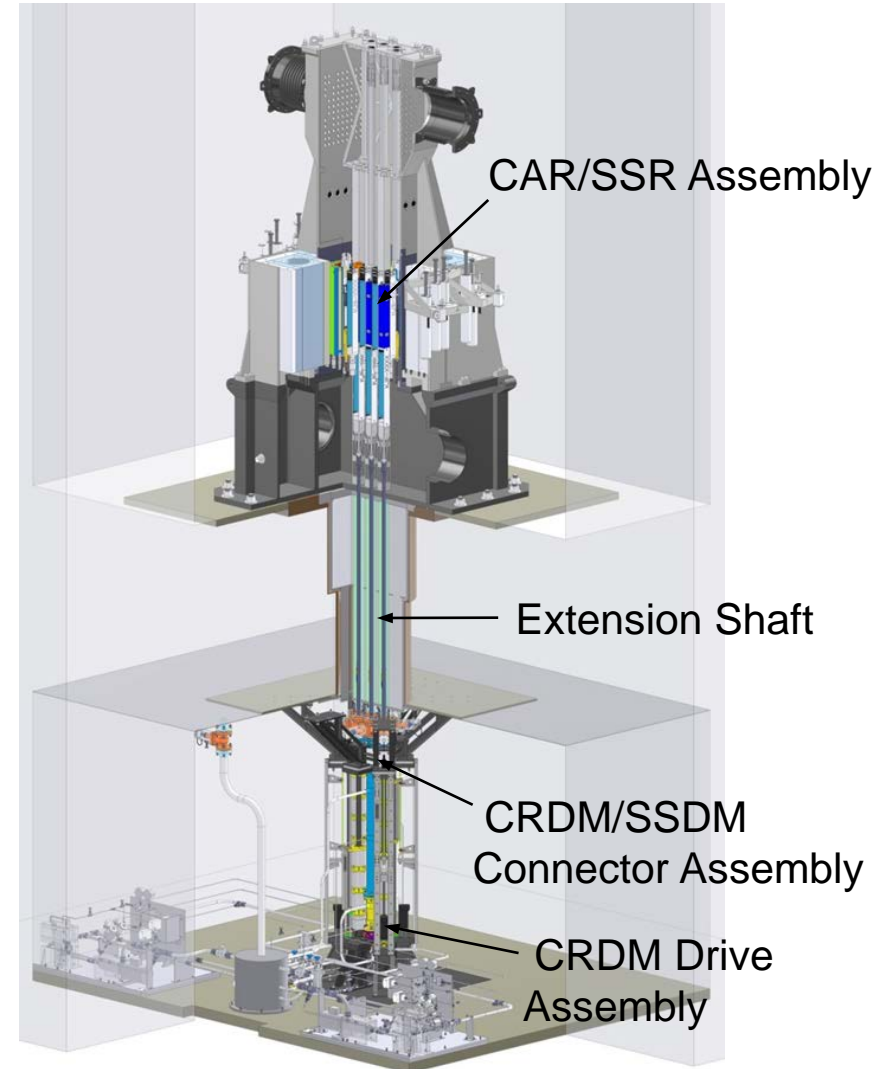
공학기술 검증용 Full Scale 생산 장치

# Bottom Mounted CRDM

- ❑ Easy-access to Rx. Top Area
- ❑ Qualification Tests
  - Performance & Endurance Test
  - Seismic Test



CRDM Drive Assembly



# ESF (Engineered Safety Features)

## ❑ KJRR ESF

- Safety Residual Heat Removal System (원자로 정지 후 30분 운전)
- Syphon Breaker, Isolation Damper

## ❑ KJRR Safety Characteristics

	KJRR (연구용 원자로)	APR1400 (발전용 원자로)
출력/목적	15 MWth (동위원소 생산)	4,500MWth (전기 생산)
형 태	Open Tank in Pool Type	PWR (가압경수로)
운 전 조 건	저온, 저압 (38°C, 1 bar)	고온, 고압 (300°C, 155 bar)
안 전 계 통	거의 전무 중대사고 배제	수 많은 안전계통 및 중대사고 대처설비 설치
부 지	도심 인근 위치 (사용자 편이 고려)	저밀도 인구지역에 위치

### 3. 맺음말

- 동위원소 생산 및 산업용 반도체 생산
  - 의료용 및 산업용 동위원소 생산 : Fission Moly, Ir-192, I-131
  - 산업용 반도체 생산 : Neutron Transmutation Doping
  - 의료 및 산업용 방사성동위원소의 국내공급 안정화와 수출
  
- U-Mo 핵연료 : The 1<sup>st</sup> Application to RR in the world
  - 고출력밀도 노심, 장주기 운전, 사용 후 연료 폐기물 저감
  - KAERI의 독자적 U-Mo분말제조기술 활용
  - 기장연구로를 통한 U-Mo 핵연료 검증 → 연구로 핵연료 기술수출
  
- 핵심기술 실증을 통한 연구로 수출 경쟁력 강화
  - 하향 유로
  - 하부구동 CRDM/SSDM

한국원자력학회 2016년 추계학술대회 Workshop

# 연구로 수출 현황과 전망

2016. 10. 26

류정수, 박철, 이병철, 김영기  
한국원자력연구원



Korea Atomic Energy  
Research Institute

1 연구로 수출 현황

2 요르단 연구로(JRTR) 건설사업

3 네덜란드 OYSTER 사업

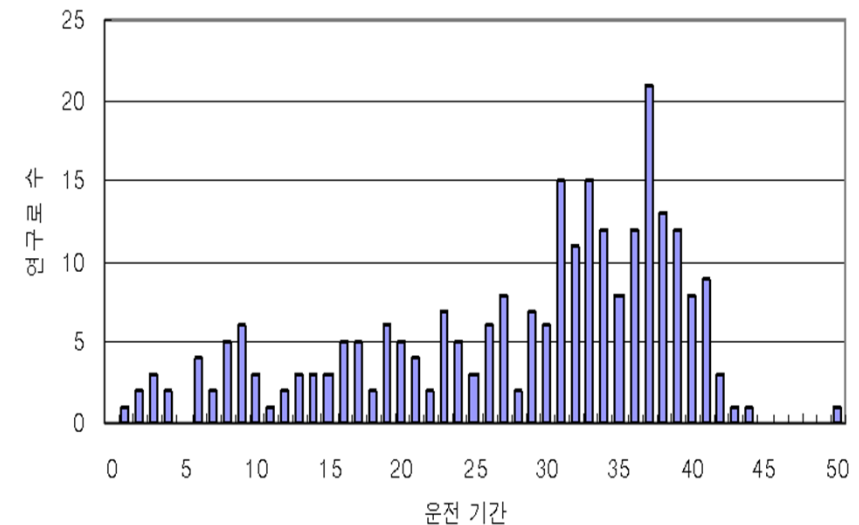
4 네덜란드 PALLAS 사업

5 연구로 수출 전망

# 1. 연구로 수출 현황

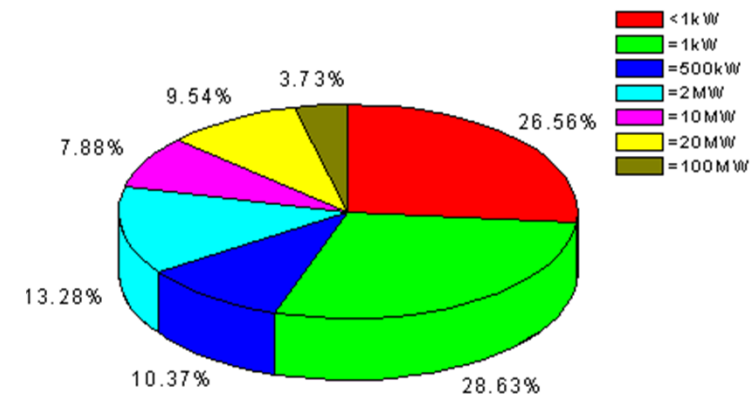
## ● 세계 연구로 현황(IAEA RR DB, 2015.12.)

- ❖ 현재 운전중인 246기의 연구로 중  
60%가 40년 이상,  
80%가 20년 이상 운전
- ❖ 250 kW 이상 연구로는 110여 기



## ● 신규 및 대체 연구로 수요 예상

- ❖ 노후화에 따른 점진적 대체 수요
- ❖ 발전로 도입 및 방사선 융합기술 확대에 따른 신규 수요



## ● 선진국 투자 현황

- ▶ 선진국의 상용원전 수출 집중 및 연구로 관심 미흡 분위기 변화
- ▶ 프랑스, 러시아, 중국 등 선진국의 연구로 시장 개입
- ▶ 연구로 설계, 건설, 사업관리 능력 국가
  - ✓ 프랑스, AREVA : 일괄체계 수출, JHR(100MW) 건설중
  - ✓ 아르헨티나, INVAP : 일괄체계 수출, ETRR(22MW), OPAL(20MW), RA-10(30MW)
  - ✓ 러시아 : 자국 연구로 설계건설 및 베트남 등 연구로 수출
  - ✓ 일본 : 자국 연구로 설계건설 경험 풍부
  - ✓ 중국 : 연구로 종합 설계능력, 요르단 임계로 수출
  - ✓ 캐나다 : 능력은 있으나 MAPLE 가동 실패, MO 생산을 가속기 생산 전환
- ▶ 현재까지는 아르헨티나(INVAP)가 연구로 시장 주도
- ▶ 중국, 러시아는 개발도상국에 정치, 경제, 외교적으로 영향을 미침

## ● 연구로 시장

- ▶ 원자력발전소와 대비하여 수요가 간헐적이고 건설비도 낮음(1기당 2억~10억불)
- ▶ 표준화보다는 수요자 요구에 맞춤형
- ▶ 종합 설계 건설하는 연구로 전문 공급업체 적음
- ▶ 2011년 일본 후쿠시마 원전 사고 여파로 반원전 정책이었으나, 원자력 정책 추진
- ▶ 기존 연구로의 노후설비 개선, 연구로용 핵연료, 연구로 이용시설, 등 파생기술
- ▶ 수요가 존재하는 **미래 틈새시장**

## ● 우리나라 연구로 기술

- ▶ 하나로 설계, 건설, 운영 기술 경험을 기반
- ▶ 연구로 미확보 기술 개발과 실증을 통해 기술 경쟁력 강화
- ▶ 적극적인 연구로 기술 및 사업 경험을 축적
- ▶ 요르단 연구로가 준공되면 세계 연구로 시장의 주 공급국으로 도약

# 연구로 기술수출 현황

사업명	대상국 (기관)	사업기간	사업내용	비고
요르단 연구로 (JRTR)	요르단 (JAEC)	'10.3.~16.12. (진행중)	교육/훈련 및 다목적 연구로 건설 (16년12월초 준공식)	
네덜란드 연구로 개조사업 (OYSTER)	네덜란드 (TU Delft)	'14.8.~19.4. (진행중)	원자로 시설개조 및 냉중성자 연구시설 설치	
말레이시아 연구로 개조사업 (ReDICS)	말레이시아 (MNA)	'12.6.~14.3. (종료)	노후 연구로 제어실 디지털식 개조	
태국 연구로 개조사업	태국 (TINT)	'10.6.~16.2. (종료)	노후 연구로 제어실 디지털식 개조 (자문)	
그리스 연구로 개조사업	그리스 (DEMOKRITOS)	'09.8.~11.5. (종료)	일차냉각계통 교체 설계/해석/자문	

## **2. 요르단 연구로(JRTR) 건설사업**



- 국가명 : The Hashemite Kingdom of Jordan
- 면 적 : 89,213 km<sup>2</sup> (한반도 남한보다 조금 작음)
- 기 후 : 반 지중해성 기후  
(여름에 덥고 건조하며 겨울에 춥고 비가 옵니다)
- 인 구 : 570 만명
- 주요도시  
Amman (217만명), Irbid (100만명), Zarqa (83만명),  
Balqa (38만명) 등 (Ramtha는 Irbid 인근)
- 종 교 : 이슬람교 (수니파 92%), 가톨릭 등 (8%)
- 입헌군주국 (압둘라 II 국왕 1999/2/7 취임)
- 거래환 : JD (Jordan Dinar)



## 사업명

요르단 연구 및 교육용 원자로 건설 사업  
Construction of Jordan Research and Training Reactor (JRTR)

## 사업목적

- 요르단 원자력 프로그램의 첫 단계로서 Nuclear Science & Technology Center의 중심 시설이 될 연구용원자로를 건설
- 원자력 인력양성과 중성자 조사[照射] 서비스 제공

## 사업범위

- JRTR 설계 및 건설  
[원자로, 원자로 건물 및 부속건물, 동위원소 생산시설, 교육훈련센터]
- 운전원 등 교육훈련

## 사업실시기관

요르단 원자력위원회 [Jordan Atomic Energy Commission: JAEC]

## 주 계약자

한국원자력연구원-(주)대우건설 컨소시엄

## 예정사업기간

2010. 3. 1. ~ 2016. 12. 15.  
[착수 후 70개월, 6개월의 Grace Period]

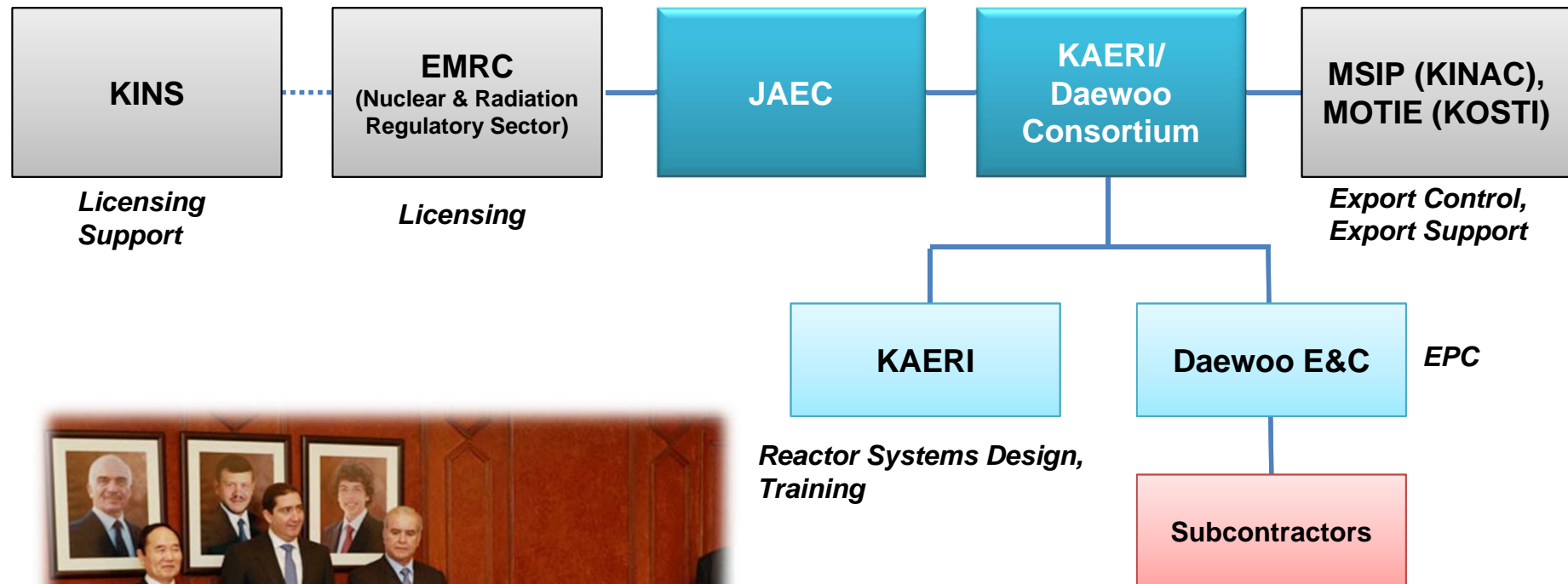
## 부지

요르단 과학기술대학교(JUST) 캠퍼스 (Irbid 지역)

- |               |                     |
|---------------|---------------------|
| 2009. 1. 15.  | • JAEC, 입찰안내서 발행    |
| 2009. 5. 17.  | • 기술 및 사업비 제안서 제출   |
| 2009. 12. 4.  | • KDC, 우선협상 대상자로 선정 |
| 2010. 3. 30.  | • 계약 완료             |
| 2010. 8. 1.   | • 사업 공식 착수          |
| 2011. 7. 31.  | • 건설허가 신청           |
| 2013. 8. 15.  | • 건설허가 획득           |
| 2014. 12. 15. | • 운영허가 신청           |
| 2016. 4. 25   | • 핵연료 장전후 최초 임계 달성  |
| 2016. 12. 7.  | • 준공 및 인계           |



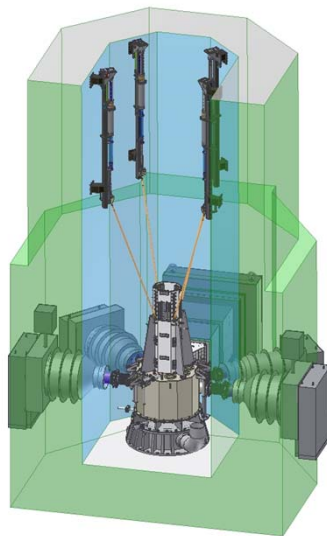
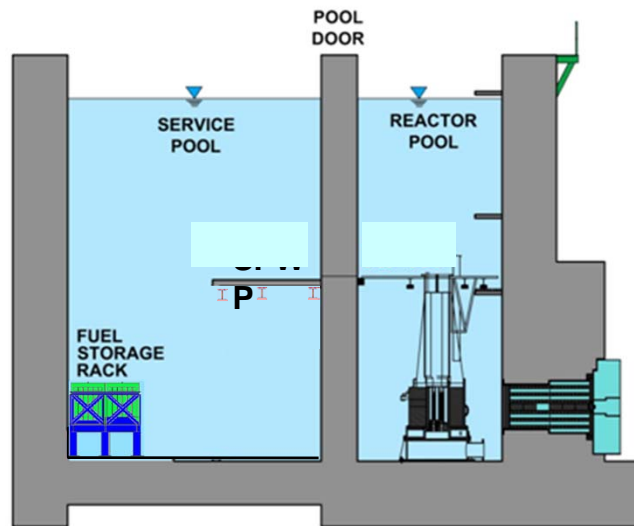
# JRTR – 사업 추진 체계



# JRTR – 주요 설계 사양

원 자 로 형 태	개방수조형(Open-Tank-in-Pool )
열 출 력(MW)	5 (10 MW로 출력증강 가능)
최대 열중성자속 (n/cm <sup>2</sup> ·s)	1.5×10 <sup>14</sup> (노심 영역) 0.4×10 <sup>14</sup> (반사체 영역)
핵 연 료	평판형; 19.75% 농축, U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>
핵 연 료 장 전	18개의 표준 핵연료집합체, 7kg의 U <sup>235</sup> (평형 노심)
냉각재/감속재 및 냉각 방식	경수, 하향 강제대류 냉각
반 사 체	베릴륨 (Be) 및 중수 (D <sub>2</sub> O)
활 용	<p>다목적</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 중성자빔 활용 (중성자 과학, 중성자 분광학 등)</li> <li>- 중성자 조사 서비스 (방사성동위원소생산, 중성자 방사화분석, 중성자 핵변환도핑 등)</li> </ul> <p>활용 시설:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4개의 빔포트 (Beam Port)</li> <li>- 1개의 열중성자주 (Thermal Column)</li> <li>- 22개 이상의 조사공 (Irradiation Hole)</li> </ul>

# JRTR — 원자로 설계



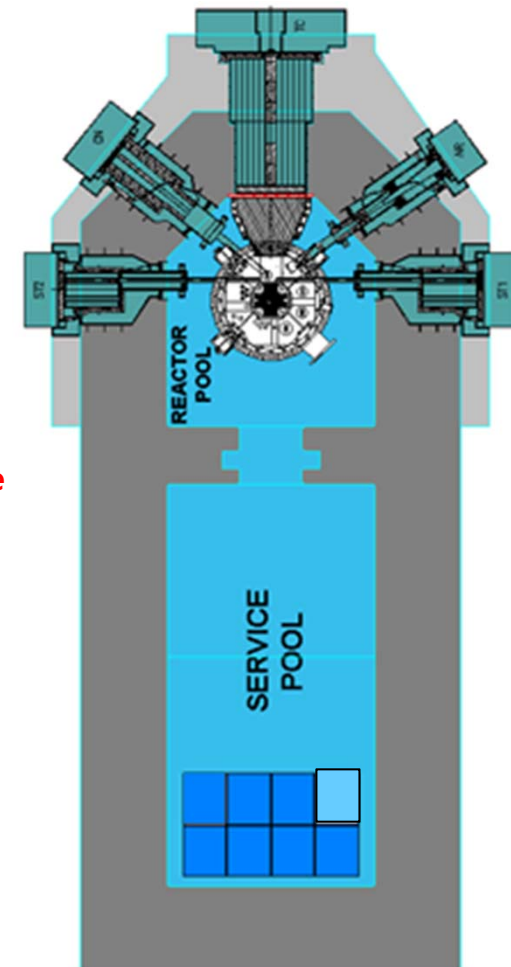
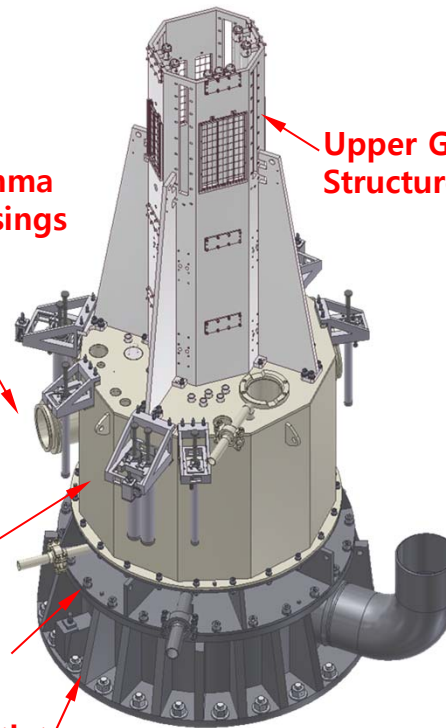
Neutron/Gamma  
Detector Housings

Upper Guide  
Structure

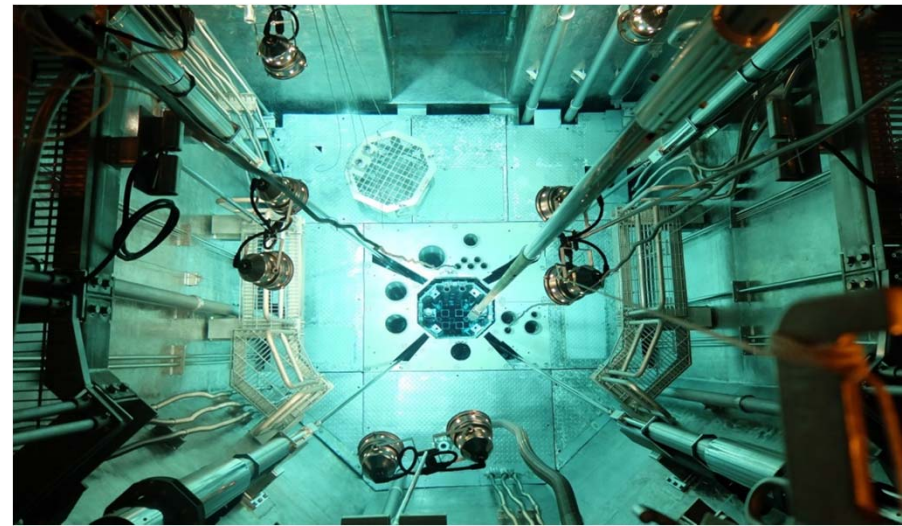
Heavy Water  
Vessel

Grid Plate

Outlet  
Plenum



# JRTR — 건설공사 현황 (99% 완료, 2016.10.)



▷ 원자력 연구개발 50년만의 쾌거

▷ 우리나라 최초의 원자력시스템 일괄 수출

▷ 세계 연구로 시장으로의 진입 활성화

▷ 우리나라 원자력 기술수준의 세계화, 공급국 도약

### **3. 네덜란드 OYSTER 사업**

## ● 사업내용

- 네덜란드 델프트 대학의 원자로연구소(RID\*)에서 운영중인  
연구용 원자로( HOR\*\*)에 냉중성자 생산설비 구축

\* RID: Reactor Institute Delft, \*\* HOR: Hoger Onderwijs Reactor

## ● 사업구조

- 1단계(Phase1): 기본설계
- 2단계(Phase2): 상세설계, 구매,  
시공/설치, 시운전

※ 현재 1단계사업을 완료하고,  
2단계사업수행을 위한 계약 준비중



[RID site 전경]

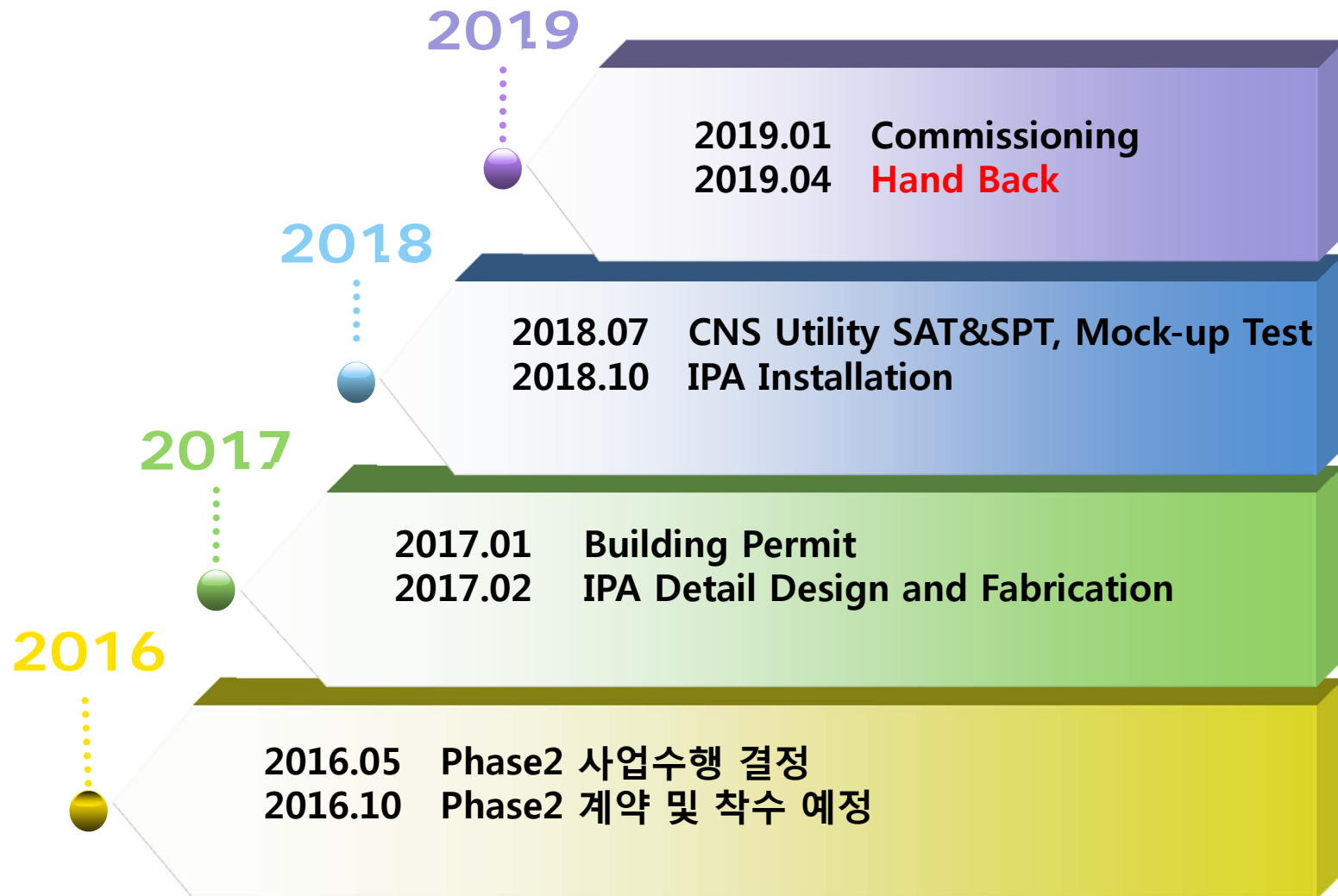
# OYSTER 사업 경과



Contract Signing Ceremony (3 Nov. 2014)

OYSTER 사업계약서 서명식

# OYSTER 사업 추진계획



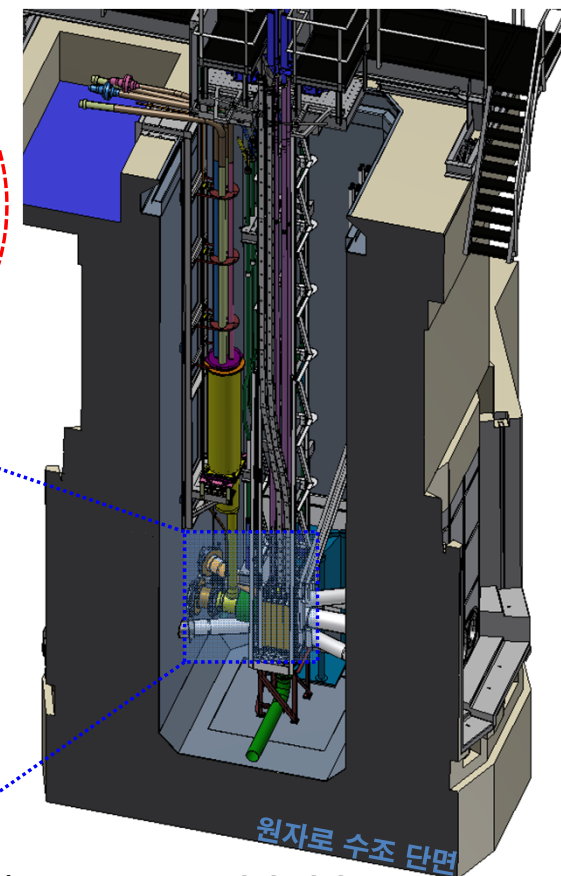
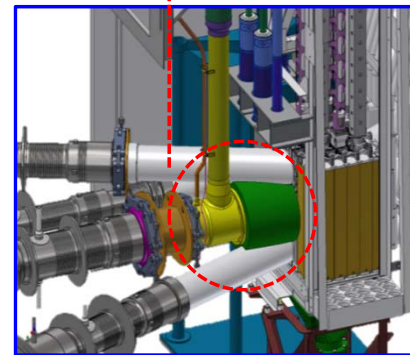
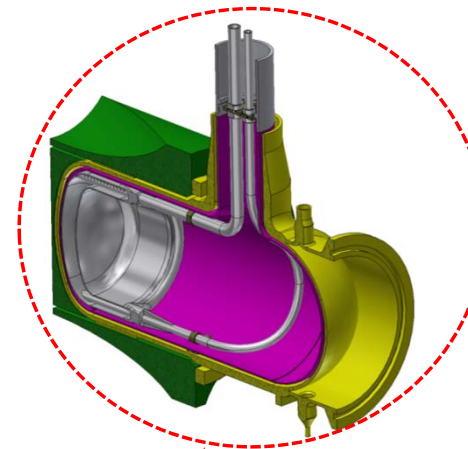
**2014.08 ~ 2015.10** Phase1: Basic Engineering(기본설계) 완료

# OYSTER - 기본설계 (1단계)

## ● 냉중성자원 수조내기기(CNS-IPA) 기본설계

## ● 냉중성자원 시설계통 기본설계

- 헬륨냉동시스템
- 수소시스템
- 진공시스템
- 가스블랭킷시스템
- 계측제어시스템



CNS-IPA(In-Pool Assembly)

CNS-IPA 설치 예상도

원자로 수조 단면

# OYSTER 사업의 의의

- ▶ 역사상 처음으로 유럽지역에 원자력 기술을 수출
- ▶ 정부의 연구개발투자로서 세계 수준의 기술을 개발, 이를 다시 해외에 수출하는 국가 R&D 투자 선순환 구조의 모범 사례
- ▶ 독자적인 우수한 기술력을 입찰과정에서 인정받음
- ▶ PALLAS 사업 국제입찰에서도 유리한 고지를 선점

## 4. 네덜란드 PALLAS 사업

## □ 사업 개요

- ❖ 1962년부터 가동중인 노후된 기존 연구로(HFR, 45 MW)를 교체하기 위해 국제입찰 진행 (약 30MW)

※ '07.9월 1차 입찰 시작되어 아르헨티나 INVAP社를 우선협상대상자로 선정('09.6월)하였으나, 건설예산 미확보로 사업 중단을 선언('10년1월)한 후 '14년부터 재추진

## □ 현황 및 경과

- ❖ 한국 컨소시엄\* 사전 자격 심사 통과 : '15.10
  - ※ '원자력(연)-현대엔지니어링-현대건설-대우건설
- ❖ 협의 참여요청서(Invitation To Dialogue, ITD) 접수 : '16.02
- ❖ 사용자 요구사항(User Requirement Specification : URS) 접수 : '16.03
- ❖ 발주자 측과의 URS 1차 기술회의 : '16.4.
- ❖ 발주자 측의 요르단 JRTR 현장 실사 : '16.5
- ❖ 발주자 측의 SHEQS 실사단 한국 방문 : '16.6
- ❖ 발주자 측과의 URS 2차 기술회의 : '16.9.27.

## □ 향후 예상 일정

- ❖ 입찰 참여 요청서 (Invitation to Tender, ITT) 발송 : '16.12
- ❖ 입찰제안서 제출 : '17.2
- ❖ 우선협상대상자 선정 및 계약 체결 : '17.7



## 5. 연구로 수출 전망

## ● 세계 연구로 시장전망

- ▶ 약 240여기 운영 연구로 중 60% 이상 40년 경과
- ▶ 신규 연구로 또는 노후화 연구로 **대체수요 30~50기** 예상 (약 20조 원)
- ▶ 노후설비 개선, 핵연료 공급, 실험설비 설치 등 **파생 수요** 발생

## ● 사업화 필요성

- ▶ 기술경쟁력 강화에 따른 적극적 해외시장 개척
- ▶ 미래 틈새시장으로서의 연구로 수출 지속화 추진

## ● 세계 연구로 주 공급국 진입

- ▶ 추진 중 연구로 사업의 성공적 완료
- ▶ 수요국가별 맞춤형 수주전략 준비
- ▶ 연구로 파생수요 개발을 통한 시장 다변화
- ▶ 연구로 수출기반 강화에 따른 경쟁력 제고

# 신규 연구로 수요 전망

사업명	대상국 (기관)	사업일정	사업내용
네덜란드 신규 연구로 건설 (PALLAS)	네덜란드	'15.10~	- 원자로 및 핵심시설 - 입찰제안서 준비중('17.2)
사우디아라비아 신규 연구로 (MPRR)	사우디 (K.A.CARE)	'19~ (추정)	- 20-30 MW급 다목적연구로 - 원자로 및 부대시설 ( '15.2. 공동타당성 조사 완료)
태국 신규 연구로	태국 (TINT)	'19~ (추정)	- 10-30 MW급 다목적연구로 - '16.4(소장) 기술협력/계획
남아공 신규 연구로	남아공	미정	- 20 MW급 다목적연구로 - 상용원자로 입찰 패키지
이집트 신규 연구로	이집트	미정	- 소형연구로(또는 기존 개조) - 상용원자로 입찰 패키지
아제르바이잔 신규 연구로	아제르바이잔 (IRP)	미정	- 20 MW급 다목적연구로 - 사업기획 및 기술협력추진중
터키 신규 연구로	터키 (ITU)	미정	- 30-60 MW급 다목적연구로 - 사업기획 및 기술협력추진중

## ● 설계기술

- ▶ 하나로 자력설계·운영경험, JRTR 및 OYSTER 사업수주를 통한 **기술력 입증**
- ▶ 하부설치 제어봉구동장치, 판형핵연료 제조 등 **핵심기술 실증작업\*** 필요

*\*기장 연구로를 통한 실증작업 진행 중*

## ● 제작기술

- ▶ 상용원전 기기제작사 기술력은 세계 최고 수준이나, 연구로사업 참여 소극적
- ▶ **중소기업** 중심의 영세 수준으로서, 참여기업의 **기기제작 역량 확충** 필요

## ● 사업관리

- ▶ 한수원 등 상용원전 사업관리 주체의 사업관리 능력 충분
- ▶ 연구로사업 주체의 관리능력 부족으로 **사업관리 전문법인 설립** 필요

## ● 가격 경쟁력

- ▶ 기술력과 가격의 Trade-off 관계 극복 필요 (**중소기업 육성 절대적**)

## ● 원자력 R&D

- ▶ 원자력 설계, 해석, 검증시험, 제작, 운영 기술 연구개발로 **종합기술력 달성**
- ▶ 산학연의 강점을 살려 공동협력 활성화가 필요

**감사합니다.**

# 교육 및 훈련을 위한 하이브리드 저출력 연구로 설계

2016. 10. 26.

임 인 철



**한국원자력연구원**

Korea Atomic Energy Research Institute

# 목 차

- 1 배 경
- 2 교육훈련용 저출력 연구로 Review
- 3 하이브리드 저출력 연구로 특성
- 4 결 론



# 배 경



- 한국원자력연구원에서는 2000년대 초반부터 여러 형태의 출력 5 MW 이상의 연구로 모델 개발
  - 베트남 (다목적연구로 타당성 연구, 20 MW, 2004\*)
  - 네덜란드 PALLAS (재료조사, RI 생산, 30~80 MW, 2009)
  - 요르단 JRTR (다목적연구로, 5 MW, 2009)
  - 남아공 DIPR (RI 생산, 12 MW, 2011)
  - 기장 연구로 (RI 생산, NTD, 15 MW, 2012)

\* 개념 설계 제시 년도 기준
- 원자력인프라 구축 목표로 저출력 연구로 건설 수요 존재
- 국내에도 수요 발생 가능 (하나로 30 MW, AGN-201K 10 W)
- 개발 및 운영 연구로에 적용할 수 있는 요소기술 개발 수요 존재

# 연구로 사업 현황(A, Borio, 2015 ICRR)



Phase 1 (Consideration) Total: 17	Phase 2 (Preparatory Work) Total: 6	Phase 3 (Implementation) Total: 8
Azerbaijan	Belarus	Argentina
Bangladesh	Belgium	Brazil
Ethiopia	Bolivia	France
Ghana	The Netherlands	Jordan
Kuwait	USA	India
Lebanon	Vietnam	Republic of Korea
Malaysia		Russian Federation
Mongolia		Saudi Arabia (Low Power RR)
Myanmar		
Tajikistan		
Nigeria		
Saudi Arabia (Multipurpose RR)		
South Africa		
Sudan		
Thailand		
Tunisia		
Republic of Tanzania		

# 연구용원자로 신기술 개발(원자력선진연구센터)

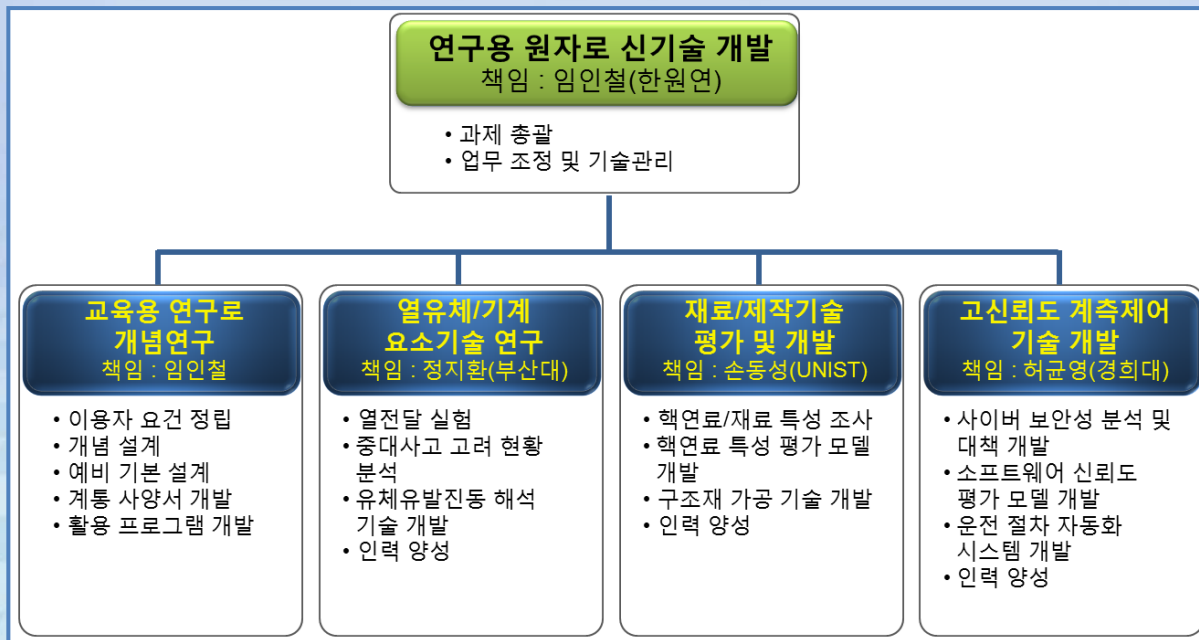


## 연구목표

- 다양한 이용자 욕구를 만족할 수 있는 신개념의 연구용원자로 모델을 개발하여 국내외 저출력 연구로 건설 수요에 대비
- 교육용 연구로 및 중대형 연구로에 적용할 수 있는 요소 기술을 개발하여 한국 연구로 기술의 경쟁력 향상
- 연구로 기술 인력 양성

기간 : 2011.12~2016.10

지원 : 원자력기반확충사업 중 선진연구센터 사업





# **교육훈련용 저출력 연구로 Review**



# 주요 교육훈련용 저출력 연구로 현황



## 주요 공급자 상표 저출력 연구로

이름	페로	가동 중단	운영 중	계
TRIGA	19(8)	7(1)	37(12)	63(21)
AGN	16(16)	1(0)	7(7)	24(23)
ARGONAUT	19(5)	5(0)	5(3)	29(8)
SLOWPOKE or MNSR	7(2)	0(0)	12(1)	19(3)

\*괄호 안의 숫자 : . 대학교에 있는 연구로 수

- AGN, ARGONAUT : 저렴하나 설계 변경이나 출력 증강 어려움

# 저출력 연구로에 대한 의견



## ● 공통 애로사항

- SSC(Structure, System & Component)와 운영 인력의 노화
- 기여도의 감소
- 운영과 활용에 대한 정부 지원 감소
- 원자력 발전 프로그램의 감소로 수요 감소
- 발전로 운전원 훈련에 있어 시뮬레이터 활용 증가

## ● ANS Position Statement, Research and Training Reactors (Revised June 2011)

- 연구로 및 시험로 프로그램을 지속하고 확장을 위한 지속적인 정부 지원의 필요성 강조
- 차세대 연구 및 훈련 시설의 개발과 설치의 필요성을 인식하고 제시하기 위한 노력의 필요성 강조

# 저출력 연구로의 가치와 변화 방향



## ○ 교육 훈련용 저출력 연구로의 가치

- 원자력 발전 도입에 앞서 원자력 발전 도입과 함께 고려할 사항을 이해하는 데(Phase 1) 기여. (2012-12, IAEM TM on Roles of RR)
- RI 생산, 중성자 방사화 분석 및 중성자 영상을 위해서는 연구로의 대체품이 없음.
- 교육훈련용 저출력 연구로 교체 수요 존재

## ○ 혁신을 위해 고려할 사항

- 혁신적 설계
  - 다양한 교육훈련 프로그램에 활용가능 해야 함.
  - 활용에 과도한 비용이 들지 않아야 함.
  - 향후 등장 가능한 활용 분야를 수용할 여지가 있어야 함.
- 고유 안전성의 확보와 운영 중 안전한 운영을 위한 수단 제공

# 혁신적 설계를 위한 고려 사항



- 원자력 공학 교육에 있어 컴퓨터 이용 분석 기술에 대한 교육과 실험적 교육이 균형을 이루는 수단 제공
  - 임계질량 측정, 제어봉 반응도가 측정 등 일반적인 원자로 실험 뿐만 아니라 다양한 실험을 수행할 수 있는 수단이 되어야 함.
  - 핵연료 배열 변화가 핵적 특성에 주는 영향 실험이 하나의 예
  - 노내계측기 사용에 대한 교육도 가능해야 함.
- 고성능 연구로에서 사용하는 기술을 접목하여 저출력 연구로에서 중성자 영상법 활용을 위한 중성자속 최대화 노력 시도 필요
- 핵연료 비용 최소화 필요
- 운영비 확보에 도움이 될 중성자 방사화분석 활용을 위한 시설 비중있게 고려 필요



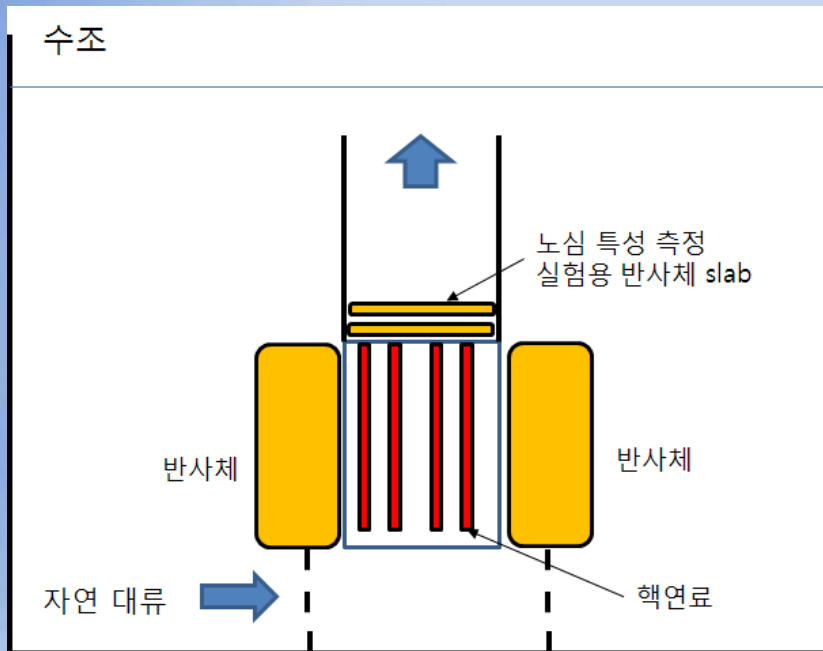
# **하이브리드 저출력 연구로 특성 (Hybrid Low-Power RR)**

# 설계 요구 사항

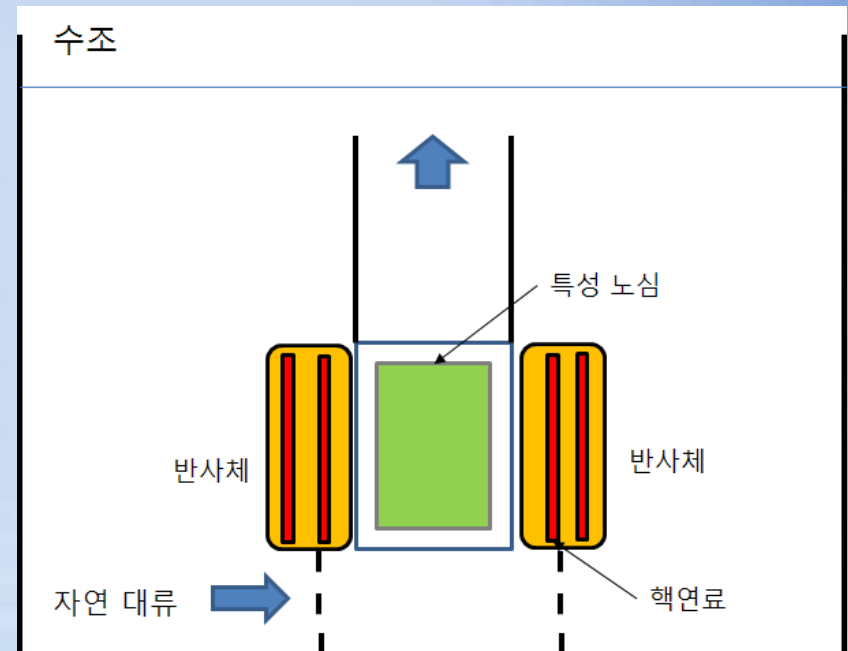


- Utilization (Hybrid Concept)
  - To provide irradiation holes for NAA
  - To provide neutron imaging capability(Optional)
  - To accommodate Rx experiments in normal steady operation
  - To accommodate Rx experiments in sub-critical mode
  
- Safety Characteristics
  - Large negative power coefficient
  - Cooling by natural circulation of pool water
  
- Economy
  - No fuel exchange in 20 years

# 하이브리드 연구로 개념 구상



정상 운전 모드



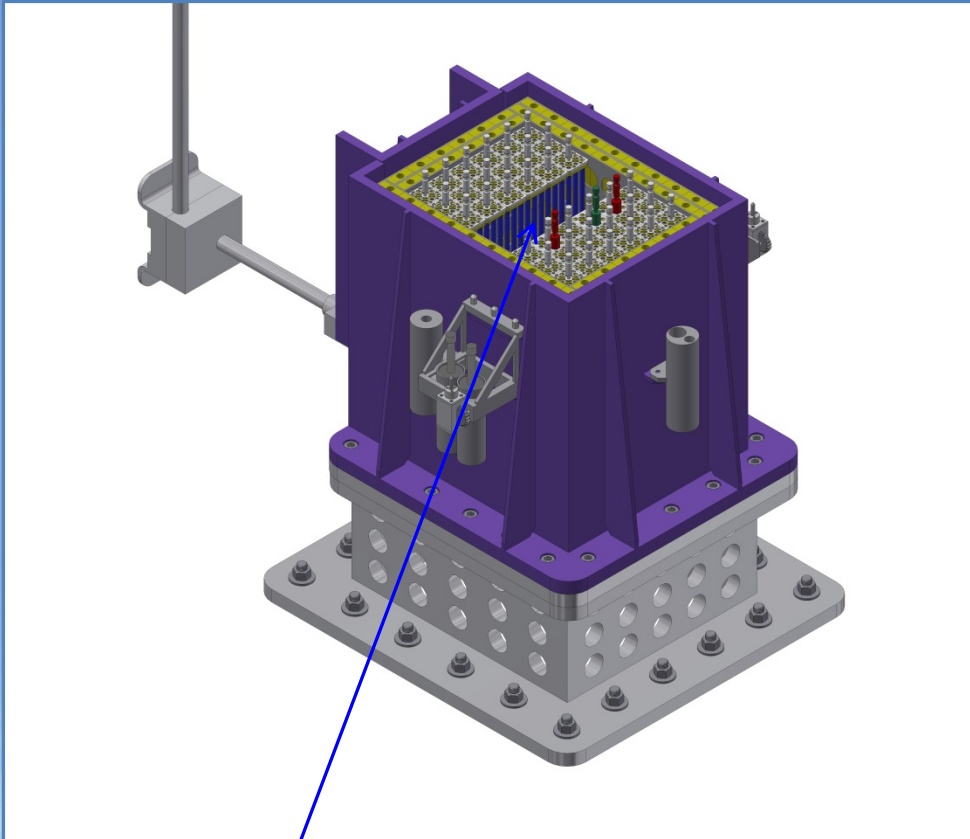
미임계 실험 모드

# 노심 및 핵연료 특성

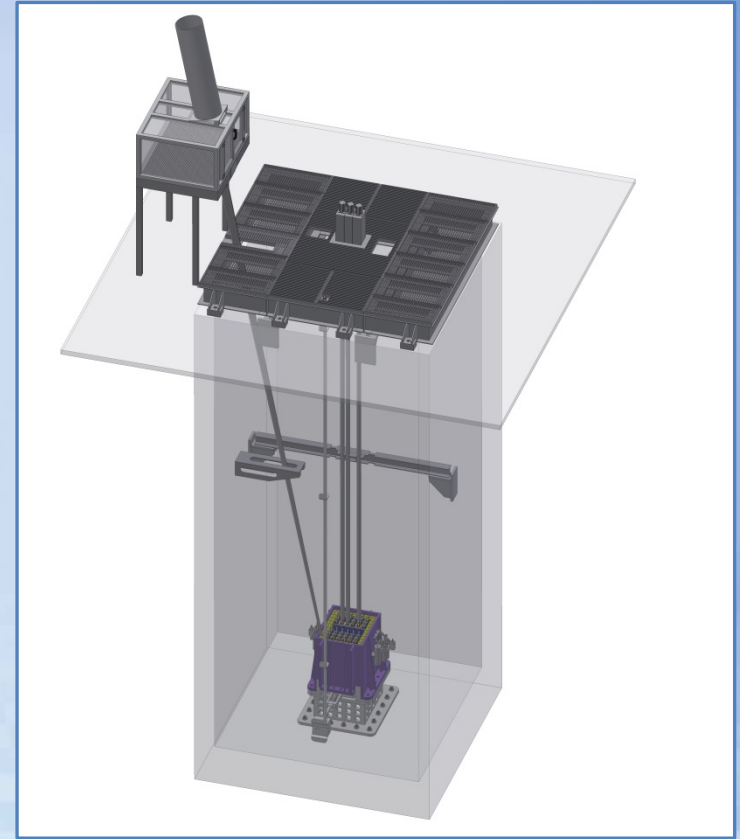


- Core
  - Power : 70 kW
  - Negative power coefficient (Power defect : -1.54 mk from CZP to HFP)
  - Dimension : 32.4 x 32.4 x 32 cm
- Fuel :  $\text{UO}_2$  in Zr clad
  - Maximization of temperature increase by power increase
  - Enrichment : 5%
  - Well proved
- Compensation of the reactivity decrease due to fuel burn-up by the addition of graphite reflector
- Two shutdown rod and one control rod
  - $\text{B}_4\text{C}$  Powder in inconel tube
  - Shutdown margin : 12 mk
- Split Core Mode
  - To provide an experimental region at the center of core (32.4 x 10.8 cm)
  - To accommodate experiments at subcritical condition

# 원자로 구조물과 수조

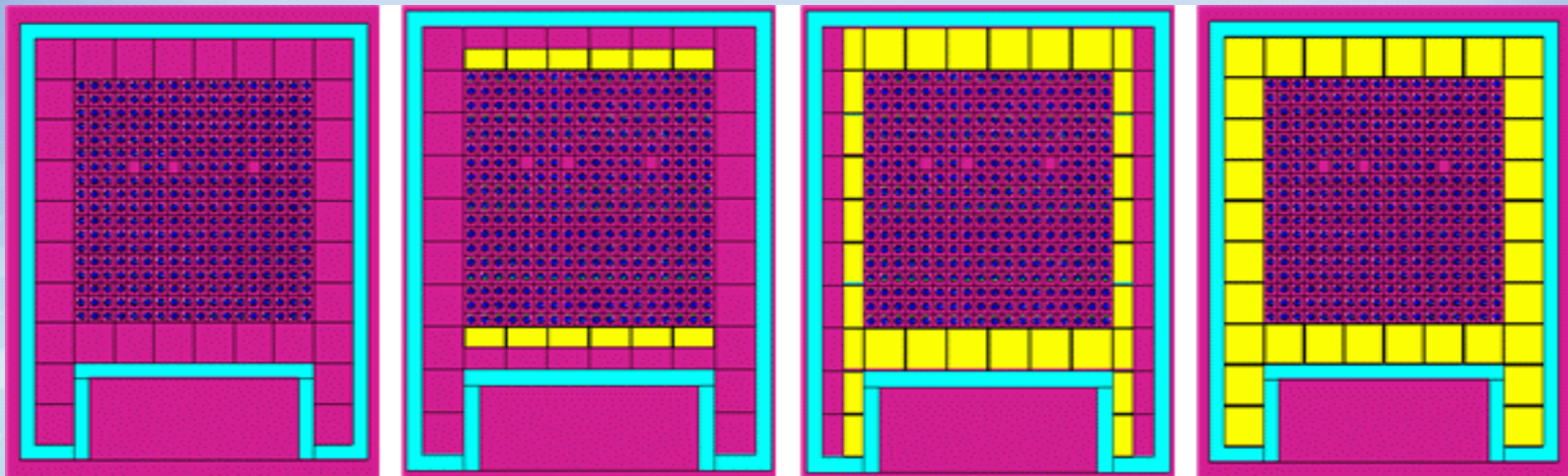
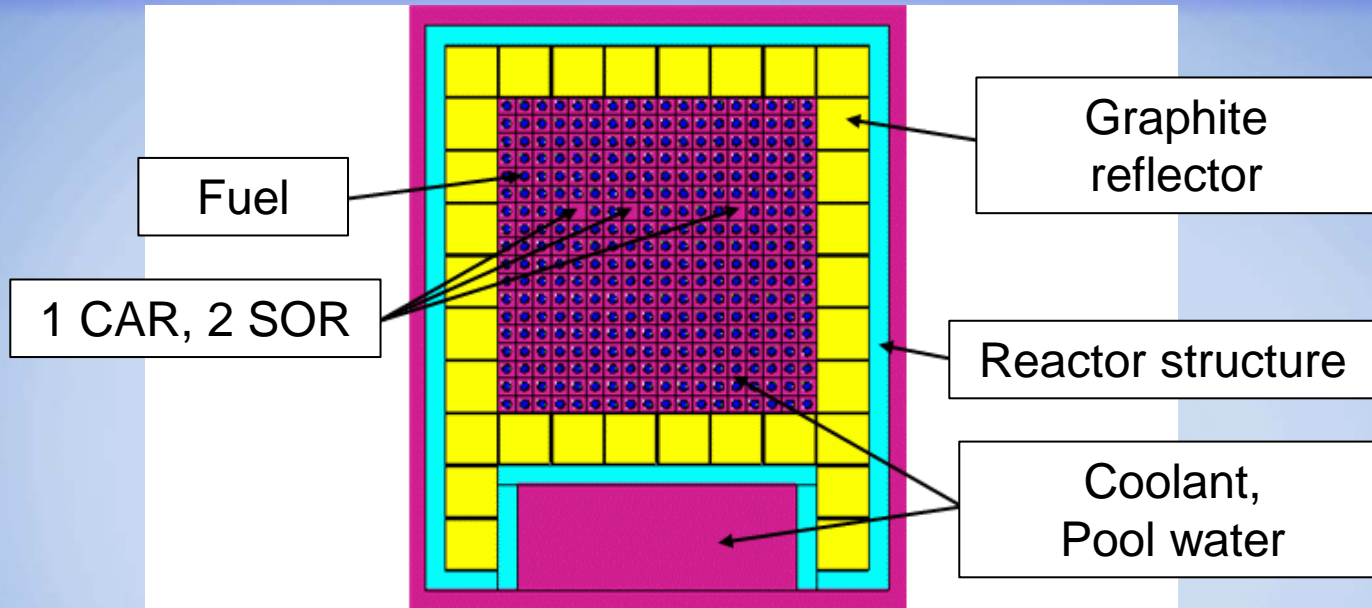


(32.4 x 10.8 cm)



Pool : 2m x 2m x 5m(WxHxD)

# 반사체를 이용한 반응도 감소 보상

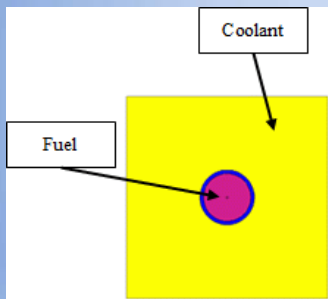


# 중앙 실험 공간에서의 중성자 스펙트럼



## ○ Infinite array of fuel with $H_2O$ coolant

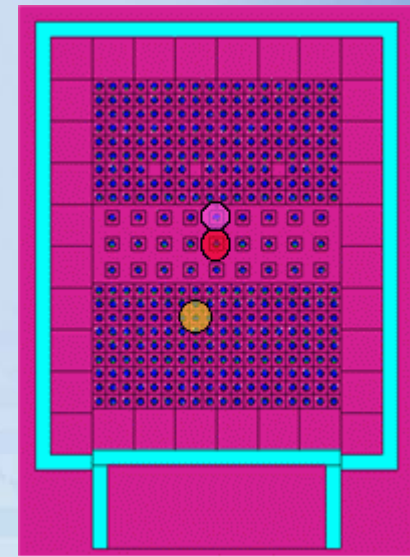
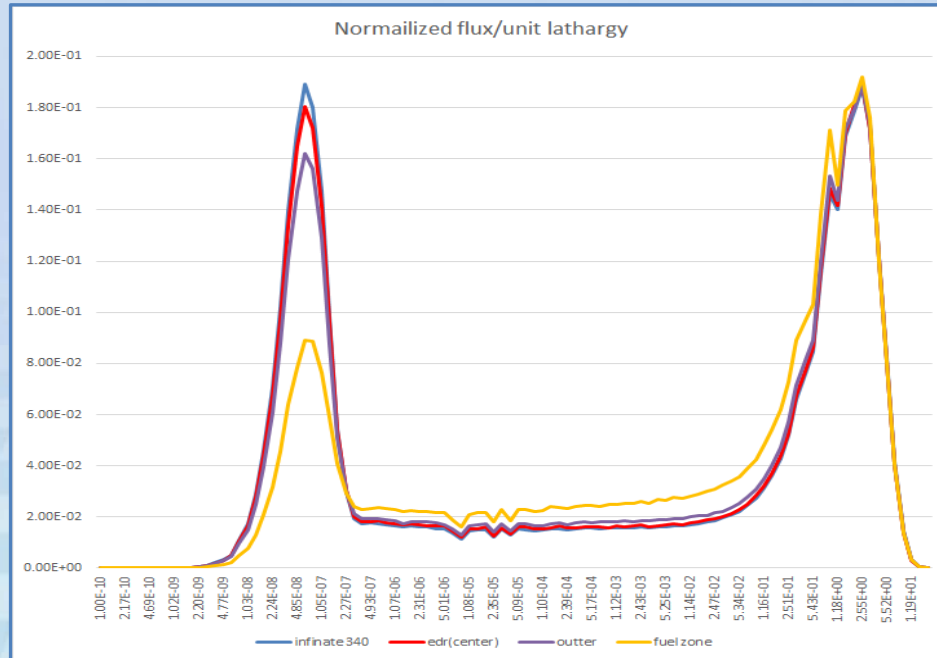
- Fuel : H-LPRR fuel
- Fuel pitch : 3.4cm
- $K_\infty$  : approximately 1



$K_\infty$  of infinite array  $\approx 1$

## ○ Finite array of fuels in the experimental zone

- Fuel pitch : 3.4 cm
- 9 x 3 fuel batch in the experimental zone
- $K_{\text{eff}}$  :  $\sim 1$



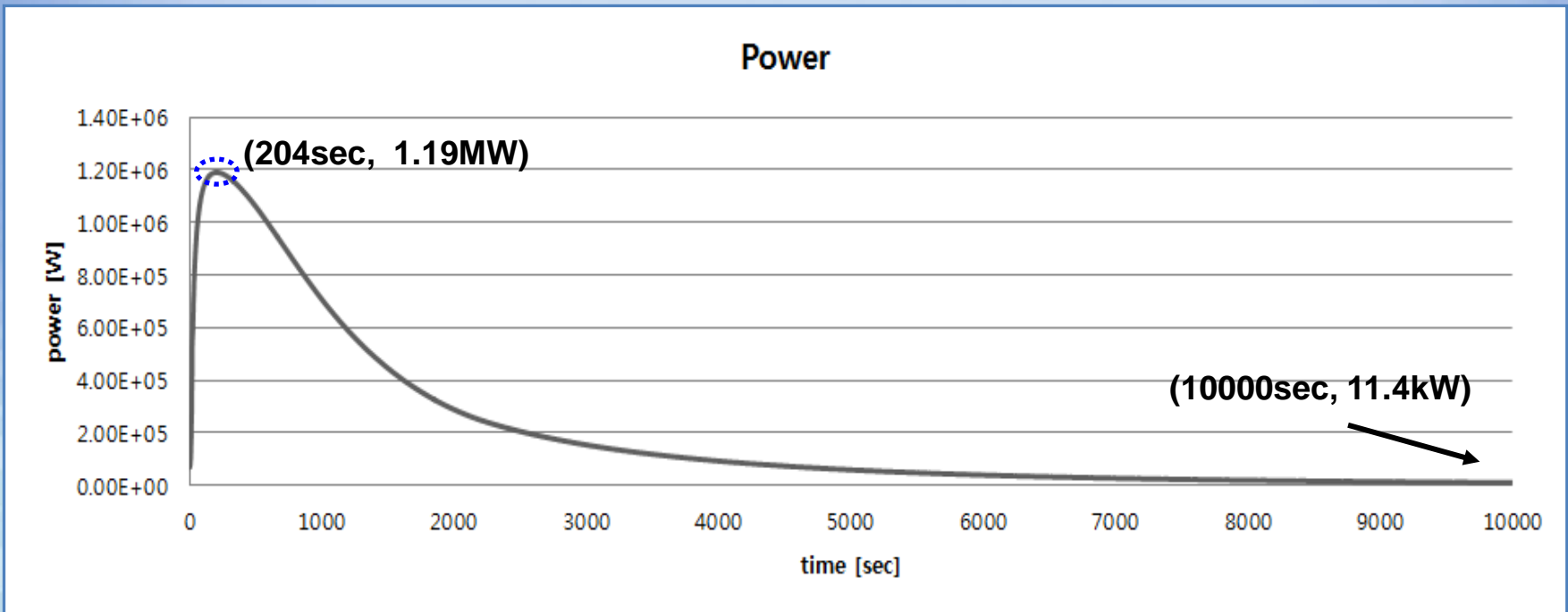
$K_{\text{eff}}$  of H-LPRR  $\approx 1$

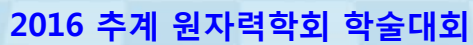
# 고유 안전성 평가



## ● Reactivity Insertion Accident Analysis of H-LPRR

- Reactivity insertion : 5 mk(Maximum excess reactivity)
- Result
  - Maximum thermal power : 1.19 MW
  - Maximum fuel temp. : 580 °C
  - Maximum coolant temp. : 75 °C
- The inherent safety characteristics was demonstrated.



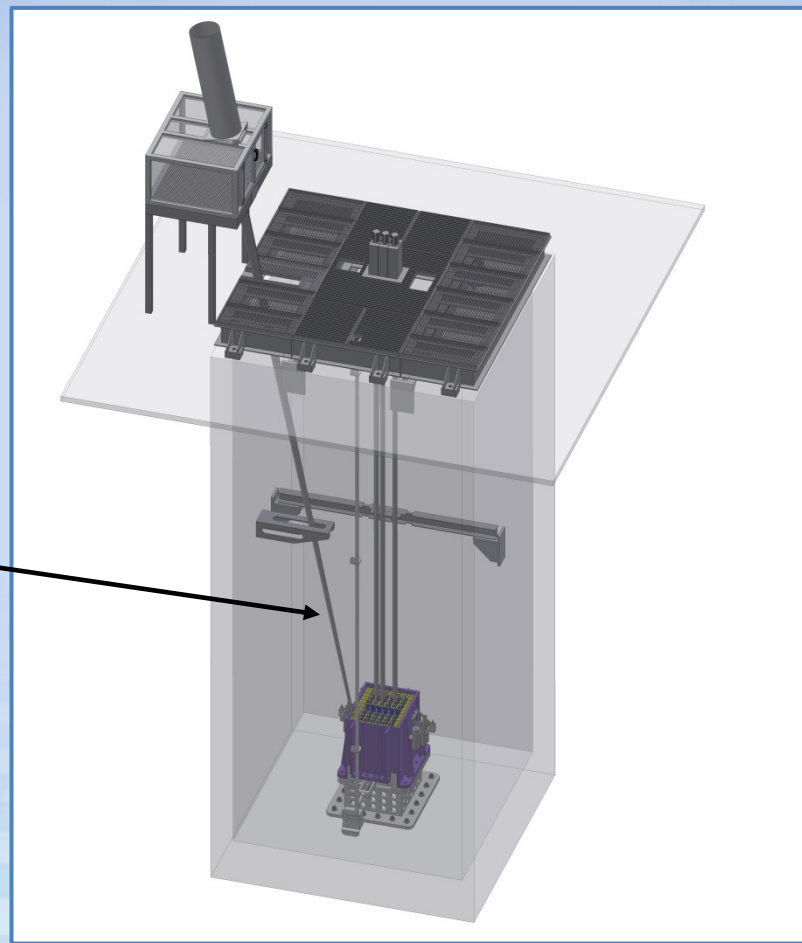




# 중성자 영상 장치 설치



튜브 선단 내부에  
중성자 거울 삽입





## ○ Neutron Activation Analysis

- 2 irradiation holes(Dia=30 mm) at the out-of-core position
- Thermal neutron flux :  $10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>·s
- Cd ratio = 10~20
- Manual or automatic rabbit transfer
- Sample room

## ○ Neutron Radiography

- Adoption of super mirror and slant beam tube
- Thermal neutron flux at sample table:  $1 \times 10^6$  n/cm<sup>2</sup>·s
  - 2 m mirror, 3 m collimator, Bi-filter, 8 cm of beam diameter

# 수행 가능한 특성 실험의 예



## Conventional Reactor Experiments

- Reactor period measurement
- Critical mass measurement
- Control rod worth measurement
- Neutron flux measurement
- Temperature coefficient measurement
- Measurement of the reactivity effect of reflector

## Experiments in Split Core Mode

- Measurement of prompt neutron decay constant and reactivity using Cf-252 (KAIST, 김용희, MCNP를 이용한 실험 설계)
- Measurement of prompt neutron decay constant and reactivity using Cf-252 in pulse mode (KAIST, 김용희, MCNP를 이용한 실험 설계)
- Neutron spectrum measurement for an array designed for education
- Measurement of the reactivity effect of inserted materials
- Measurement of the neutron detector characteristics

# 결론



- 다른 수단이 대체할 수 없는 저출력 연구로의 독자적인 용도 존재
- 혁신적인 저출력 연구로 : 설계의 혁신성, 고유 안전성 및 운영 중 안전성 확보가 매우 중요
- 이러한 욕구를 충족시키는 H-LPRR(Hybrid Low-Power Research Reactor) 개념 확립
  - Core-Split 개념을 도입하여 통상적인 저출력 연구로로서의 기능과 미임계 시설로서의 기능을 수행할 수 있는 연구로 모델 개발
  - 건설비 추정도 종료
- 국제학회 등을 통하여 연구로 건설을 고려하고 국가에 H-LPRR 개념에 대한 정보 제공 중 (몽고, 케냐, 탄자니아, 튀니지, 필리핀)
- 인공지능과 증강현실 등 신기술의 교육용 연구로에의 적용도 시도 필요



**감사합니다.**

2016 Fall KNS Workshop  
연구용 원자로 기술 개발 및 수출 현황

# 연구로를 위한 요소기술 개발 [핵연료 및 재료 기술 개발]

**UNIST**

ULSAN NATIONAL INSTITUTE OF  
SCIENCE AND TECHNOLOGY

손 동 성

# Outlines

## I 개 요

## II 연구개발 주요내용

- A 연구로 핵연료 재료 특성 평가 기술 개발
- B 연구로 반사체 재료 건전성 평가 기술 개발
- C 지르코늄 안내관 평가 기술 개발
- D Al 합금 구조재료 특성 평가 기술 개발

## III 요 약

## 국내 대학 연구로의 필요성

- ❖ 원자력 발전소 및 연구로의 수출을 위한 관련 전문 인력 양성
- ❖ 지역 기업들의 활발한 원자력분야 진출 지원

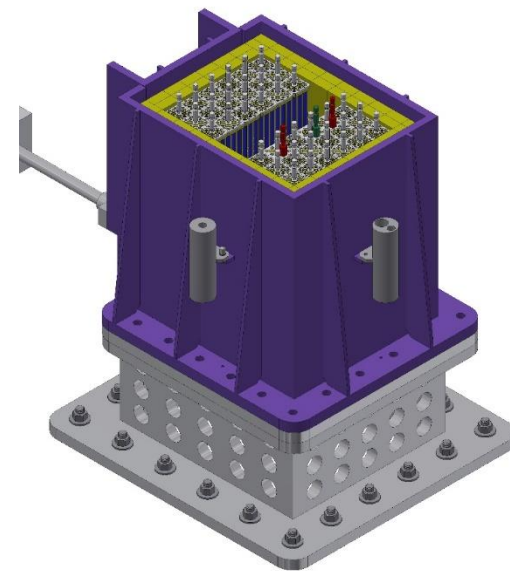
## 독자적인 기술로 개발 된 새로운 교육/훈련용 연구로 개발

### ❖ 연구로 핵연료 요구 사항

- 저농축우라늄 및 높은 핵비확산성 저항성
- 검증된 건전성 및 안전성
- 추가 제조 설비 없이 장기간 핵연료 공급 가능
- 세계적 경향을 고려한 핵연료 후보군 선정 필요

### ❖ 핵심 소재 기술 개발 요구

- 반사체, 제어봉, 구조재료의 물성/노내 특성 자료 수집 및 건전성 평가



# 연구 개발 내용

- 연구로 핵연료 재료 특성 평가 기술 개발
- 연구로 반사체 재료 건전성 평가 기술 개발
- 지르코늄 안내관 평가 기술 개발
- 알루미늄합금 구조재료 특성 평가 기술 개발

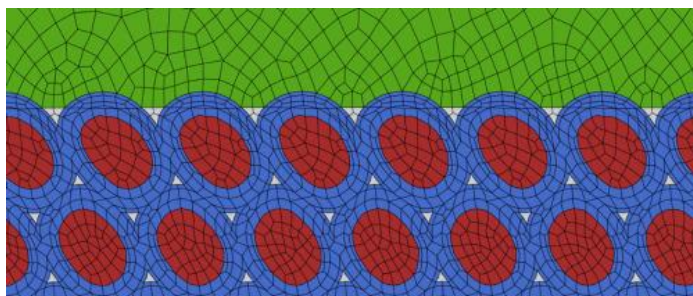
## 02. 연구 개발 주요내용

**UNIST**

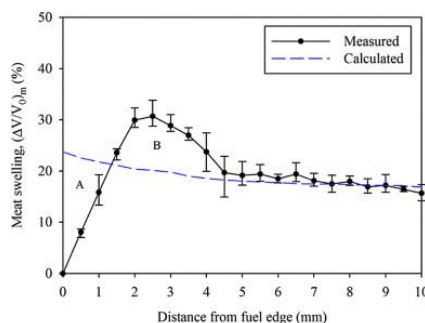
ULSAN NATIONAL INSTITUTE OF  
SCIENCE AND TECHNOLOGY

## 1. 분산형 U-Mo/Al 연구로 핵연료 조사 거동 모델 개발

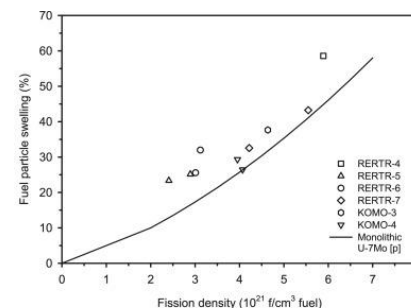
- 유한요소해석을 이용하여 U-Mo/Al 분산형 핵연료 구조 해석
  - ABAQUS 유한요소 프로그램을 이용하여 수행
- 분산형 U-Mo/Al 핵연료의 조사 크리프 거동 모델 개발
  - 이를 다음 논문에 개제 (G.Y.Jeong et al., J. Nucl. Mater., 466, 2015)
- 분산형 U-Mo/Al 핵연료의 Swelling 모델 개발
  - 이를 다음 논문에 개제 (Y.S.Kim et al., J. Nucl. Mater., 465, 2015)



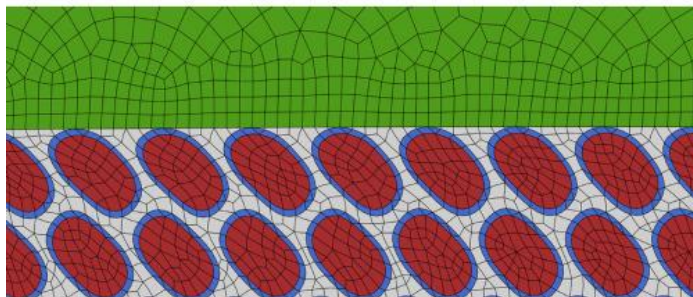
(a) V6022M at 257 EFPD



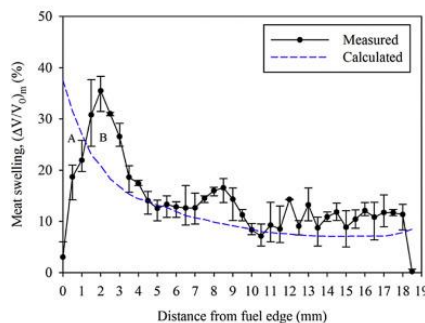
(a) V6022M



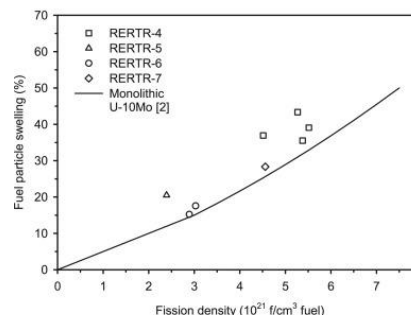
(a) U-7Mo/Al. p denotes prediction by Eqs. (4) and (5).



(b) R3R108 at 98 EFPD



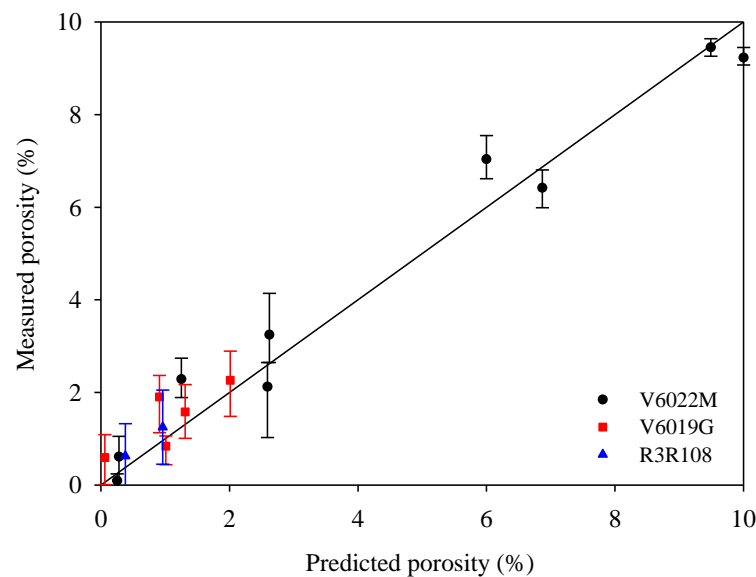
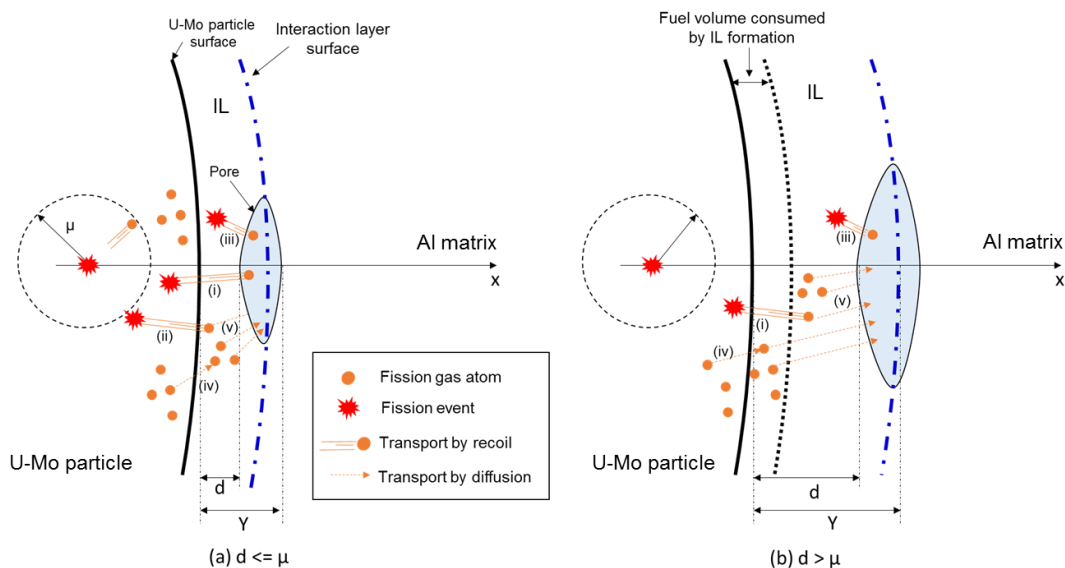
(b) R3R108



(b) U-10Mo/Al. p denotes prediction by Eqs. (6) and (7).

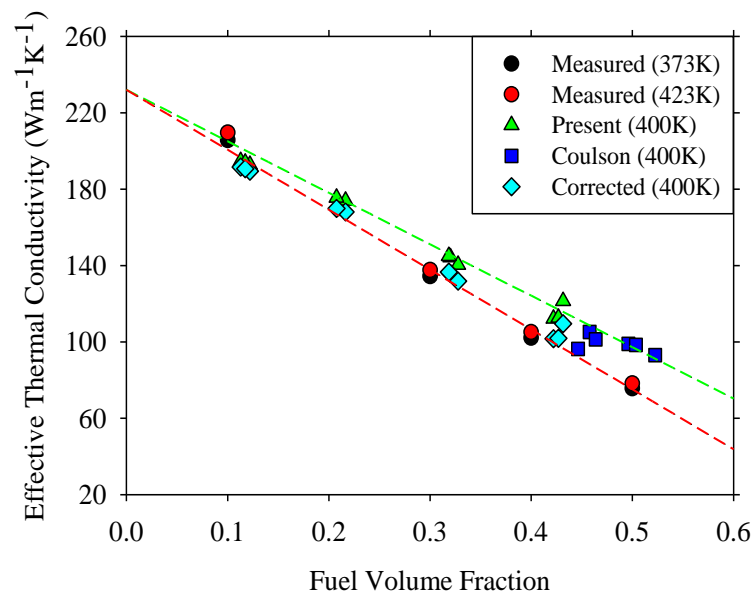
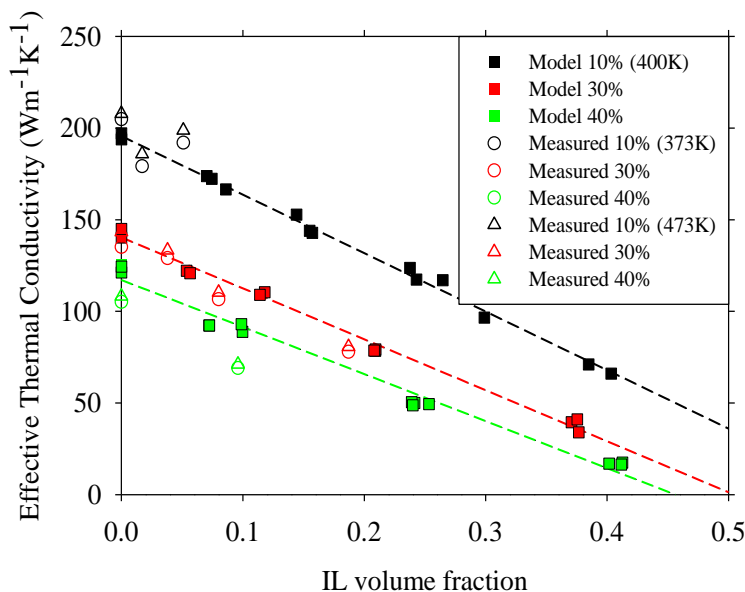
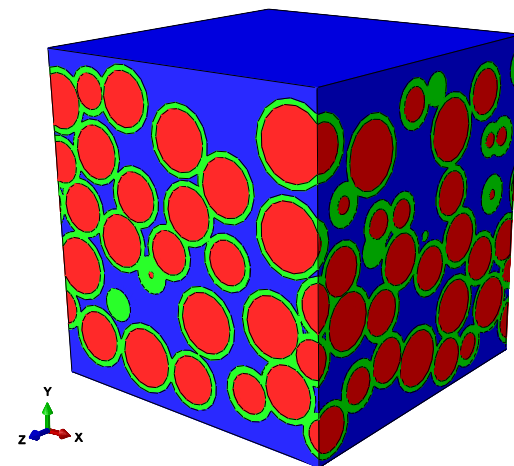
## 2. 분산형 U-Mo/Al 연구로 핵연료 조사 거동 모델 개발

- 분산형 U-Mo/Al 핵연료에서 나타나는 Pore 생성 모델 개발
  - 기존 핵분열 가스 생성 및 방출 모델을 이용한 Semi-analytical model 수립
  - 이를 다음 논문에 게재 (Y.S.Kim et al., J. Nucl. Mater. 478 (2016) 275.)



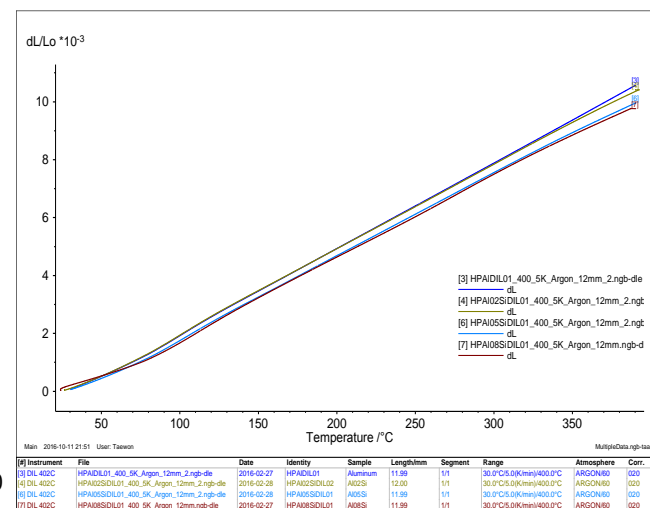
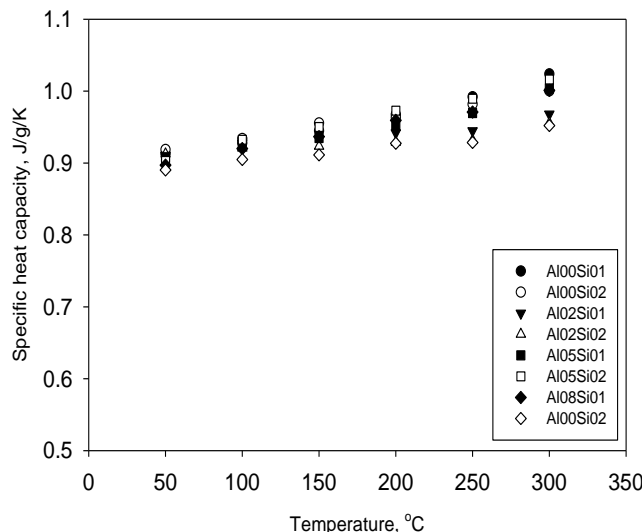
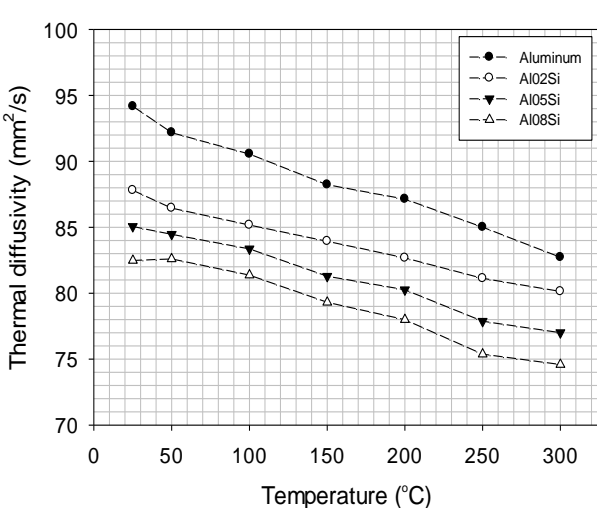
## 3. 분산형 U-Mo/Al 연구로 핵연료 열전도도 모델 개발

- 분산형 핵연료를 모사할 수 있는 3차원 모듈을 개발 (분말 크기 분포, 반응층 두께 등 고려)
- 기존의 수학적 모델과 분석 결과를 가지고 분말 크기 분포와 방향성을 고려한 열전도도 모델을 개발
  - 이를 다음 논문에 게재 (T.W.Cho et al., J Nucl Sci Technol, 1328-1337, 2015)



### 4. 분산형 연구로 핵연료 기지층 열물성 측정

- 분산형 핵연료의 기지층인 Al-Si 합금을 제조 및 열물성 측정을 수행
- 진공 고온 프레싱을 사용하여 Al, Al-2Si, Al-5Si, Al-8Si 합금을 제조
- 열확산도 측정, 비열 측정, 열팽창 계수 측정
  - Si 증가에 따른 두드러진 열확산도가 감소가 나타남.
  - 비열과 열팽창계수는 Si 양에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타남.



## 저출력 연구로핵연료의 후보 재료로 $UO_2$ 봉형 핵연료의 적용을 고려

- 상용 원자로 핵연료 성능 분석 코드, FRAPCON을 활용하여 개발중인 노심에서의  $UO_2$  봉형 핵연료의 예비 성능 및 안정성 평가를 수행

### 1. 핵연료 온도: 매우 높은 안전 여유도

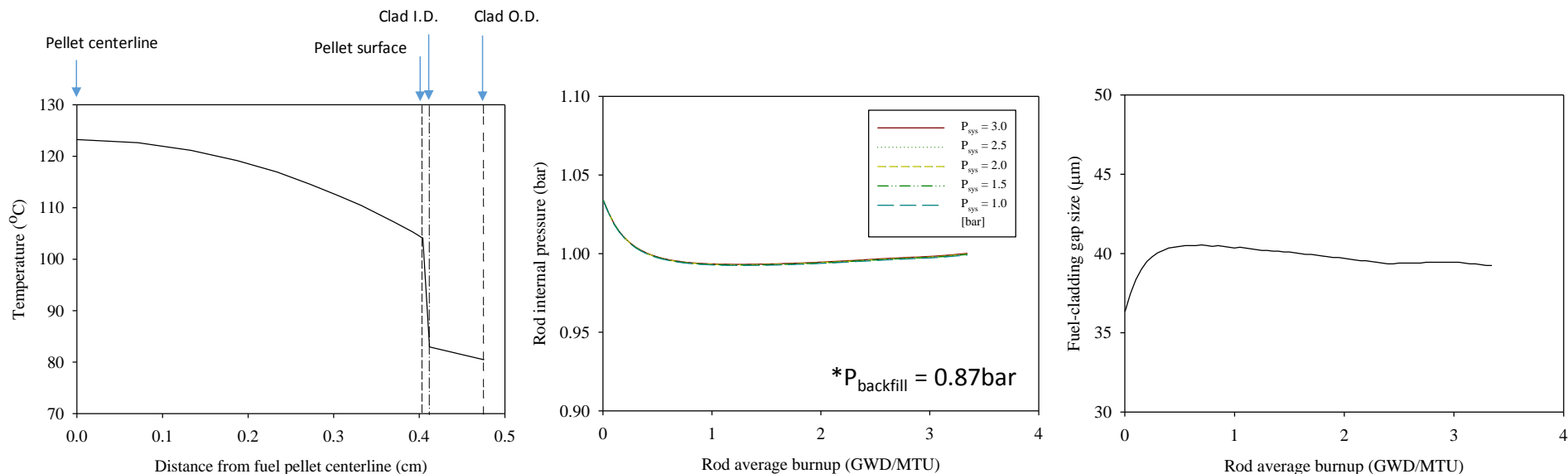
- EOL에서의 소결체 중심온도:  $\sim 120^\circ\text{C}$  ( $UO_2$  용융점:  $\sim 2856^\circ\text{C}$ )

### 2. 봉내압: 핵연료 연소에 따른 봉내압 변화 매우 미비함

- 냉각 시스템 압력에 관계 없이 10 GWD/MTU 이우 거의 일정하게 유지

### 3. 연료-피복관 간격: 운전기간 PCMI 발생이 나타나지 않음

- 운전 초기에 핵연료 치밀화에 의한 증가 후 핵연료 열팽창/팽윤에 의한 감소



## 4. 피복관 응력: 연소 말기 Von-mises 응력 계산 결과 ~12MPa

- 피복관의 강도의 약 3% (일반적인 ZIRLO의 항복 강도가 ~420 Mpa)

## 5. 피복관 산화막 두께: 운전기간 나타난 산화층 두께 매우 얇음

- 연소 말기 산화막의 두께는 약  $0.0076\mu\text{m}$ 로 피복관의 두께인  $580\mu\text{m}$ 와 비교해 보았을 때  $1.31 \times 10^{-3}\%$ 로 연소 도중 매우 적은 양의 산화가 나타남.

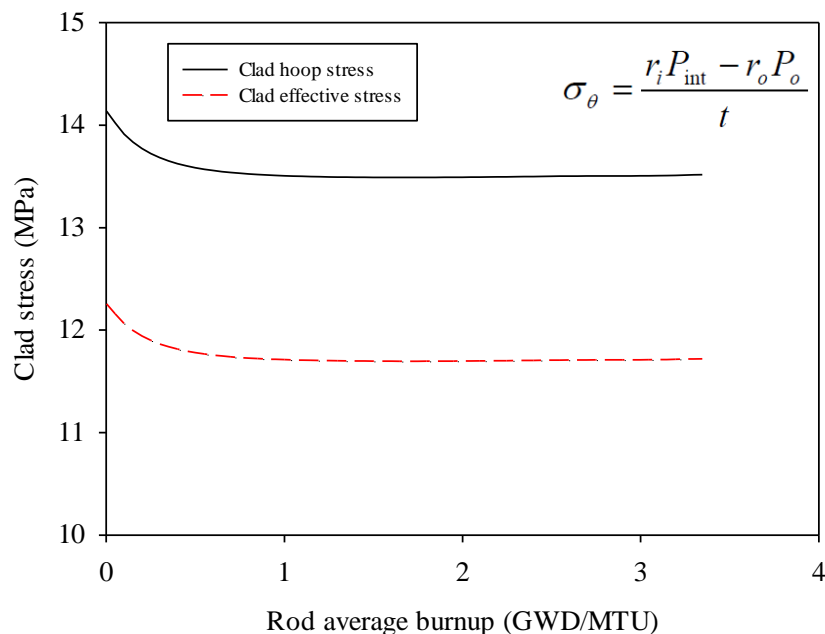


그림 . 연소 기간 동안 피복관에 가해지는 후프 응력 및 Von Mises 응력

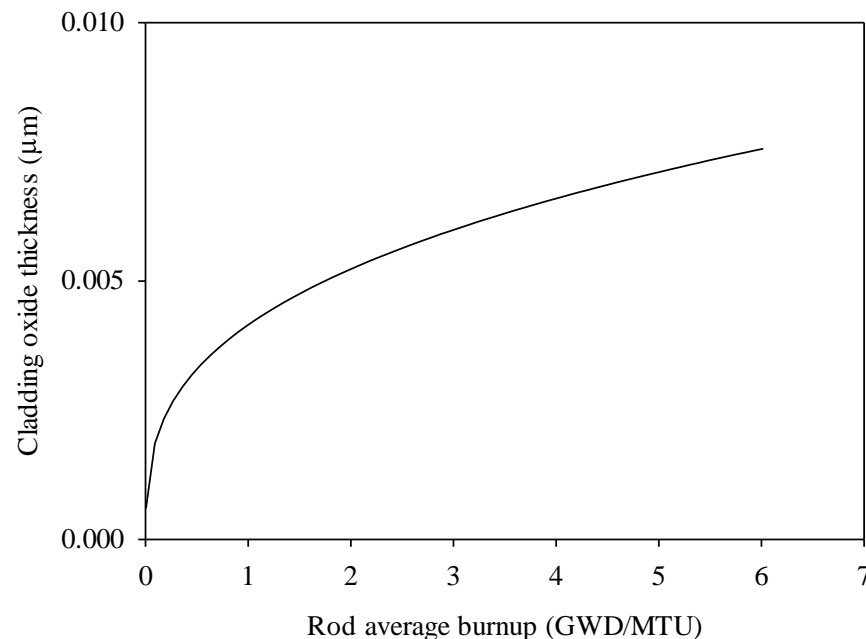
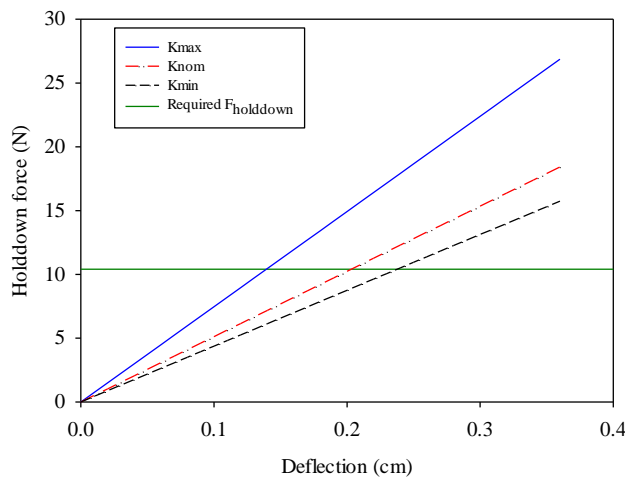


그림 . 축방향 침투 출력 위치에서 연소도에 따른 피복관 산화막의 두께 변화

## 저출력 $UO_2$ 봉형 핵연료 설계 자료 도출

- 상용 핵연료의 설계 매뉴얼을 참고하여 핵연료 설계 자료를 도출 및 관련 자료를 기술보고서로 발간.



탄성계수에 따른 지지력 비교

Unit : N	$F_{Min}$	$F_{nominal}$
Hold-down force	9.8	14.1

- Since minimum holddown force < required holddown force
  - Reduce plenum length
  - Increase spring free length
- For  $K_{min}$ , minimum deflection  $\geq 0.254$ cm

	Minimum	Nominal	Maximum
Spring outer diameter [cm]	0.703	0.765	0.827
Spring wire diameter [cm]	0.0987	0.1000	0.1001
Spring free length : L [cm]	2.75	2.79	3.31 <sup>a</sup>
Spring rate constant [N/cm]	10.8	14.1	54.4 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Calculated by using maximum L/D ratio = 4, to avoid spring buckling

<sup>b</sup>Calculated by using  $F_{max} = K_{max}(L_{max} - U_{min})$

# 반사체 물성/노내 특성 자료 수집

## 흑연/베릴륨 물성 및 노내 물성 자료 수집 및 모델 정립

- 원자력급 흑연 및 베릴륨의 물성 특성 및 노내 특성 자료를 수집하였고 모델 정립함.
- 이에 대하여 각각의 내용을 2편의 기술보고서로 기술함.
- 각각의 물성 데이터는 온도, 조사량에 따른 함수로 표현
- 주로 열전도도, 열팽창 계수, 탄성 계수, 중성자 유도 구조 변화, 조사 취화 등의 조사 물성 데이터를 확보

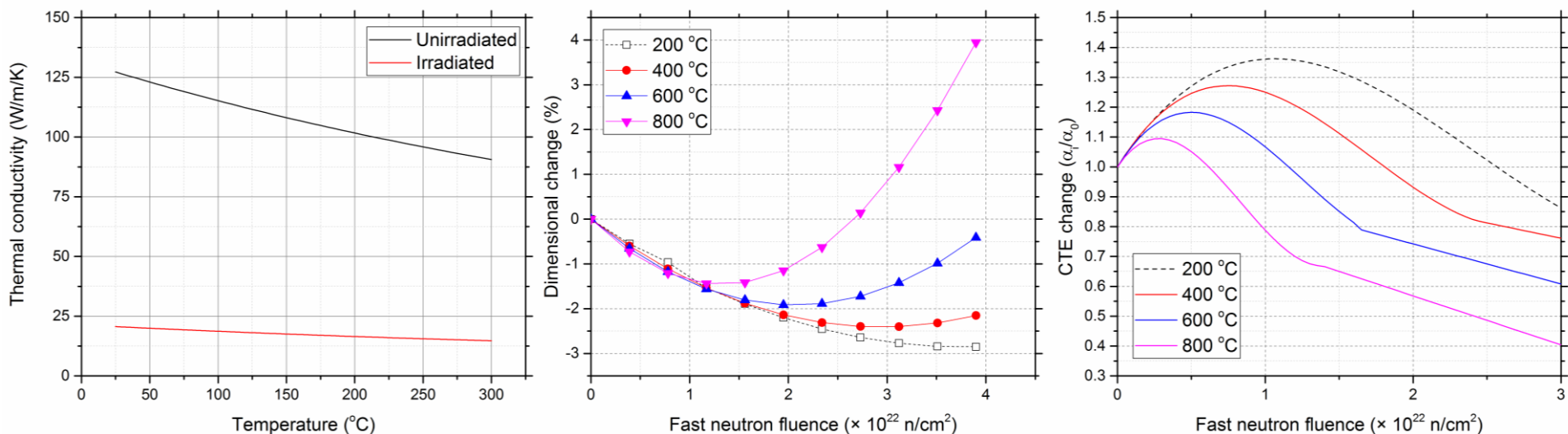


그림 . 온도, 조사량에 따른 원자력급 흑연 IG-110의 물성치 변화: 열전도도, 조사유도변화, 열팽창계수

## 흑연 조사 거동 평가 프로그램 개발

- ABAQUS 사용자 프로그램, UMAT을 이용하여 열팽창, 조사팽창, 조사크리프 등을 고려한 모델 개발

### Maxwell-Kelvin Model of Graphite (Iyoku)

$$\Delta \epsilon^{\text{total}} = \Delta \epsilon^e + \Delta \epsilon^{\text{th}} + \Delta \epsilon^{\text{dc}} + \Delta \epsilon^{\text{pc}} + \Delta \epsilon^{\text{sc}}$$

Step 1

ABAQUS GUI or  
Input file

ABAQUS supply information at time  $t_n$

- Time increment  $\Delta t$ ,
- Total strain increment  $\Delta \epsilon^{\text{total}}(t_n)$ ,
- Total strain  $\epsilon^{\text{total}}(t_n)$ ,
- Stress  $\sigma(t_n)$

Step 2

ABAQUS UMAT

Coordinate information at integration point

Flux calculation at I.P based on coordinate

Fluence calculation at I.P. based on flux and time

Material properties calculation at I.P. based on  
fluence and temperature

Calculate trial stress  $\sigma^{\text{tr}}$  at IP based on Hooke's law

Calculate strain components:  $\Delta \epsilon^{\text{th}}, \Delta \epsilon^{\text{dc}}, \Delta \epsilon^{\text{pc}}, \Delta \epsilon^{\text{sc}}$

Calculate elastic strain:

$$(\Delta \epsilon^e = \Delta \epsilon^{\text{total}} - \Delta \epsilon^{\text{th}} - \Delta \epsilon^{\text{dc}} - \Delta \epsilon^{\text{pc}} - \Delta \epsilon^{\text{sc}})$$

Update material jacobian matrix and stress

$$(\partial \Delta \sigma / \partial \Delta \epsilon^e, \sigma)$$

Step 3

ABAQUS Solver

ABAQUS update next strain

ABAQUS generate new  $\Delta \epsilon^{\text{total}}(t_{n+1})$

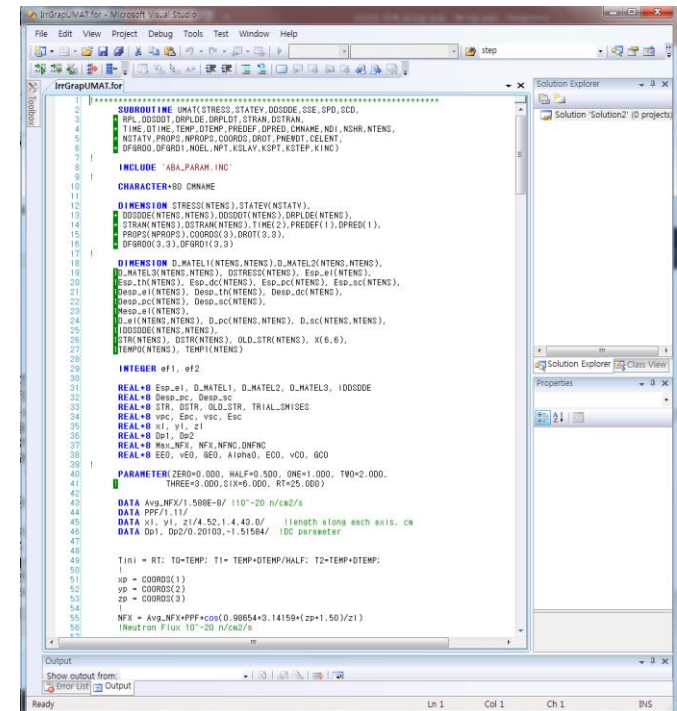
ABAQUS equilibrium iterations at time  $t_{n+1}$

n=n+1, go to  
step 1

Convergence

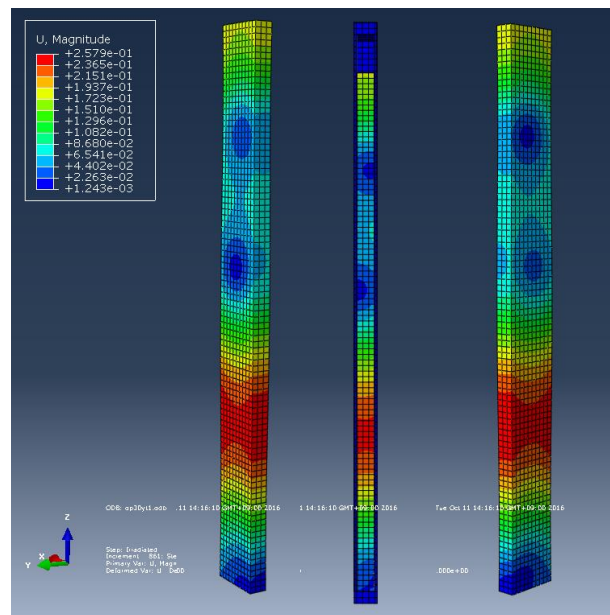
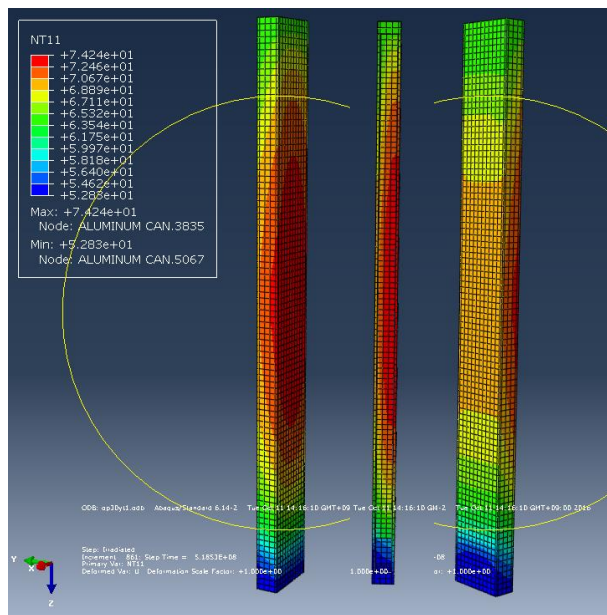
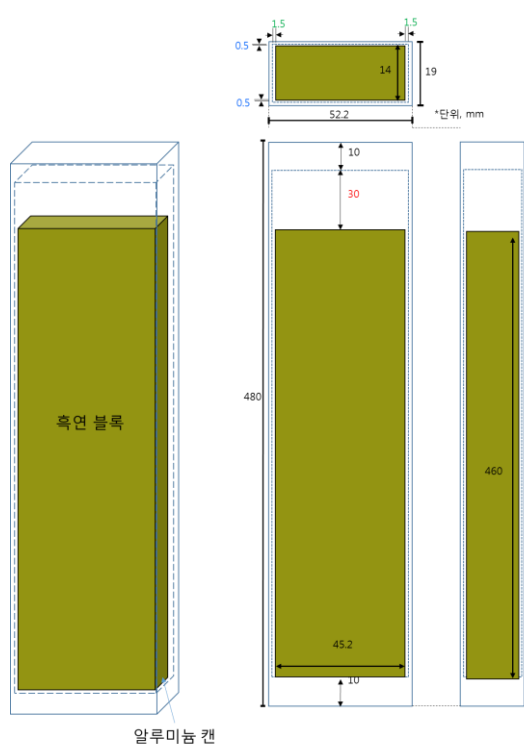
Reduce  $\Delta t$  and  
iteration

Not  
convergence



### 연구로 조사 환경에서의 반사체 건전성 평가 수행

- 개발한 프로그램을 활용하여 연구로 조사 환경에서의 건전성 평가를 수행
- 원자력급 흑연: IG-110 (Toyo Tanso)
- 직육면체의 흑연 블록이 알루미늄 캔에 내장
- 흑연 블록의 열팽창/조사팽창 등을 고려한 Gap 고려



최대온도: 74.24°C

최대 변형: +0.258cm (Gap size: 0.500cm)

## 재료의 조사 열화를 모사하기 위한 모델 개발

- Mean Field Rate Theory를 적용한 중성자 조사에 의한 재료 결함을 모사하고, 조사 열화 거동을 정량적으로 계산할 수 있는 핵심 모델 개발

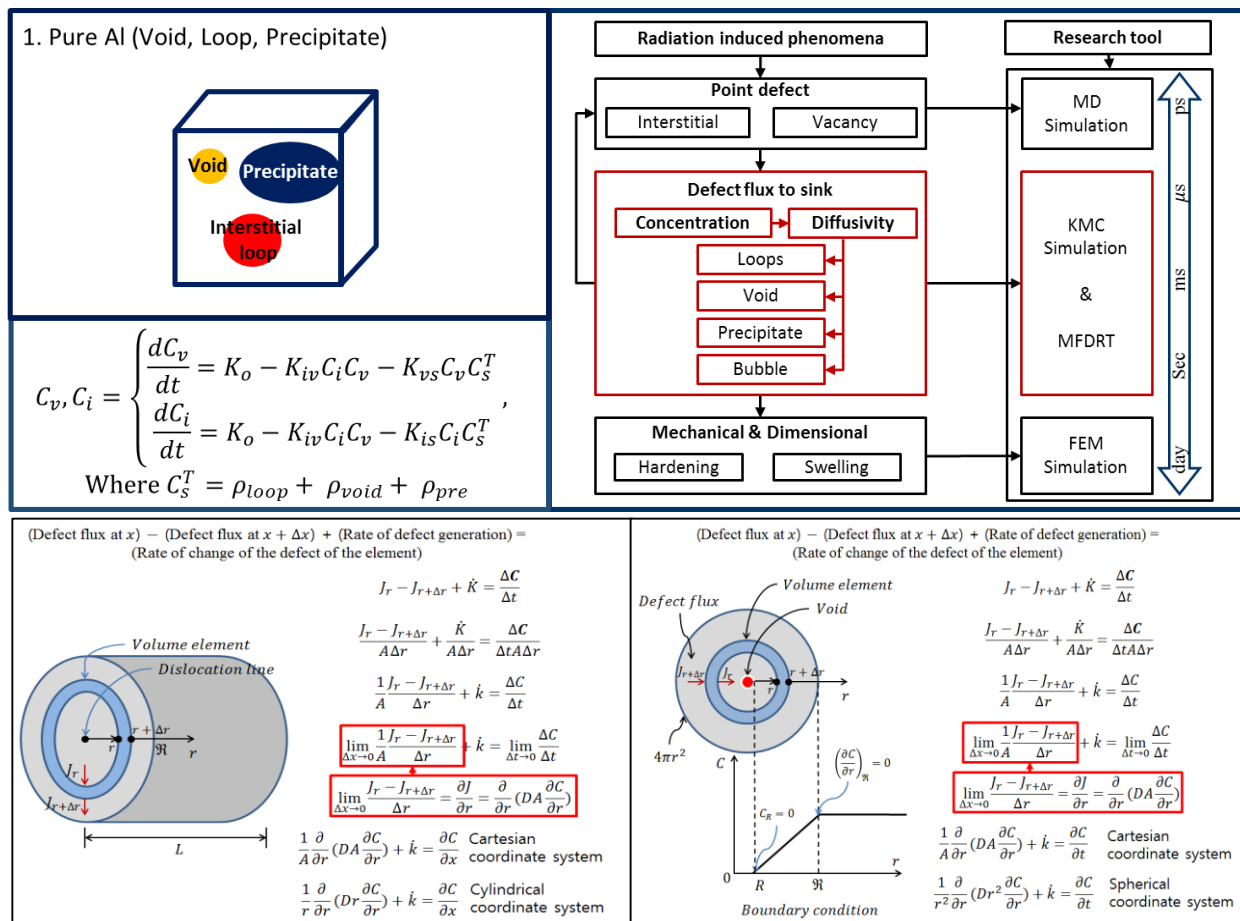
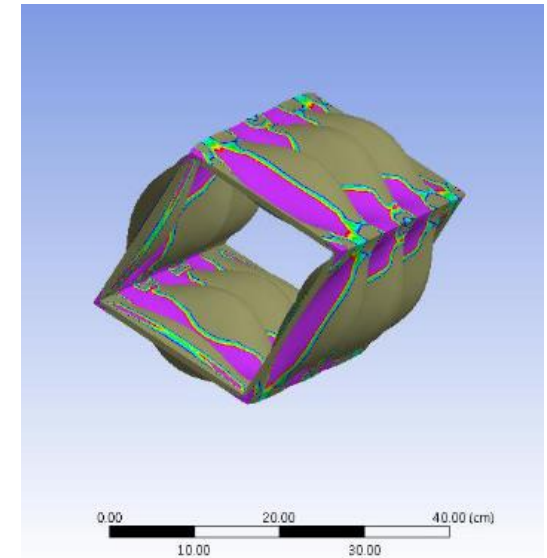
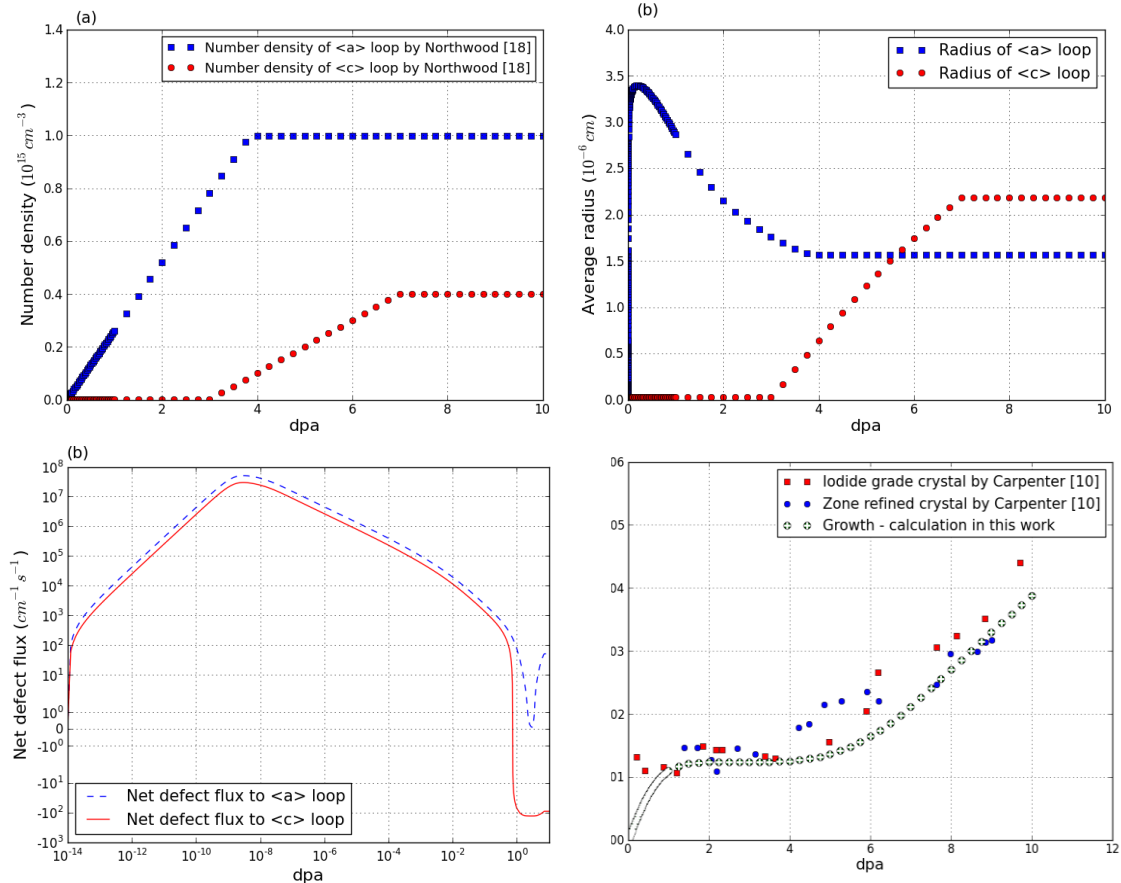


그림 15. 조사 열화 모델링 상세 설명 및 도식화

## 지르코늄 안내관 건전성 평가 결과

- 개발한 조사 열화 모델을 적용하여 조사 성장 값을 계산하여 유한요소 해석을 통한 구조해석을 수행.
- 5 dpa, 553 K에서 최대 변형율이 0.85 %로서 **높은 치수안전성을 보였음.**



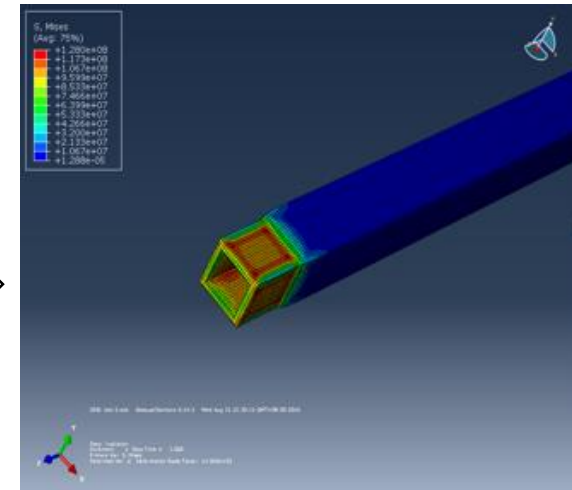
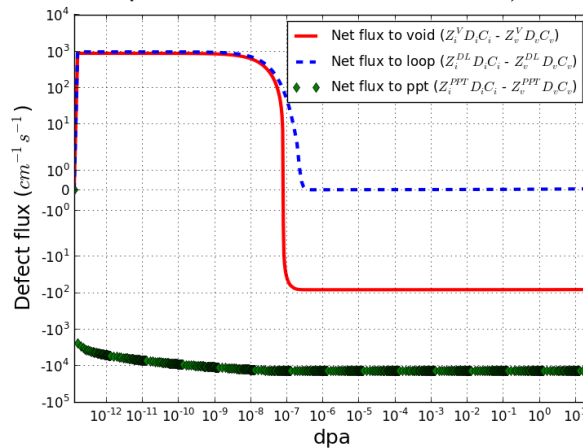
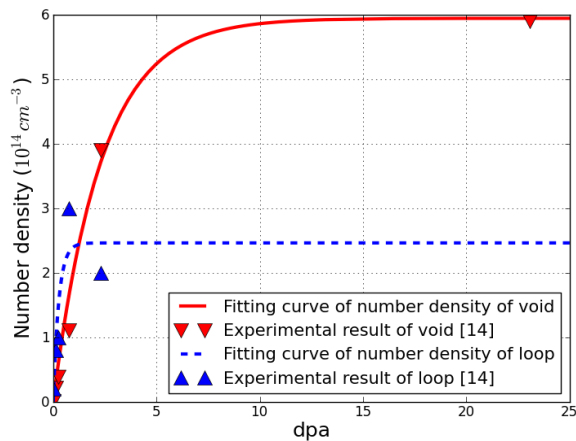
이를 다음 논문에 게재:

- Sang Il Choi, et al., NET, VOL45, No.3 (2013)
- Sang Il Choi, et al., J. Nucl. Mat. 468 56-70 (2016)

그림 . 지르코늄 구조재료 해석 결과

## 알루미늄 구조재료 건전성 평가 결과

- 조사 팽윤 및 조사 유도 경화를 고려하여 구조해석을 수행하였음.
- 200 dpa, 328 K에서 최대 응력 값이 낮아 **구조 신뢰성을 유지함**.
  - 최대 응력: 128 MPa (Al6061의 항복강도, ~276MPa)



이를 다음 논문에 게재:  
 Sang Il Choi, et al., Phys.  
 Status Solidi A, 1-7 (2016)

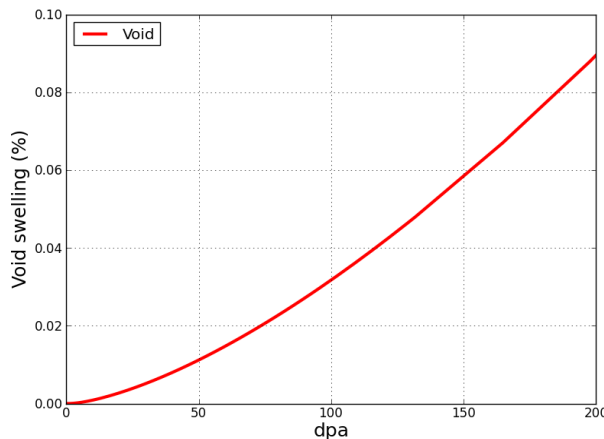
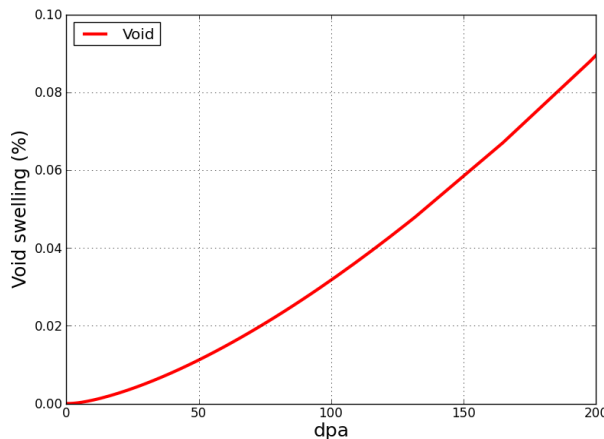


그림 . 알루미늄 구조재료 해석 결과

## 알루미늄 합금 부식 평가

- 전기화학적 방법을 이용하여 부식속도 측정을 수행함
- 열간 압연을 통해서 조사 시편을 모사함
- 알루미늄 부식 특성 평가 결과가 Savannah River National Lab.에서 수행한 알루미늄의 전기화학 부식 평가 결과와 매우 비슷하였음.
- 조사 모사 시편 및 비 모사 시편 모두 저온의 물의 환경에서 부식저항성이 뛰어난 것으로 나타났음.

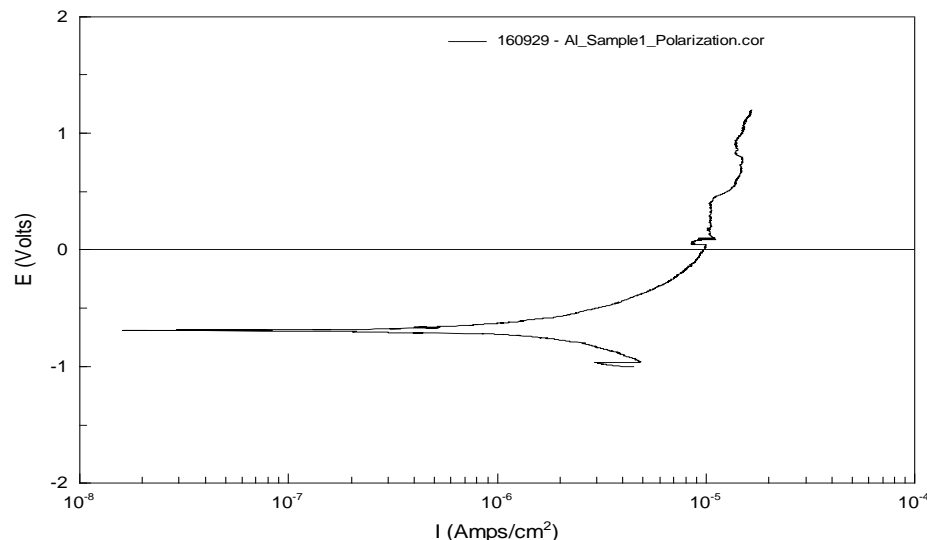


그림 . 알루미늄 구조재료 전기화학 실험 결과

## 1. 연구로 핵연료 재료 특성 평가 기술 개발

- 분산형 U-Mo/Al 핵연료 조사 거동 모델 개발:
- 분산형 U-Mo/Al 핵연료 열전도도 모델 개발:
- 분산형 연구로 핵연료 기지층 열물성 측정:
- 저출력  $UO_2$  봉형 핵연료 성능 분석 및 설계:

## 2. 연구로 반사체 재료 건전성 평가

- 흑연/베릴륨 물성 및 노내 물성 자료 수집 및 모델 정립, 관련 기술 보고서 작성
- 반사체 구조해석 모델 개발
- 중성자 조사 열화 모델 개발

## 3. 지르코늄 안내관 특성 평가

- 중성자 조사 열화 모델을 적용하여 조사 성장 값을 계산
- 이를 참고로 구조해석 결과 5 dpa, 553K 에서 최대 변형율 0.85%의 낮은 값을 보임

## 4. 알루미늄 구조재료 특성 평가:

- 중성자 조사 열화 모델을 적용하여 조사 성장 값을 계산
- 조사 팽윤 및 조사 유도 경화를 고려하여 200 엠, 328K 에서 최대 응력 값이 128MPa로 Al6061의 항복 강도인 276 MPa를 넘지 않음.
- 전기 화학적 방법을 이용하여 조사 모사 시편과 비 모사 시편의 부식 저항성을 평가.

총연구기간: 2011.12 ~ 2016.10

평가지표	분석지표			총계	
				계획	성과
과학기술 연구 성과	국내. 외 논문(건)	국내	SCI	1	2
			비 SCI	14	17
		국외	SCI	5	9
			비 SCI	12	14
인력양성 성과	학위과정지원(명)	박사		0	1
		석사		13	15
		학사		6	14
국제협력 성과	인력교류(명)	외국 연구자 유치		0	4
		해외 파견			
	국제회의(학회, 워크숍 등) 신설/개최 (건)			1	1
	기술협력 MOU 체결(건)				
공동연구(건)					
사업화 성과	국내. 외 특허(건)	국내	출원	0	1
			등록		
		국외	출원	0	1
			등록		
원자력사업실적	기술보고서			4	5
	설계문서				
	장비구축 및 개발			0	1
	분석방법개발				
총계				56	85

# Thank you for your listening



# **연구로 열유체 해석 및 기계설계 요소기술 연구**

**정 지 환, 윤병조**

**부산대학교 기계공학부**

**October 26, 2016**

## 1.서론

## 2.연구 목표 및 내용

## 3.연구 결과

연구용 원자로 열수력 DB

측정 방법론

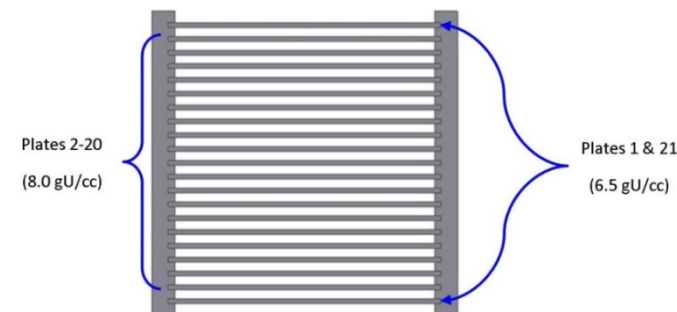
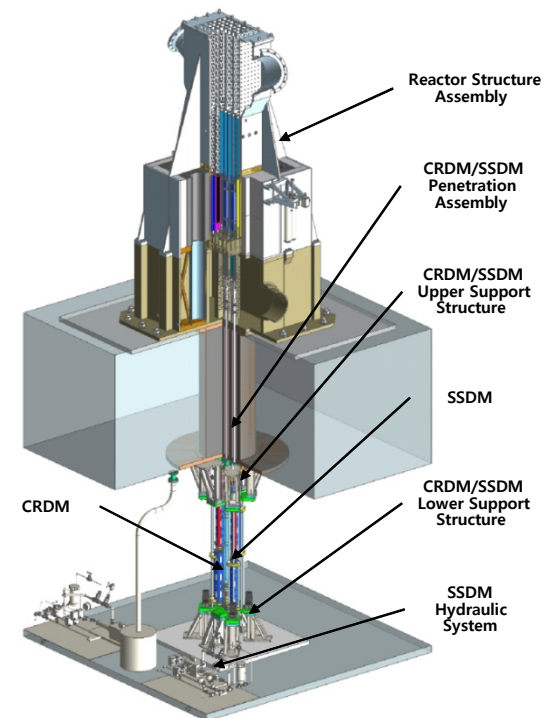
비가열 사각 채널 물-공기 이상 하향 유동

비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

## 4.결론

## ● 연구개발의 필요성

- ✓ 요르단 연구로 수출 및 여러 국가의 연구로 수요에 맞추어 기술 수준 도약 필요
- ✓ 국내 연구로 활용 수요 증가로 신형 ‘기장 연구로’ 운영에 따른 전문인력 양성 필요
- ✓ 후쿠시마 원전사고 이후 원자력 안전 요소기술 역량 향상 요구
- ✓ ‘기장 연구로’에 적용되는 판형 핵연료의 열수력 데이터 필요



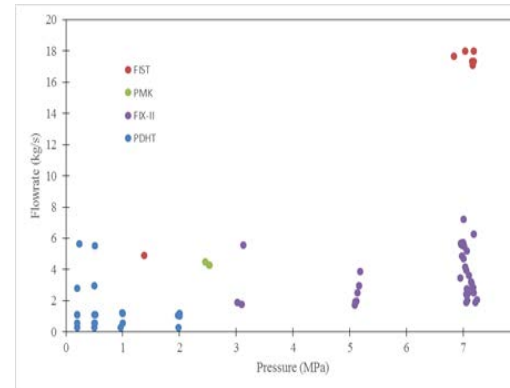
- 연구용 원자로 열수력 **DB** 구축
  - ✓ 봉형 핵연료 관련 열수력 **DB**
  - ✓ 판형 유로 관련 열수력 **DB**
- 비가열 사각 유로 하향 **2상** 유동
  - ✓ 비가열 사각유로 하향 **2상** 유동 실험
  - ✓ 비가열 사각유로 하향 **2상** 유동 **regime map** 개발
- 사각유로 비등열전달 데이터 생산 및 모델 개발
  - ✓ 비등 열전달 실험 장치 설계 및 구축
  - ✓ 사각유로 비등열전달 실험 데이터 생산
  - ✓ 사각유로 비등열전달 실험 실험식 개발
  - ✓ 판형 구조물 유로의 **CFD** 해석 및 비등모델 검증
- 연구로 중대사고 가능성 평가
  - ✓ **Pool-type** 연구로의 중대사고 발생 가능성 평가

● 연구용 원자로 열수력 DB

## 봉형 핵연료

[illegible]

### <KINS 열수력 DB>

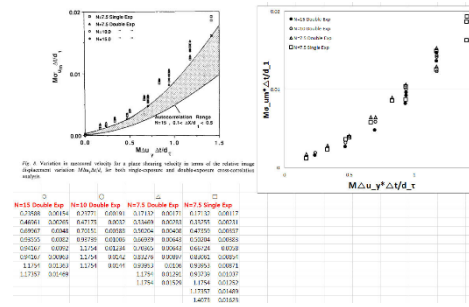


### <열수력 DB 측정범위>

직각 유로

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75																									

### <문헌 DB 구성>



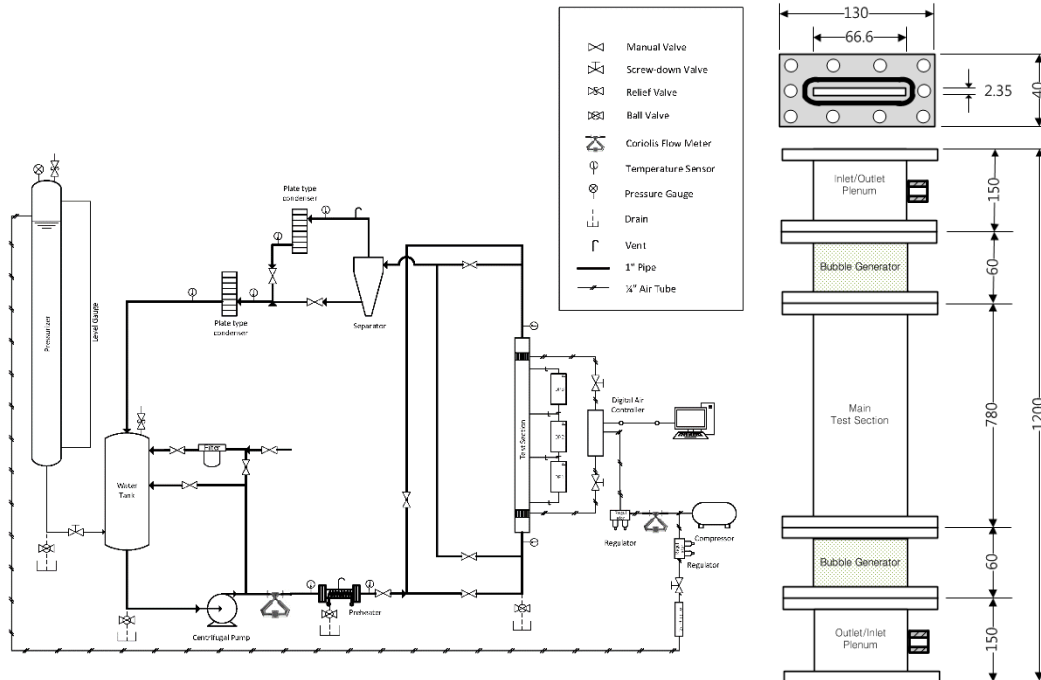
### <결과 DB 구성 내용>

- ✓ KINS T-H Databank에 등재된 해외 봉형 핵연료 열수력 실험 데이터 수집 및 정리
- ✓ 사각유로 열수력 실험/열수력 현상 수학적 모델링/현상 측정기술 문헌 조사

## 3.2 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

### ● 비가열 사각 유로 하향 2상 유동 DB 구축 및 모델 개발

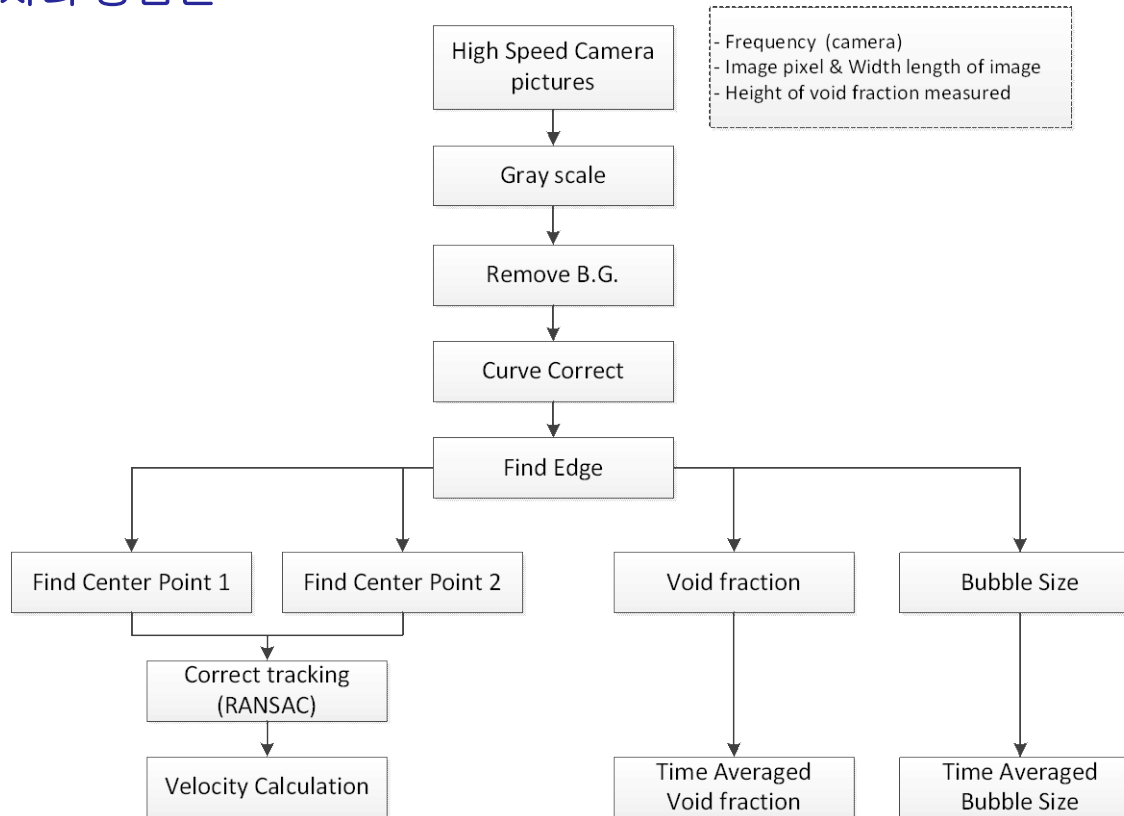
#### ✓ 비가열 사각 유로 2상 유동 실험 장치



**The schematic of experimental apparatus and test section      Photograph of experimental apparatus**

## ● 측정 방법론

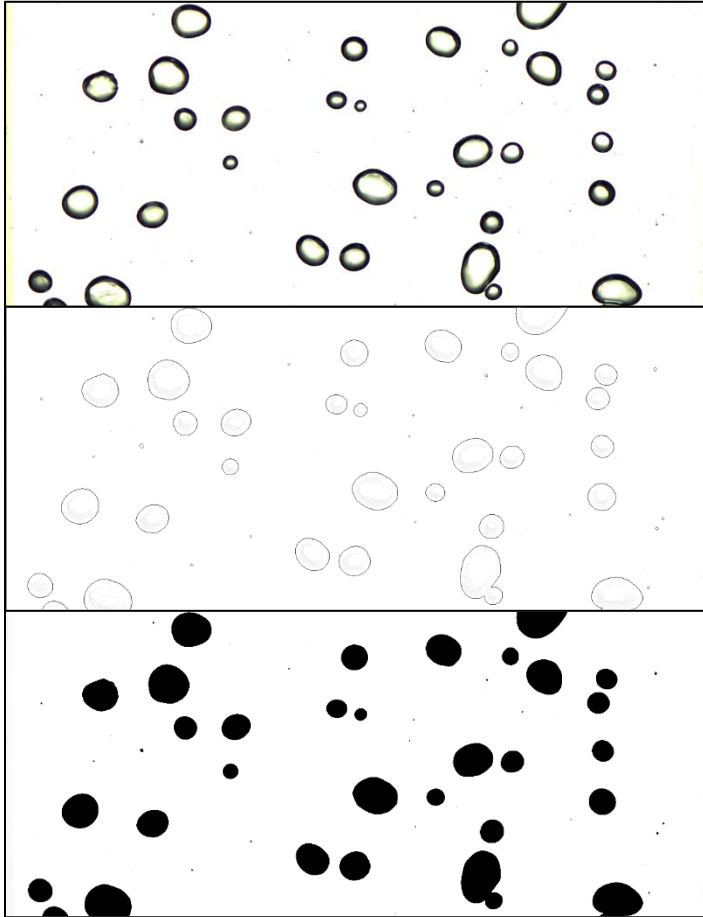
### ✓ 영상처리 방법론



- **High speed camera** 이용 사각 채널 내 유동 영상정보 획득
- 이미지 처리 후 국부 기포율, 기포 속도, 기포 크기 등 주요 인자 계산

- 측정 방법

- ✓ 영상처리 절차



초고속 카메라로 촬영 된 이미지

MATLAB image processing toolbox로  
기체-액체 경계 추출

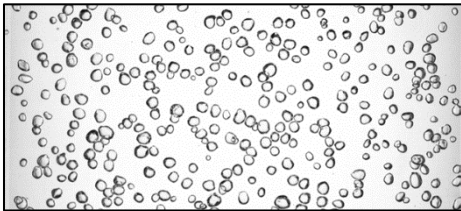
기포와 액체가 구분된 이미지

### 3.3 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

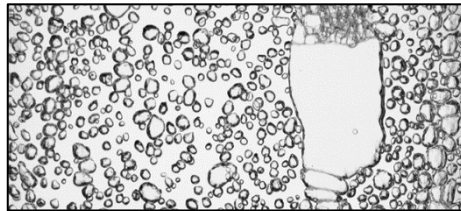
- 비가열 사각 유로 DB 구축 및 모델 개발

- ✓ 좁은 비가열 사각 유로 하향 2상 유동 실험 결과

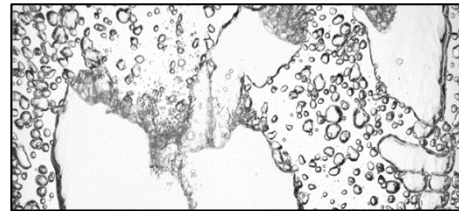
- 상향 유동의 4개 유동 양식과 달리 7개의 유동 양식과 1개의 과도 구간 존재
- 부력, 좁은 유로로 인한 벽면 마찰이 유동 양식에 큰 영향



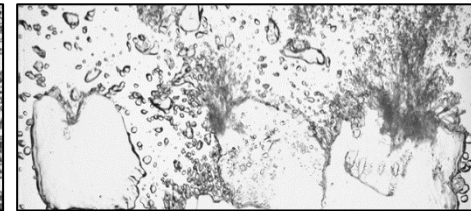
Bubbly flow



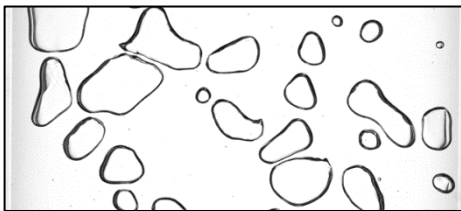
Cap-bubbly flow



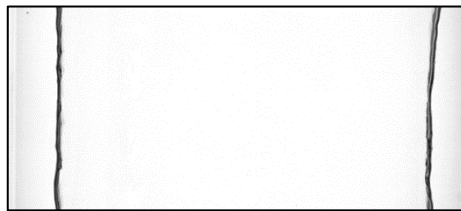
Slug flow



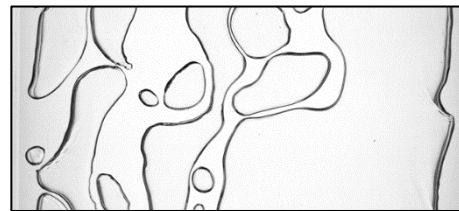
Churn turbulent flow



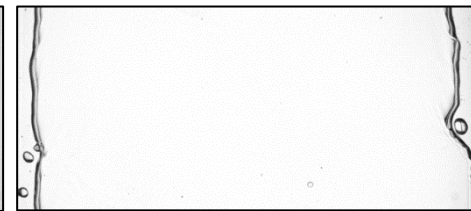
Large-bubbly flow



Falling film flow



Intermediate region

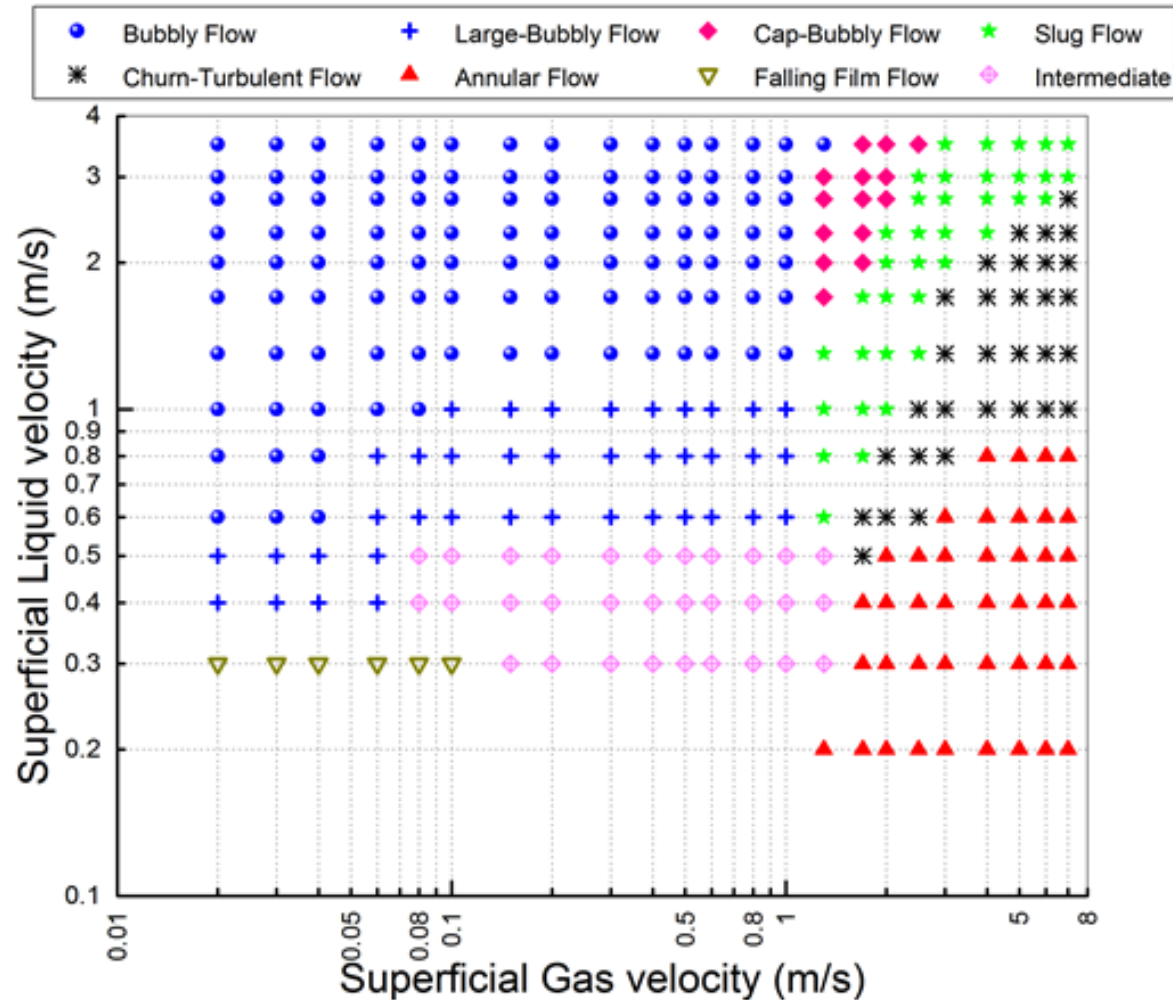


Annular flow

# 3.3 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

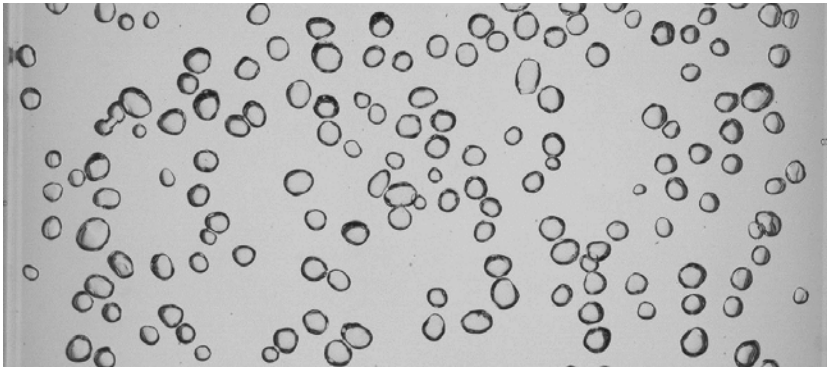
## ● 하향 유동 양식 지도

✓ 2.35 mm 폭의 사각 유로에서 하향 물-공기 2상 유동 양식 지도 작성

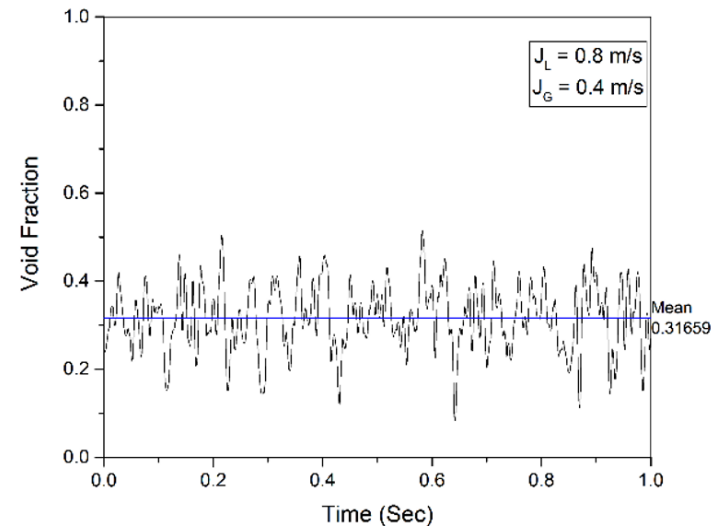
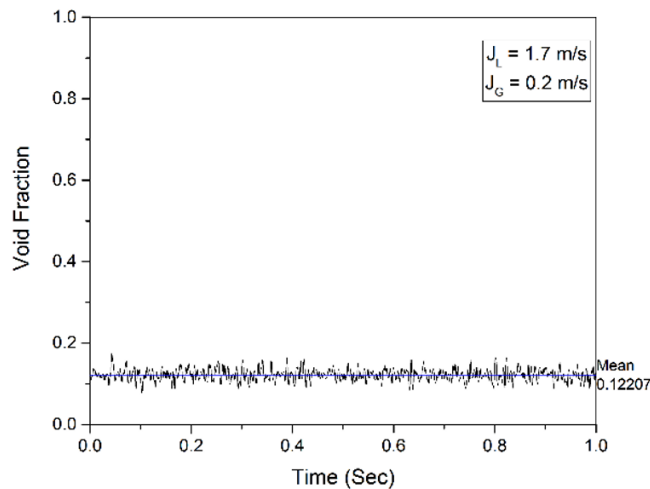
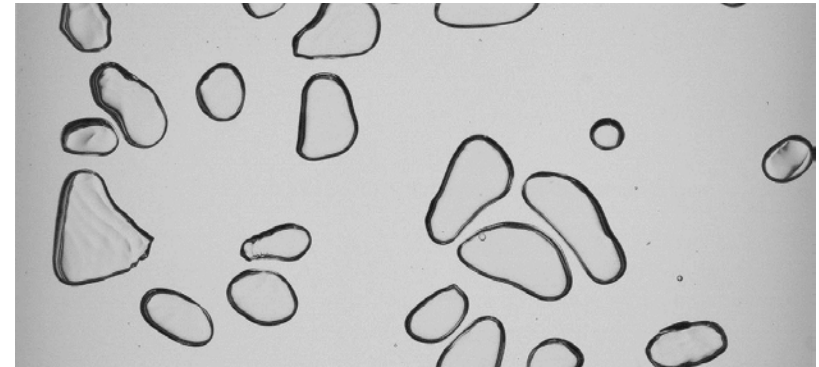


### 3.3 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

Bubbly flow



Large bubbly flow

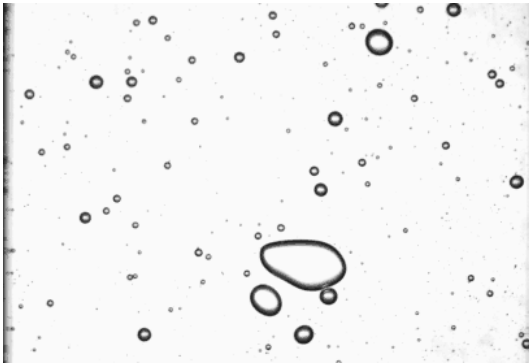


- ✓ **Large bubbly flow:** 기포의 크기가 증가하면 좁은 벽면으로 인해 납작한 형태가 됨
- ✓ 기포의 크기가 불균일하여 기포율 변화가 심함
- ✓ 큰 기포와 벽면 사이 액막 두께 불균일로 기포에 그림자가 생김

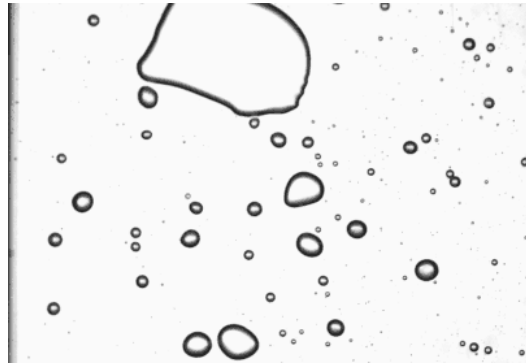


### 3.3 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

Occurrence of counter-current flow



$j_L = 0.4 \text{ m/s}$ ,  $j_G = 0.07 \text{ m/s}$



$j_L = 0.4 \text{ m/s}$ ,  $j_G = 0.1 \text{ m/s}$



$j_L = 0.4 \text{ m/s}$ ,  $j_G = 0.18 \text{ m/s}$

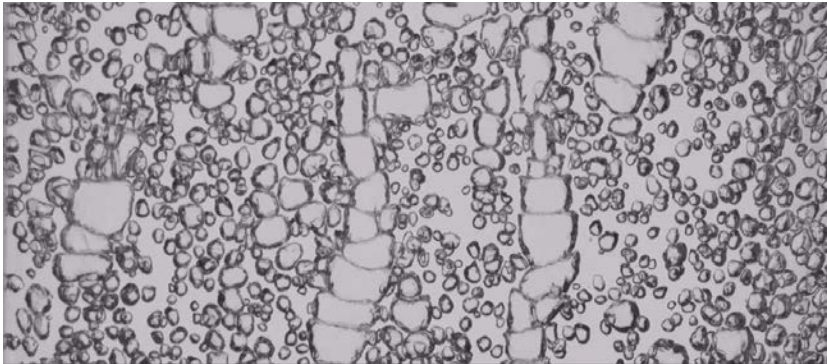
✓ Low liquid flow rate 시,

- Low gas flow 에서는 downward co-current flow
- Gas 유량 증가시 Drag force 와 Buoyancy force 균형을 이루면 기포가 체류
- Gas 유량 증가하면 counter-current flow 형성

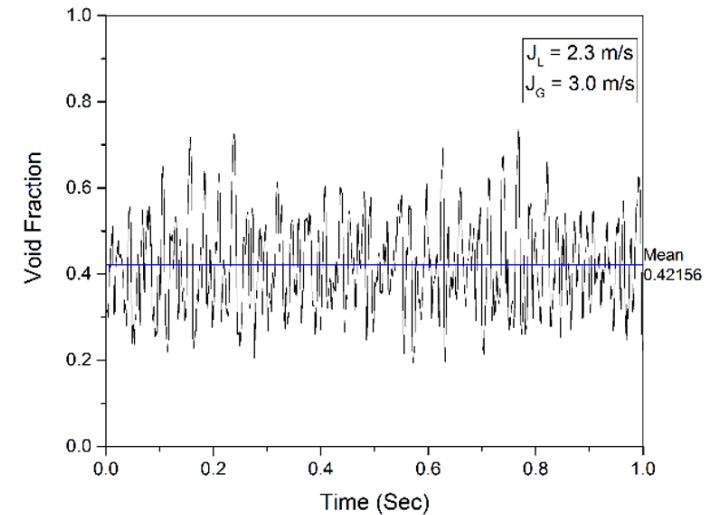
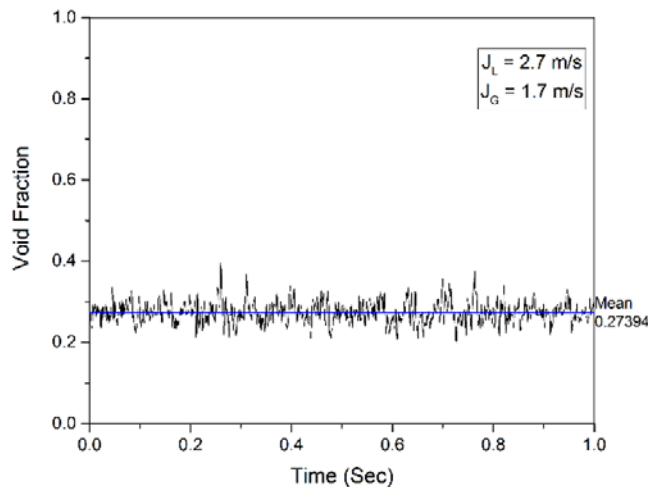
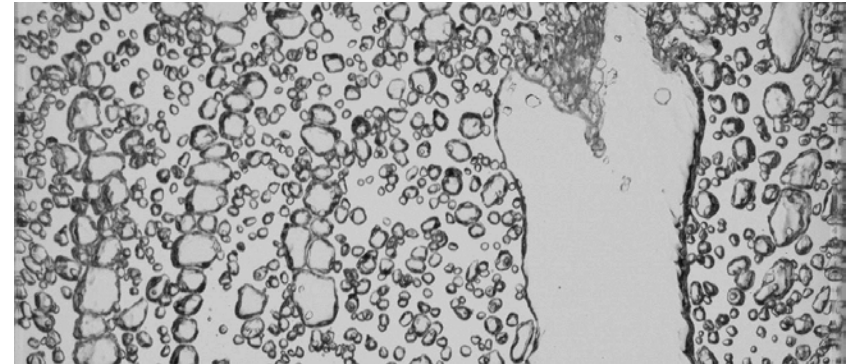


### 3.3 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

Cap-bubbly flow



Slug flow

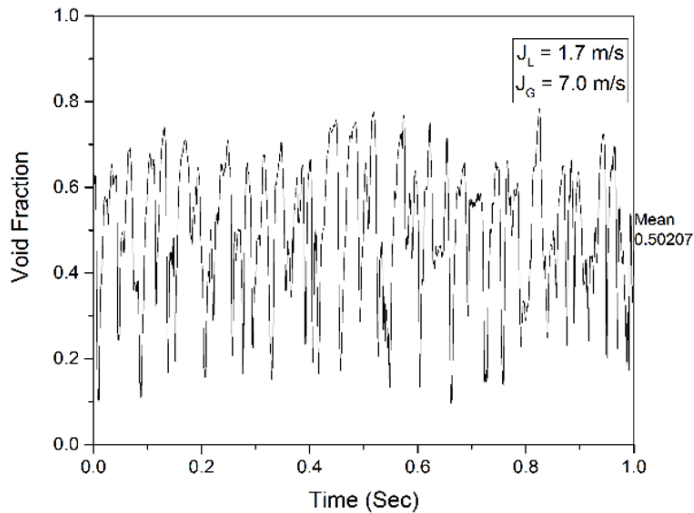
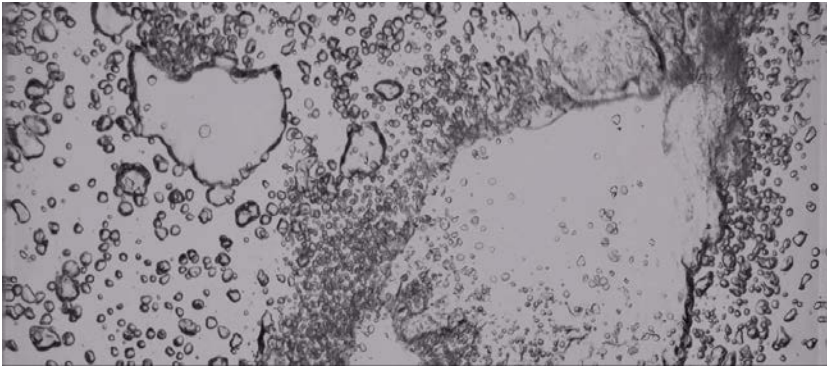


- ✓ Cap-bubbly flow에서는 기포가 비교적 크며 모자를 뒤집어 놓은 듯한 형상
- ✓ Slug flow에서 water bridge가 비교적 선명하여 기포율 변화가 심함
- ✓ Slug flow에서 대형 기포의 크기가 채널 폭의 절반 정도이며 wake 발생

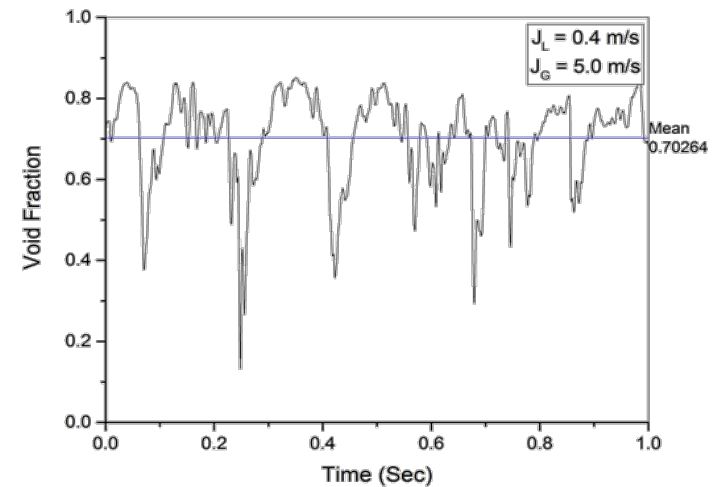


### 3.3 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

Churn-turbulent flow



Annular flow



- ✓ Churn-turbulent에서는 큰 난류로 위치에 따라 속도 fluctuation 이 강함
- ✓ Annular flow 에서도 water bridge 존재

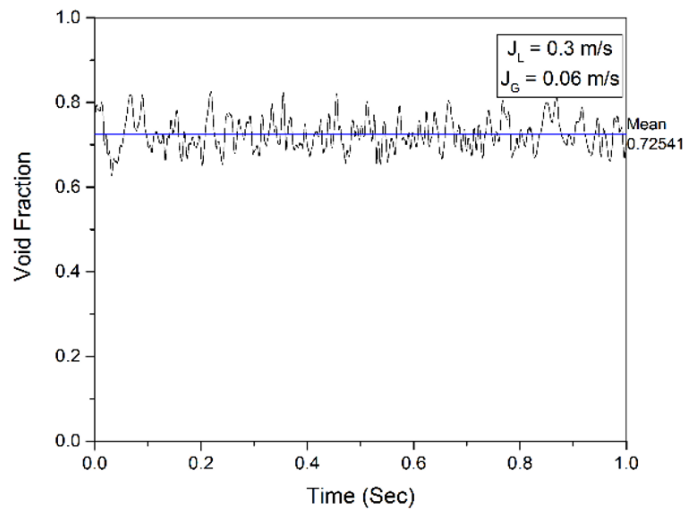


### 3.3 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

Falling film flow



Intermediate



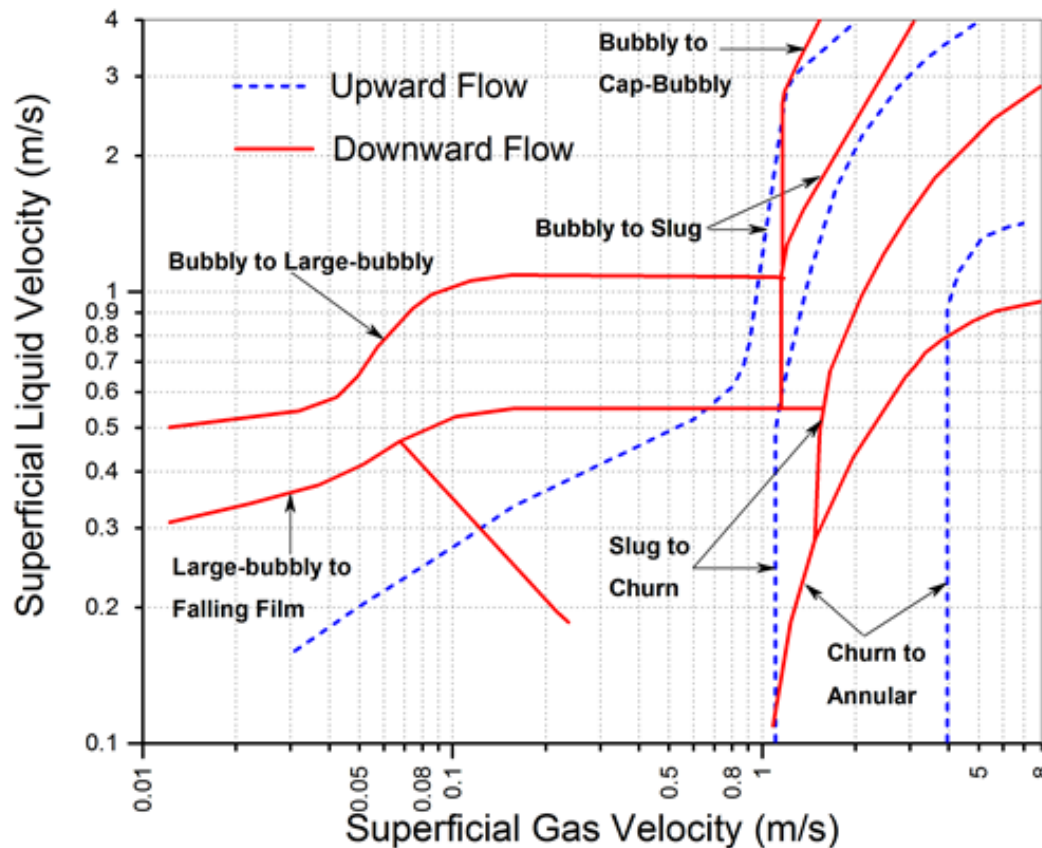
- ✓ Falling film flow: water film on narrow side walls with gas core
- ✓ Intermediate: irregular streak on channel wall



### 3.3 비가열 사각 채널 물-공기 2상 하향 유동

- 상/하향 유동양식 천이 경계 비교

- ✓ In general, transition occurs at higher superficial gas velocity
- ✓ However, transition to annular flow occurs at lower superficial gas velocity

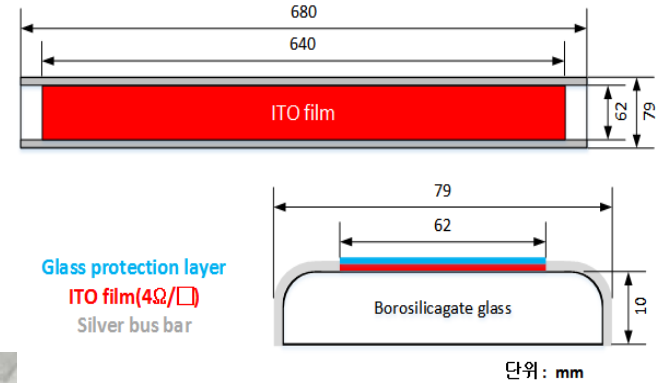


# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

## ● 비등 열전달 실험장치 설계 및 구축

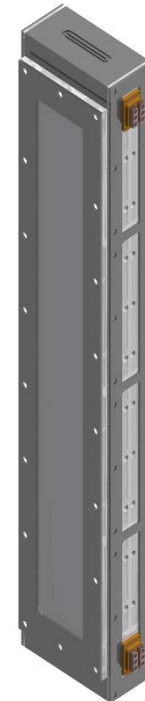
### ✓ 가열부

- 가시화 실험을 위해 투명한 ITO 코팅 유리 히터 사용
- 직류 전원(75V/8000A)을 이용한 직접 Joule 가열 방식
- 가열면적 : 640 x 62mm
- ITO coating 면저항( $4\Omega/m^2$ )
  - 최대 열속 :  $400kW/m^2$



### ✓ 시험부

- KJRR 판형핵연료 부수로와 동일한 유로 크기(66.6x2.35x640mm)
- 주 몸체는 SUS로 제작하였으며  
가시 창은 투명하고 내열성과 전기절연이 뛰어난 PC 로 제작

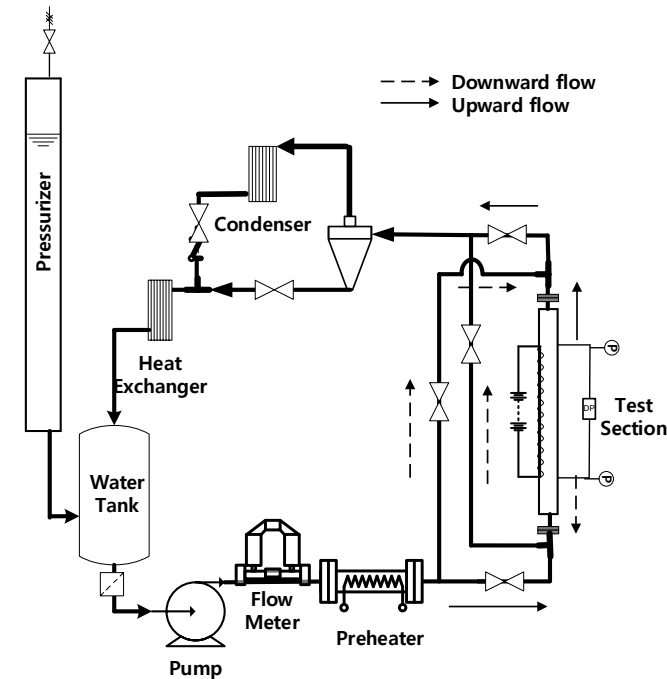


### 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

#### ● 실험 장치 및 실험 조건

- ✓ 좁은 수직 사각 유로 (66.6 x 2.35 x 640mm)
- ✓ 비등유동 가시화를 위해 투명한 ITO 코팅 유리를 히터로 사용
- ✓ 실험 시 유량과 입구 온도는 PID제어를 통해 정밀하게 조절
- ✓ 총 8가지 수직 상향류 과냉 비등 열전달 실험 수행

Exp. Name	$\dot{m}$ [kg/s]	$P_{out}$ [kPa]	$T_{in}$ [°C]	$q''$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Test 01	0.0758	170.05	89.02	88.04
Test 02	0.0749	170.03	95.29	67.97
Test 03	0.0745	170.17	95.90	70.30
Test 04	0.0749	169.92	99.06	51.58
Test 05	0.0747	169.76	98.59	55.52
Test 06	0.1058	170.22	90.02	123.46
Test 07	0.1057	170.04	94.39	100.55
Test 08	0.1057	170.15	99.33	83.85



# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

## ● 측정 변수 및 측정 위치

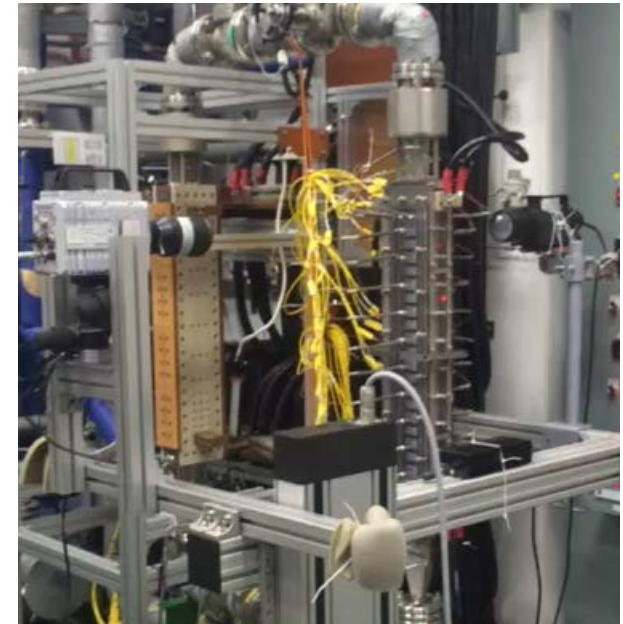
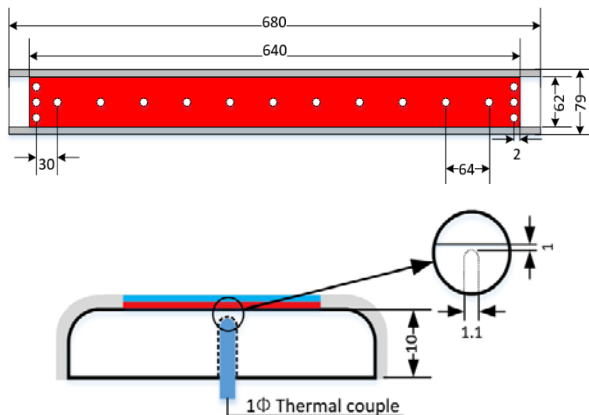
### ✓ 높이별 기포율 및 기포크기

- 초고속 카메라와 3축 이송장치를 이용한 촬영 및 영상처리기법(LabView)

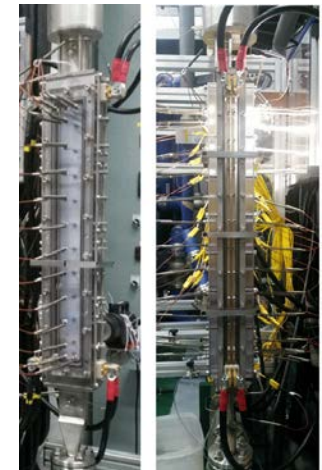
	Distance from the inlet	$L/D_h$
EL01	0.643	141.6
EL02	0.596	131.3
EL03	0.532	117.2
EL04	0.468	103.1
EL05	0.404	89.0
EL06	0.276	60.8
EL09	0.212	46.7

### ✓ 벽면 온도

- 히터 뒷면에 설치된 열전대



	Distance from the inlet	$L/D_h$
TC01	0.658	144.9
TC02	0.628	138.3
TC03	0.564	124.2
TC04	0.5	110.1
TC05	0.436	96.0
TC06	0.372	81.9
TC07	0.308	67.8
TC08	0.244	53.7
TC09	0.18	39.6
TC10	0.116	25.6
TC11	0.052	11.5
TC12	0.022	4.8



# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

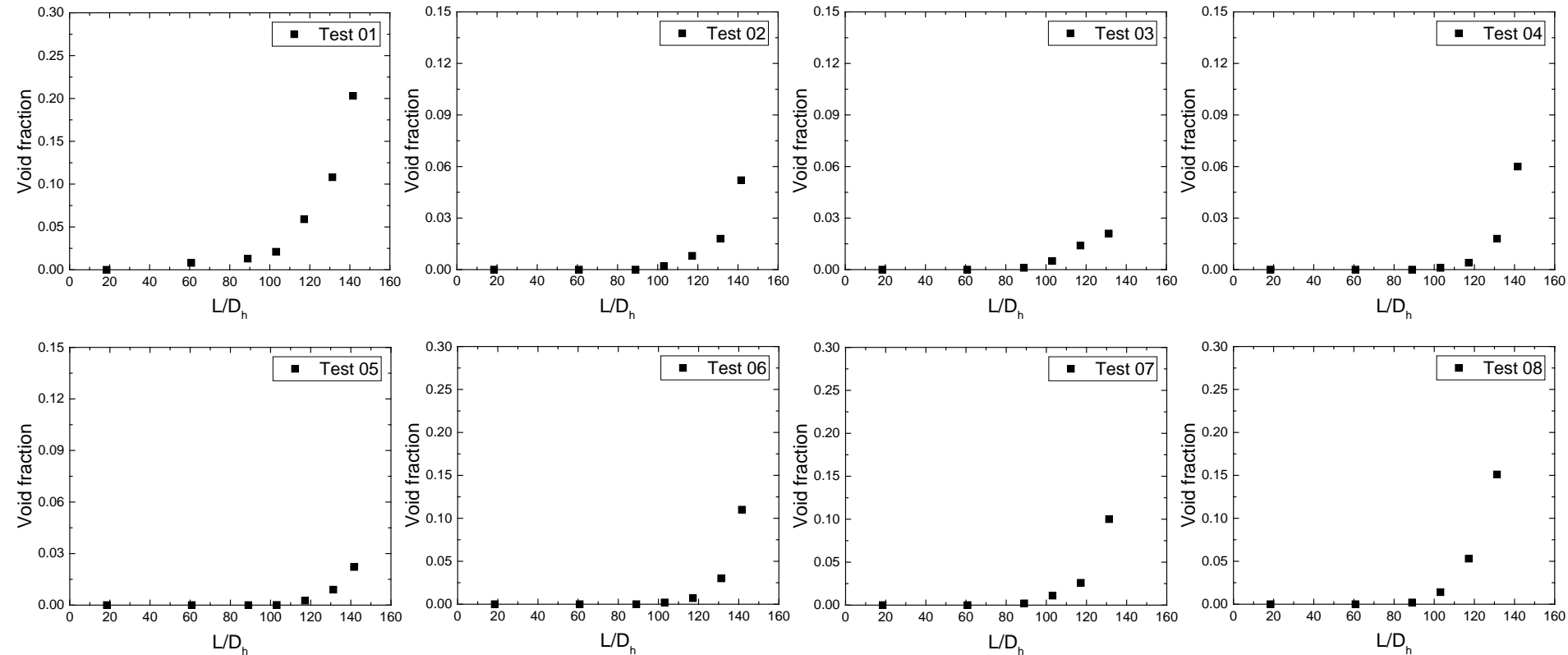
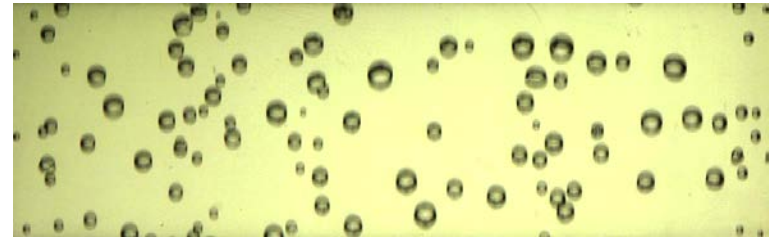
## ● 실험 결과

✓ 높이에 따른 평균 기포율 (Bubly flow)

▪ Test 04, 05는 다른 시편을 사용하여  
유사한 실험조건에서 측정함 수행

- 기포율 차이가 큰 것으로 나타나, 유리 표면 상태에 영향을 받는 것으로 판단됨
- 사용시간 증가에 따라 ITO coating erosion 진행

Test 07 (EL02)

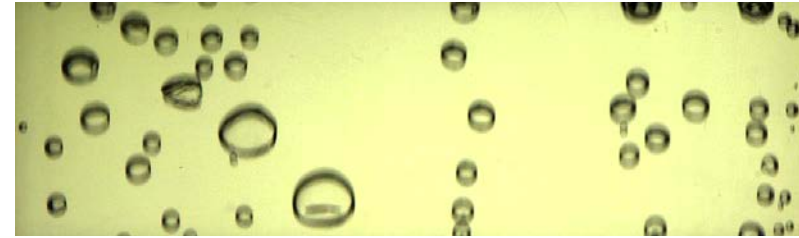


# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

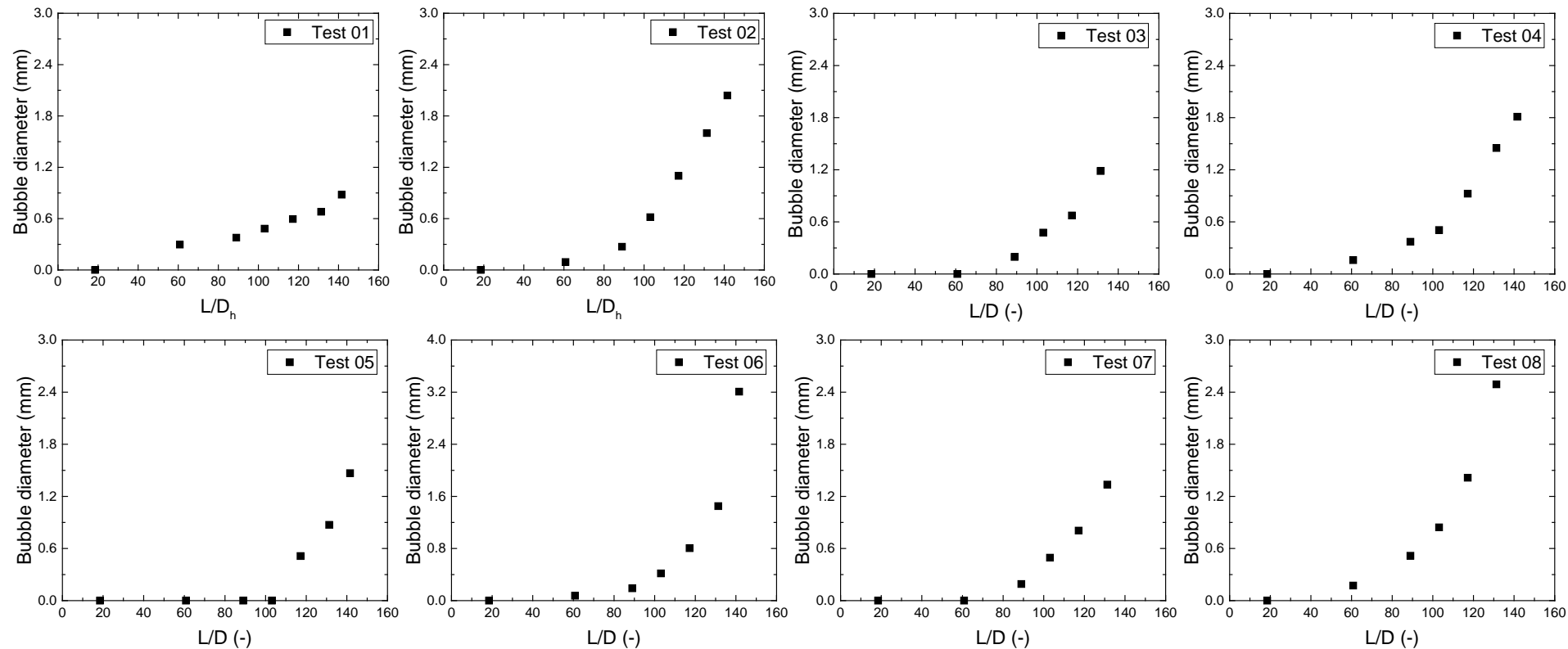
## ● 실험 결과

### ✓ 높이에 따른 평균 기포 크기

- 최대 3mm : 캡버블이 관찰됨
- Test 01의 경우 공동(Cavity)에 갇힌 기포로 인해 기포율이 0인 지점에서도 기포크기가 측정됨



Test 08 (EL02)

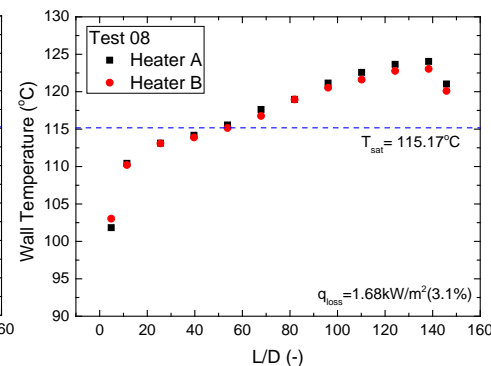
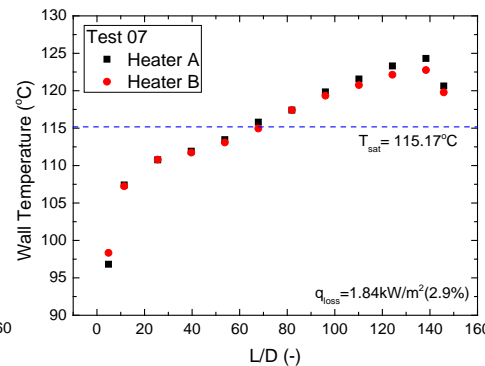
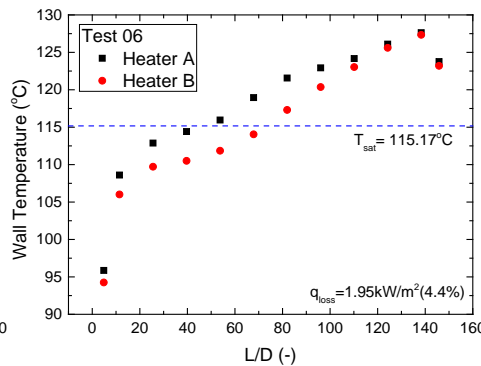
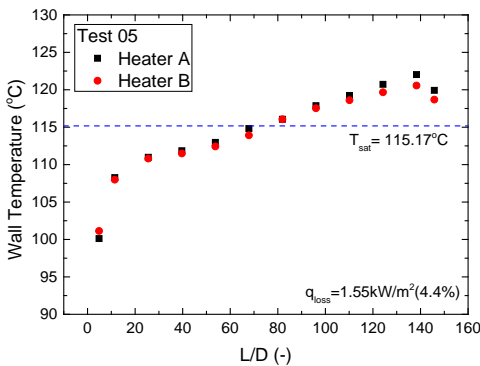
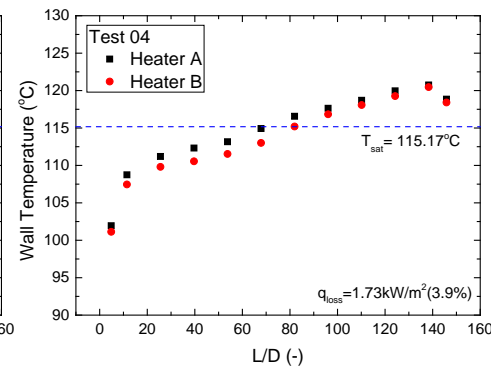
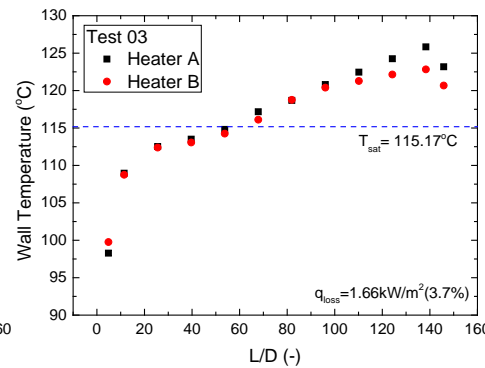
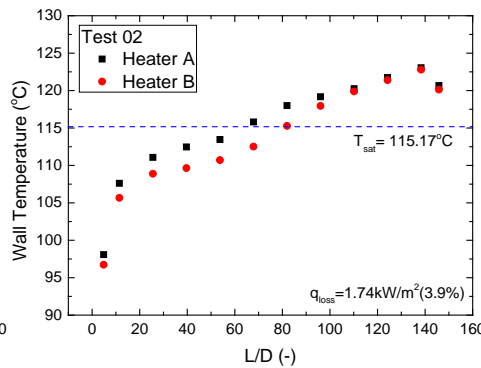
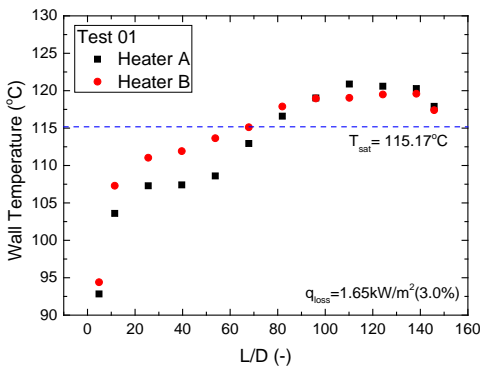
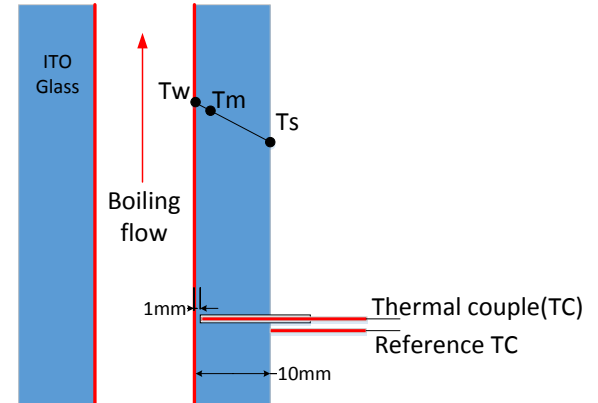


# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

## ● 실험 결과

### ✓ 벽면 온도 분포

- $T_{sat} = 115.17^\circ\text{C}$
- 히터 시작부분과 끝부분에서 온도가 급격히 떨어짐
  - 입구와 비가열 부분의 냉각수가 미치는 영향



# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

## ● 1-D 코드(MARS)를 이용한 비등 열전달 모델 개발

### ✓ 기본 비등 열전달 모델

	NVG Model	Pumping Model	Heat transfer Correlation
Model	SRL (Savannah River Laboratory)		Chen

### ✓ 비등 열전달 모델 평가

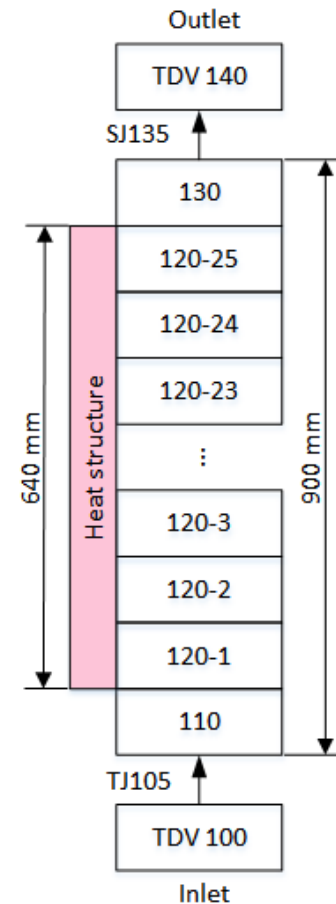
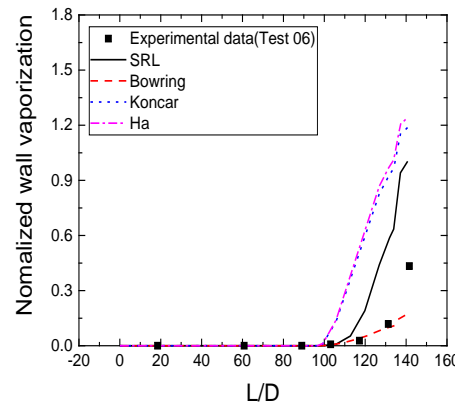
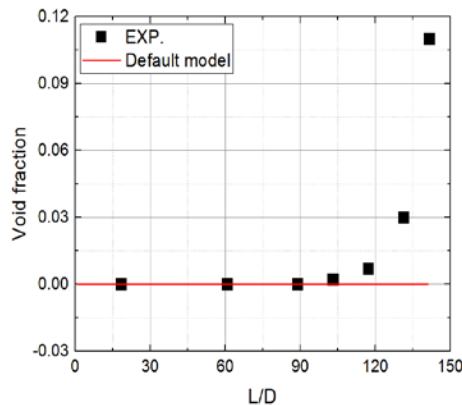
- SRL, Bowring, Koncar, Ha 의 Pumping 모델 평가 : SRL 모델이 가장 근접

### ✓ 비등 열전달 모델 개선

- 사각유로에 적용 가능하도록 NVG 및 Pumping 계수 도입

$$C_{NVG} = 7.0 \quad C_{eps} = 3.0$$

$$h_{cr} = \begin{cases} h_f^s - St \frac{C_{pf}}{0.0055 - 0.0009 \times F_{press}} \times C_{NVG} & \text{for } pe > 70,000 \\ h_f^s - N \frac{C_{pf}}{455} \times C_{NVG} & \text{for } pe \leq 70,000 \end{cases}, \quad \epsilon_{SRL} = \frac{\rho_f (h_f^s - h_f) \times F_{eps} \times C_{eps}}{\rho_a h_{fg}}$$

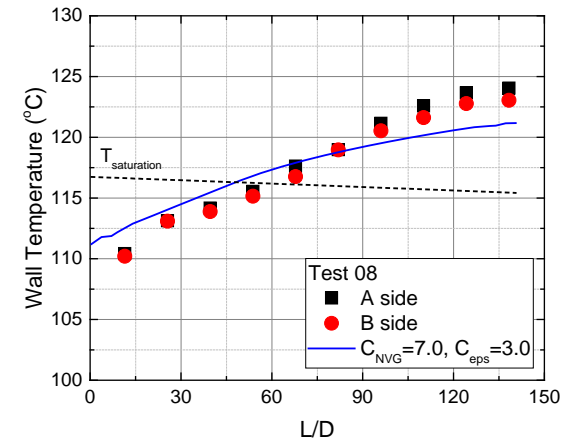
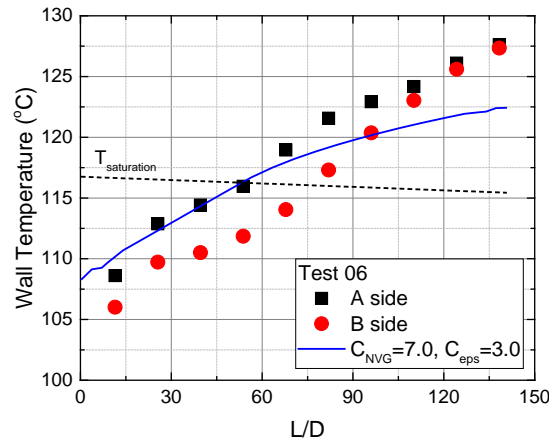
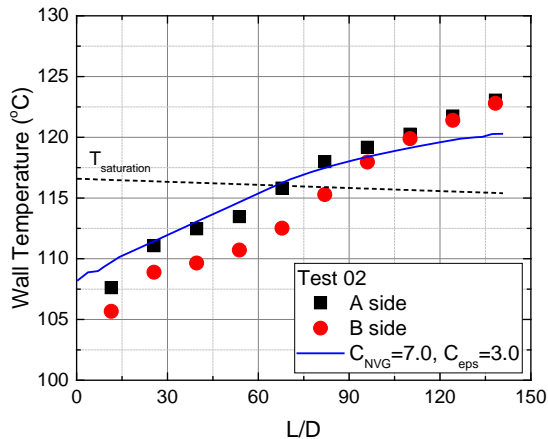
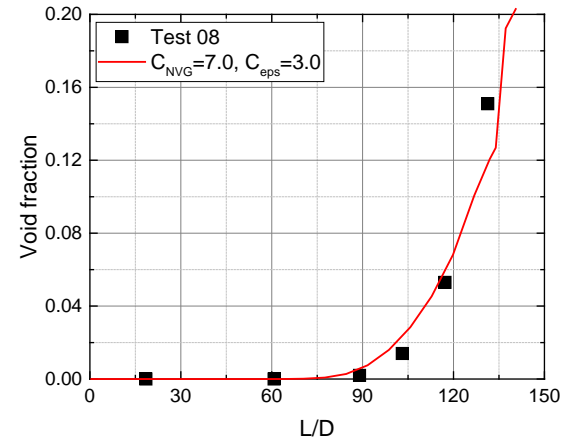
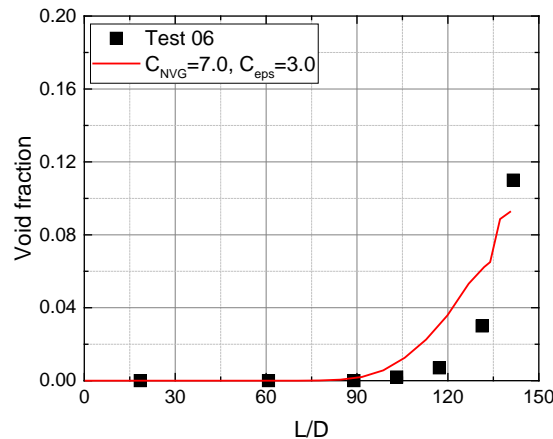
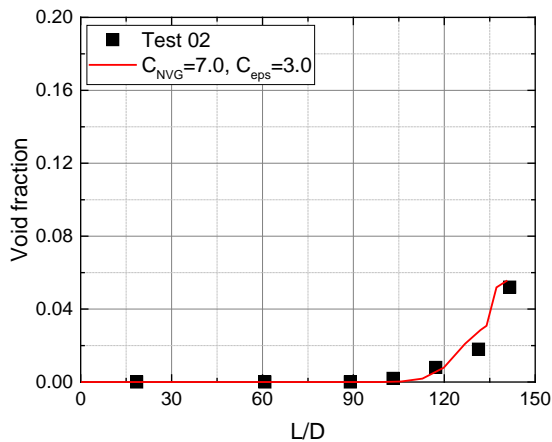


# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

## ● 1-D 코드(MARS)를 이용한 비등 열전달 모델 개발

### ✓ Test 02, 06, 08에 대한 해석결과

- 기포율 변화 예측오차 감소
- 벽면온도 변화율 예측에 약간의 오차 있음

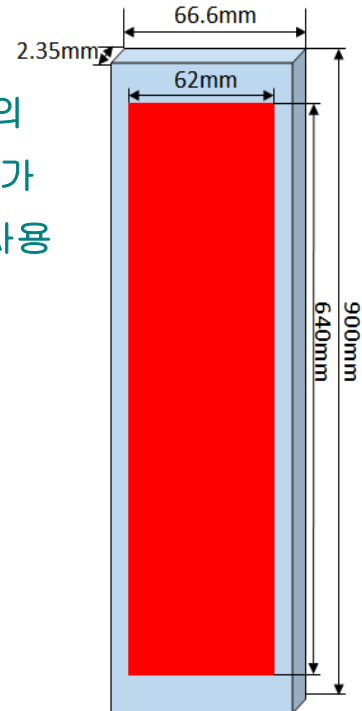


# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

## ● CFD 코드(STAR-CCM+)를 이용한 비등 열전달 모델 평가

### ✓ 3-D 모델링

- 실제 유로에서 입·출구 길이를 추가하여 **66.6 x 2.35 x 900 mm** 사각유로 모의
- 실제 실험과 동일하게 유로의 마주보는 면의 **62 x 640 mm** 부분만 열속을 인가
- 너비 방향으로 **80**등분, 폭 방향으로 **4**등분, 높이 방향으로 **450** 등분한 격자 사용



### ✓ 비등 열전달 모델

#### ▪ Yun 기포 크기 모델 (기존)

- 고압조건의 과냉 비등 실험 데이터를 바탕으로 제시된 실험적 상관식

$$d_{sm} = 39.32\alpha^{0.36} N_{Reb}^{-0.696} N_{\rho}^{0.571} Lo$$

#### ▪ Bak 기포 크기 모델 (기존)

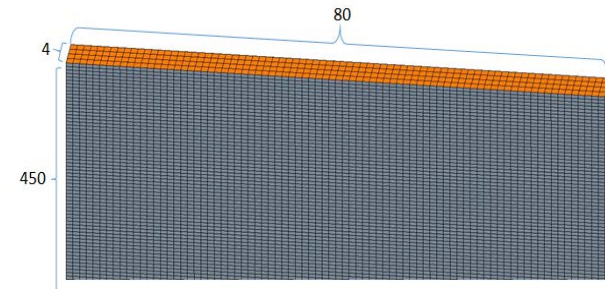
- Yun 모델에 저압조건의 물-공기 유동 실험데이터를 이용하여 최적계수도출
- 고압조건의 과냉 비등 뿐만 아니라 저압조건의 물-공기 유동에 적용 가능

$$d_{sm} = 32.39\alpha^{0.289} N_{Reb}^{-0.529} N_{\rho}^{0.06} Lo$$

#### ▪ 개선된 Bak 기포크기 모델

- Bak 모델에 생산한 실험 데이터를 이용하여 최적 계수 도출

$$d_{sm} = 43.55\alpha^{0.324} N_{Reb}^{-0.572} N_{\rho}^{0.066} Lo$$

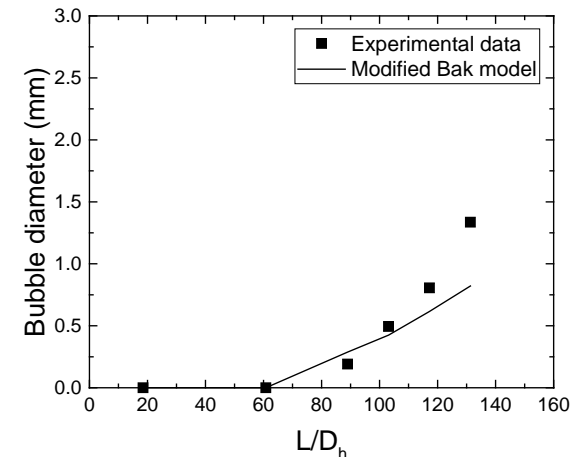
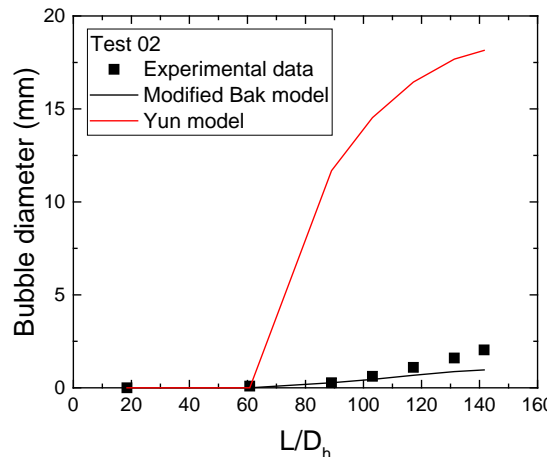
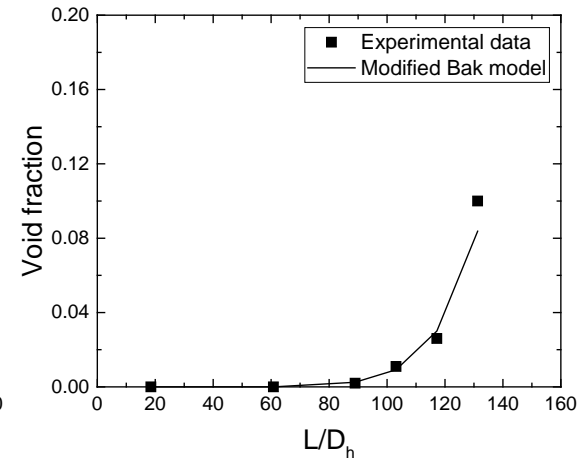
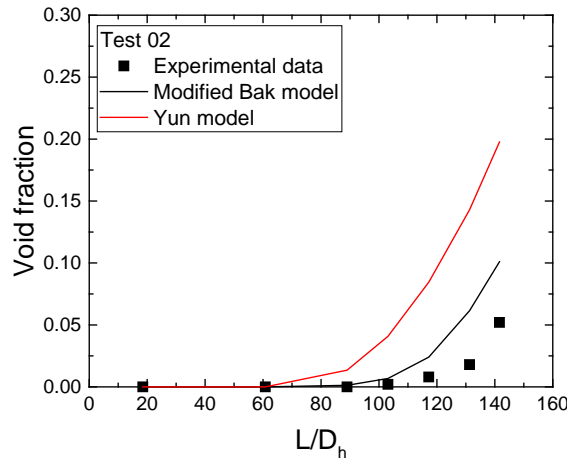
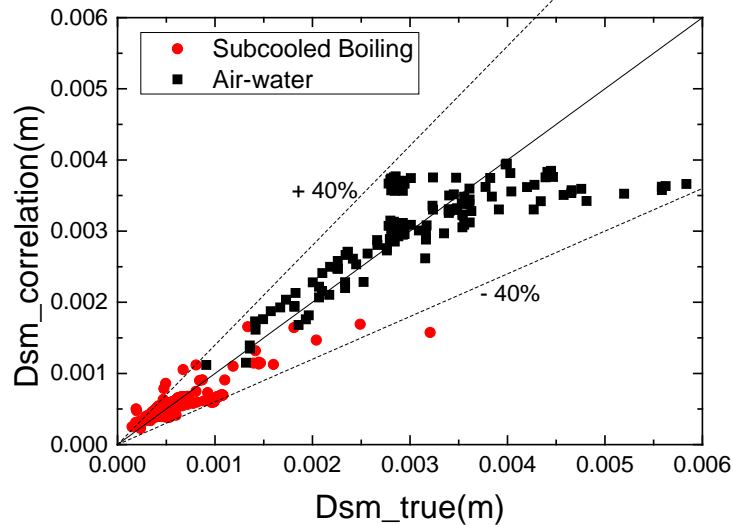


# 3.4 비등 사각 채널 실험 및 비등 모델 개발

## ● CFD 코드(STAR-CCM+)를 이용한 비등 열전달 모델 평가

### ✓ Yun 모델과 개선된 Bak 모델 이용하여 Test 02, 07 실험결과 해석

- 고압조건의 과냉 비등 실험데이터를 바탕으로 개발된 Yun 모델은 저압조건에 적합하지 않음
- 개선된 Bak 모델이 Yun 모델에 비해 예측오차 감소



- 하향류 비등 실험

유속 : **0.5m/s** - 갑작스런 대형 기포 발생(저유속 조건)

$\dot{m}$ [kg/s]	$P_{out}$ [kPa]	$T_{in}$ [°C]	$q''$ [kW/m <sup>2</sup> ]
0.075	170.05	95	54.69



- 열수력 DB 확장
  - ✓ KINS T-H DB, 선행 연구 문헌 등에서 2상 유동 data 획득하여 열수력 DB 확장
- 측정 방법론
  - ✓ 2상 유동 영상 촬영
  - ✓ 영상처리 방법론을 구축하여 유동양식 평가에 활용
- 비가열 사각 유로 유동양식지도 개발 및 모델 개발
  - ✓ 하향 유동양식 평가
  - ✓ 선행 연구자료와 유동양식 비교
  - ✓ 모델 개발 (진행 중)
- 비등 열전달 실험
  - ✓ 내부 유동 가시화 가능한 비등 열전달 실험장치 설계 및 구축
  - ✓ 데이터 생산 / 모델 평가 및 개발
- 중대사고 발생 여부 평가

**감사합니다**

The background is a solid blue color. Overlaid on this are several abstract, flowing lines in various shades of blue and white. These lines curve and sweep across the frame, creating a sense of motion. Three dark blue circles are positioned at different points along these lines, resembling nodes or planets in a stylized orbital system. The overall aesthetic is clean, modern, and professional.

## ● Pool type 연구로의 중대사고 발생여부 평가

냉각기능과 급수기능 상실 조건 (단, 수조의 건전성은 유지)

수조 내의 냉각재 포화시점 산출

$$\Gamma \rho_{l,0} V_{total} (h_{l,sat} - h_{l,0}) = \int_0^{t_1} \dot{q}(t) dt \quad \rightarrow 25 \text{ 시간}$$

decay power ratio@25시간 = 0.62%  $\approx$  1%



부수로 입구 포화시 출구 유동조건 계산

$$(\rho_{l,sat} - \rho_{tp})gH = \int_0^H \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr} dz + \sum_{i=1}^N \Delta P_i \rightarrow X=0.0076 \sim 0.0167 \ll 1$$

$$\dot{m}(h_{exit} - h_{l,sat}) = \dot{q} A$$



임계열속과 핵연료 열속 비교

$$\dot{q}''_{core-avg} \ll \dot{q}''_{CHF} \quad \rightarrow 17.0 \text{ kW/m}^2 \ll 1134.1 \text{ kW/m}^2$$



피복재 온도 계산

$$\dot{q}'' = h_{tp}(T_{clad} - T_{sat}) \quad \rightarrow T_{sup}[^\circ\text{C}] = 0.93 \sim 1.3$$



수조 내의 냉각재 고갈 시점 산출

$$\rho_{l,0} \frac{\pi D^2}{4} (H_{pool} - H_1)(h_{g,sat} - h_{l,sat}) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{q}(t) dt \quad \rightarrow 242 \text{ 시간}(=10 \text{ 일})$$



수위 유지를 위한 냉각수 주입 유량 계산

$$\dot{q} = \dot{m}(h_g - h_{FW}) \quad \rightarrow \dot{m}=0.14 \text{ kg/s}$$

$\rightarrow$  수조의 건전성이 유지된다고 가정하였을 때  
Pool type 연구로에서 중대사고 발생 가능성은 낮음.

## ● Pool type 연구로의 중대사고 발생여부 평가

냉각기능과 급수기능 상실 조건 (단, 수조의 건전성은 유지)

수조 내의 냉각재 포화시점 산출



부수로 입구 포화시 출구 유동조건 계산



임계열속과 핵연료 열속 비교



피복재 온도 계산



수조 내의 냉각재 고갈 시점 산출



수위 유지를 위한 냉각수 주입 유량 계산

$$\rho_{l,0} V_{total} (h_{l,sat} - h_{l,0}) = \int_0^{t_1} \dot{q}(t) dt$$

$$(\rho_{L,sat} - \rho_{tp}) gh = \int_0^H \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr} dz + \sum_{i=1}^N \Delta P_i$$

$$\dot{m} (h_{exit} - h_{l,sat}) = \dot{q}'' A$$

$$\dot{q}_{CHF}'' = ?$$

$$\dot{q}'' = h_{tp} (T_{clad} - T_{sat})$$

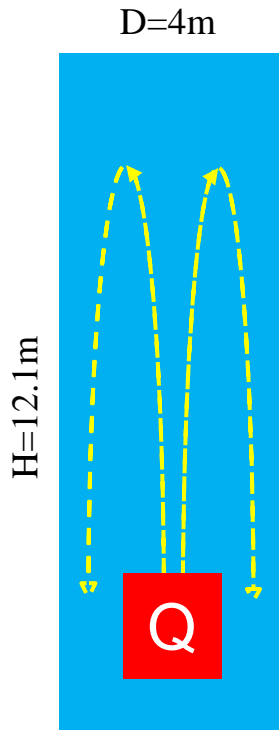
$$\rho_{l,0} \frac{\pi D^2}{4} (H_{pool} - H_1) (h_{g,sat} - h_{l,sat}) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{q}(t) dt$$

$$\dot{q} = \dot{m} (h_g - h_{FW})$$

## ● Pool type 연구로의 중대사고 발생여부 평가

### ✓ 수조 내의 냉각재 포화시점 산출

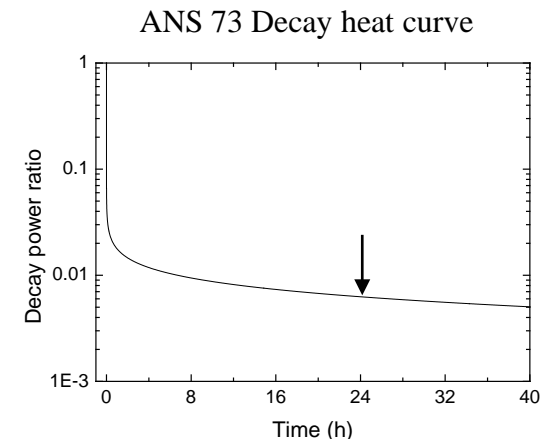
- 수조 내의 냉각재에 대해 열평형 계산을 수행하여 냉각재가 포화온도에 도달하는 시점 계산
- 냉각재 포화시점 의 **decay power ratio** 산출



$$\Gamma \rho_{L,0} V_{total} (h_{L,sat} - h_{L,0}) = \int_0^{t_1} \dot{q}(t) dt$$

$\Gamma$ : 전체 재고량 중 자연순환 하는 냉각재 비율(0.8로 가정)

Power[MWth]	30
Decay heat curve	ANS 73 x 1.2
Initial temperature [°C]	40
Coolant volume [m³]	152
Coolant mass [kg]	150,881



약 25 시간 후 수조 온도 비등점(1bar 기준) 도달  
decay power ratio@25시간 = 0.62%  $\approx$  1%

## ● Pool type 연구로의 중대사고 발생여부 평가

### ✓ 부수로 입구 포화시 출구 유동조건 계산

#### ▪ Momentum, Energy equation 연계 계산

Momentum  $(\rho_{L, sat} - \rho_{tp})gH = \int_0^H \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr} dz + \sum_{i=1}^N \Delta P_i$

Energy  $\dot{m}(h_{exit} - h_{L, sat}) = \dot{q}'' A$

Two-phase Density

$$\rho_{tp} = \left( \frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right)^{-1}$$

Frictional Pressure Drop

$$\int_0^H \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr, L0} dz = \Phi_{L0}^2 f_{L0} \frac{1}{2} \frac{H}{D_H} \frac{G^2}{\rho_L}$$

$$\Phi_{L0}^2 = \left[ 1 + x \frac{\mu_L - \mu_G}{\mu_G} \right]^{-0.25} \left[ 1 + x \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) \right] \quad \text{HM model (Homogenous Mixture)}$$

$$\Phi_{L0}^2 = A + 3.24x^{0.78} (1-x)^{0.24} \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.91} \left( \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.19} \left( 1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.7} Fr^{-0.0454} We^{-0.035}$$

Friedel (1979)

$$\int_0^H \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr, L} dz = \Phi_L^2 f_L \frac{1}{2} \frac{H}{D_H} \frac{G(1-x)^2}{\rho_L} \quad \Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad X = \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0.1} \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9}$$

Chisholm (1967)

Local Pressure Drop

$$\sum_{i=1}^N \Delta P_i = (K_{BEP} + K_{TEP} + K_{sp}) \frac{1}{2} \frac{G^2}{\rho_L}$$

$$* K_{BEP} = 1.10189 \text{Re}_L^{-0.12863}$$

$$K_{SP} = 2.30164 \text{Re}_L^{-0.08324}$$

$$K_{TEP} = 1 - 1.04983 \text{Re}_L^{0.00866}$$

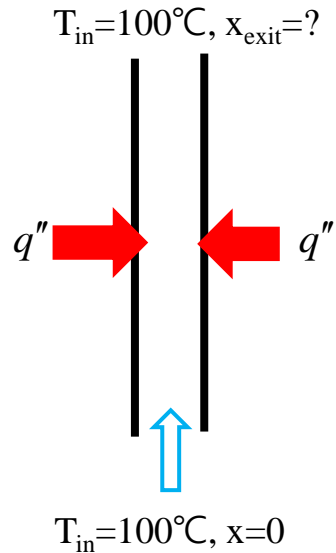
TEP, BEP: 상•하부 봉단 접합판  
SP: 간격체(Spacer)

\*하나로 노심의 열수력 해석을 위한 기본 자료 생산 및 압력 손실계수 평가, 1999.

## ● Pool type 연구로의 중대사고 발생여부 평가

✓ 부수로 입구 포화시 출구 유동조건 계산

▪ Momentum, Energy equation 연계 계산



\*

Core average heat flux[kW/m <sup>2</sup> ] (fin base)	1697.6
Core average heat flux[kW/m <sup>2</sup> ] (fin base) @ (Decay power 1%)	<b>17.0</b>
Heated diameter[mm]	11.3
Hydraulic diameter[mm]	6.8
Heated length[mm]	700.0

Momentum  $(\rho_{L, sat} - \rho_{tp})gH = \int_0^H \left( -\frac{\partial P}{\partial z} \right)_{fr} dz + \sum_{i=1}^N \Delta P_i$

Energy  $\dot{m}(h_{exit} - h_{L, sat}) = q'' A$

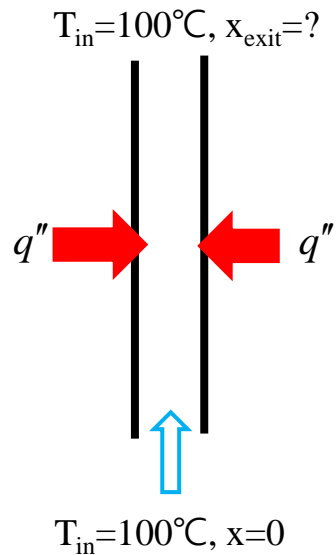
Correlation	X(quality)	Void fraction	Mass flux [kg/m <sup>2</sup> s]
HM model	0.0117	0.950	440.4
Chisholm	0.0076	0.926	680.5
<b>Friedel</b>	<b>0.0167</b>	<b>0.965</b>	<b>308.3</b>

부수로 출구에서 **Dry out** 발생 안 함.

\*하나로 노심의 열수력 해석을 위한 기본 자료 생산 및 압력 손실계수 평가, 1999.

## ● Pool type 연구로의 중대사고 발생여부 평가

- ✓ 임계열속과 핵연료 열속 비교
- ✓ 피복재 온도 계산



Core average heat flux[kW/m <sup>2</sup> ] (fin base)	1697.6
Core average heat flux[kW/m <sup>2</sup> ] (fin base) @ (Decay power 1%)	<b>17.0</b>
Heated diameter[mm]	11.3
Hydraulic diameter[mm]	6.8
Heated length[mm]	700.0

Correlation	X(quality)	Void fraction	Mass flux [kg/m <sup>2</sup> s]
Friedel	0.0167	0.965	308.3

<임계열속>

Correlation	$q''_{CHF}$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Modified Zuber (from RELAP5/HANARO)	1100.8
Chang et al. (1991)	1134.1

$$q''_{core\_avg} (= 17.0 \text{ kW} / \text{m}^2) \ll q''_{CHF}$$

<피복재 과열도>

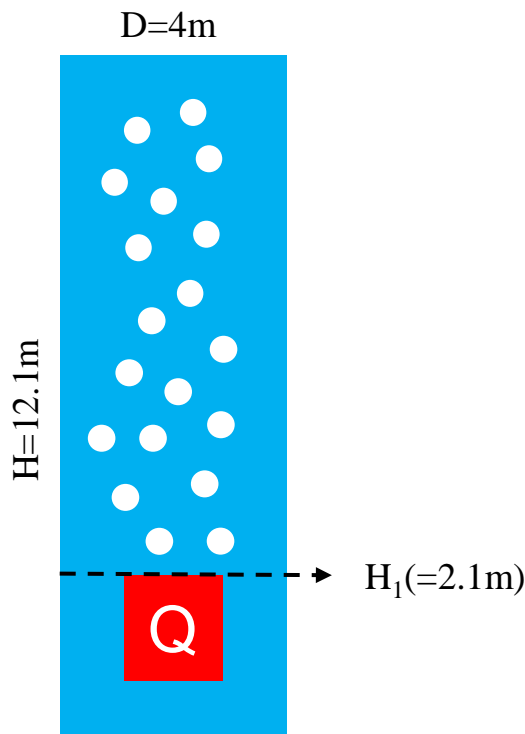
$$q'' = h_{Chen} (T_{clad} - T_{sat}) \quad \text{Chen correlation (1966)}$$

$$T_{sup} = 1.3^\circ\text{C}$$

부수로 내 CHF 발생 안 함.  
피복재 건전성 유지.

## ● Pool type 연구로의 중대사고 발생여부 평가

- ✓ 수조 내의 냉각재 고갈 시점 산출
- ✓ 수위 유지를 위한 냉각수 주입 유량 계산



$$\rho_{L,0} \frac{\pi D^2}{4} (H_{pool} - H_1) (h_{g,sat} - h_{l,sat}) = \int_{t_1}^{t_2} \dot{q}(t) dt$$

$t_1$  = 부수로 입구 포화시점 (=25h)

$\dot{q}(t)$  = 1% Decay heat (=300kW), Decay heat이  $t_1$  이후 유지된다고 가정

연구로 정지 후 242시간(=10일) 후  
수조 내의 냉각재 83% 고갈

$$\dot{q} = \dot{m} (h_g - h_{FW})$$

$h_{FW}$  = 주입수 엔탈피 (대기압, 상온조건)

수위 유지를 위한 냉각수 주입 유량  
→ 0.14 kg/s

## ● Pool type 연구로의 중대사고 발생여부 평가

냉각기능과 급수기능 상실 조건 (단, 수조의 건전성은 유지)

수조 내의 냉각재 포화시점 산출

25 시간  
decay power ratio@25시간 = 0.62%  $\approx$  1%

부수로 입구 포화시 출구 유동조건 계산

$X=0.0076\sim0.0167 \ll 1$

임계열속과 핵연료 열속 비교

$q''_{core-avg} \ll q''_{CHF}$   
@25h  
 $17.0 \text{ kW/m}^2 \ll 1100.8 \text{ kW/m}^2$

피복재 온도 계산

$T_{sup}[^{\circ}\text{C}] = 1.3$

수조 내의 냉각재 고갈 시점 산출

242시간(=10 일)

수위 유지를 위한 냉각수 주입 유량 계산

$\dot{m} = 0.14 \text{ kg/s}$

→ 수조의 건전성이 유지된다고 가정하였을 때  
**Pool type 연구로에서 중대사고 발생 가능성은 낮다.**



# 연구로 고신뢰도 계측제어 기술 개발

연구로를 위한 요소기술 개발 현황

---

2016.10.26

과제 책임자: 경희대학교 허균영

참여 연구원: 중부대학교 손한성

# INDEX

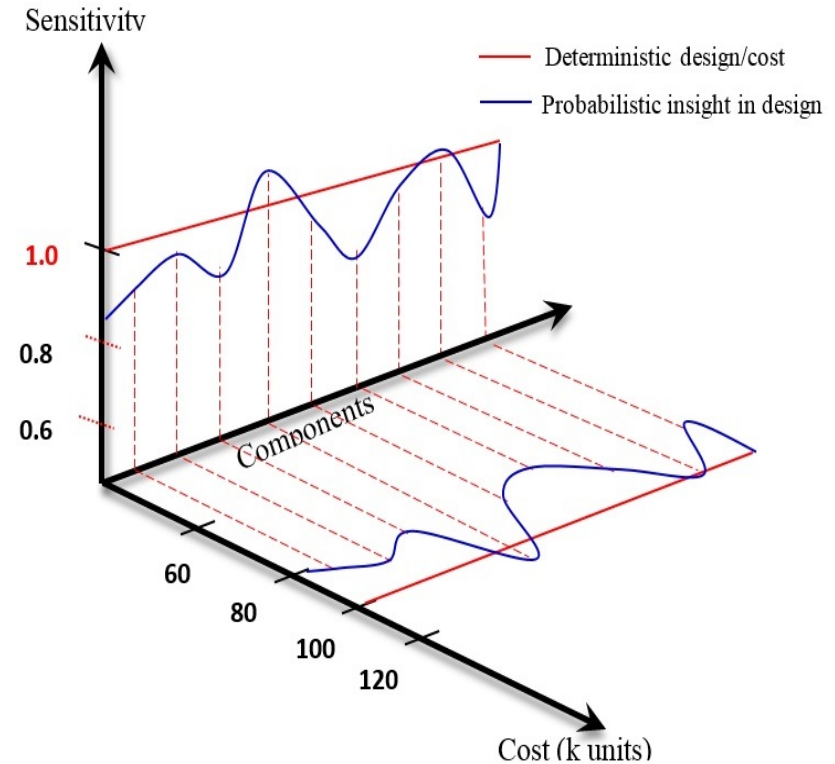
1. 연구로 계측제어시스템 아키텍처 최적화
2. 연구로 사이버보안 평가
3. 연구로 운전지원시스템 개발

# 연구로 계측제어시스템 아키텍처 최적화

▪ 목표: 연구용 원자로의 **비용과 안전**을 충족시키기 위한 최적화된 계측제어시스템 도출

▪ 방법: **확률론적 접근법**을 통해 설계 비용 최적화에 도달

- I. **BBN**(Bayesian Belief Network)을 활용한 신뢰도 분석
- II. **Reliability Index**를 통한 비용-신뢰도 최적화
- III. **아날로그/디지털 기기**를 고려한 계측제어시스템



# 연구로 계측제어시스템 아키텍처 최적화

- Case별 원자로보호계통 아키텍처 BBN 모델 구성
  - 총 4가지 비교 아키텍처 구성
  - 아키텍처 별 이용불능도와 비용 평가
- 확률론적 접근법을 통해 이용불능도와 비용이 가장 낮은 아키텍처 도출 가능

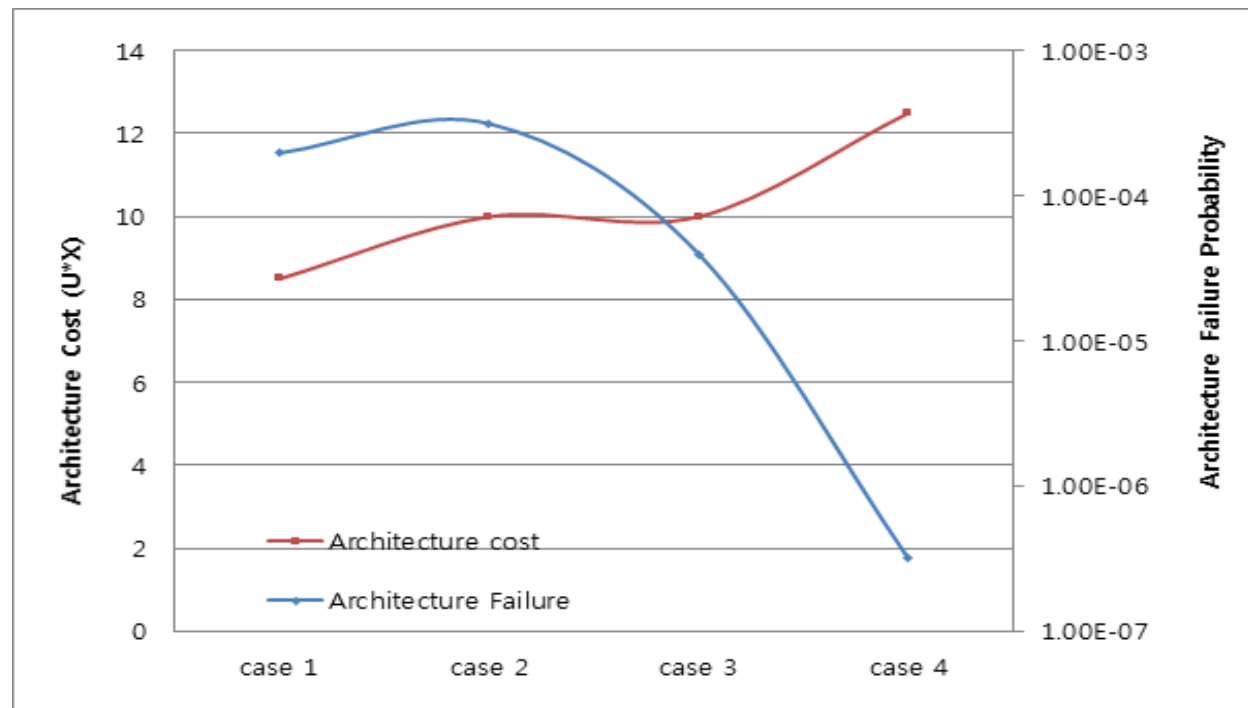
Reliability Index (RI)

$$RI_j = \frac{P_j - P_1}{U_j - U_1}$$

$U_j$  : Cost of jth comparative architecture

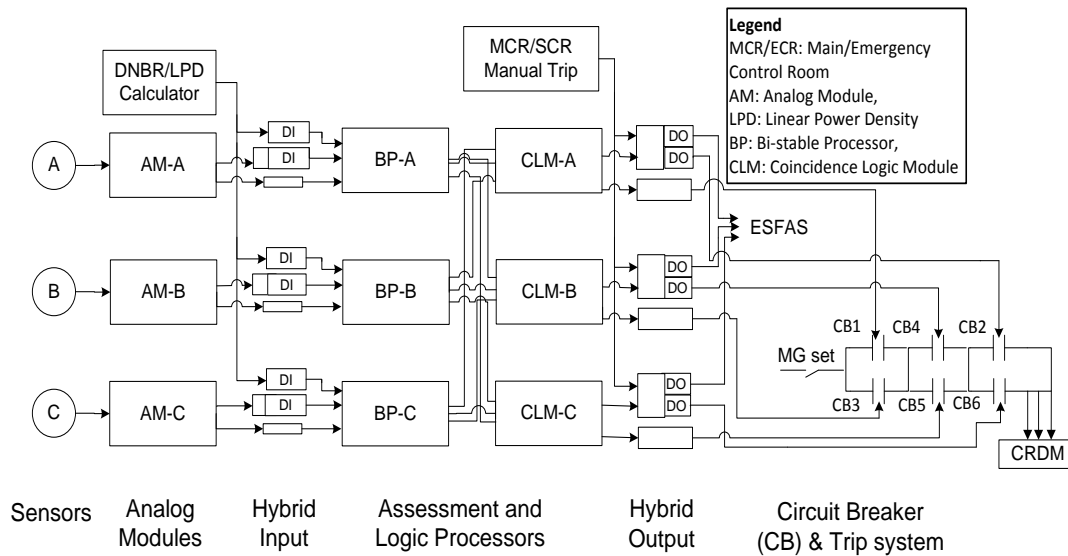
$P_j$  : Success probability of jth comparative architecture

$U_1, P_1$  : Cost and success probability of a reference case

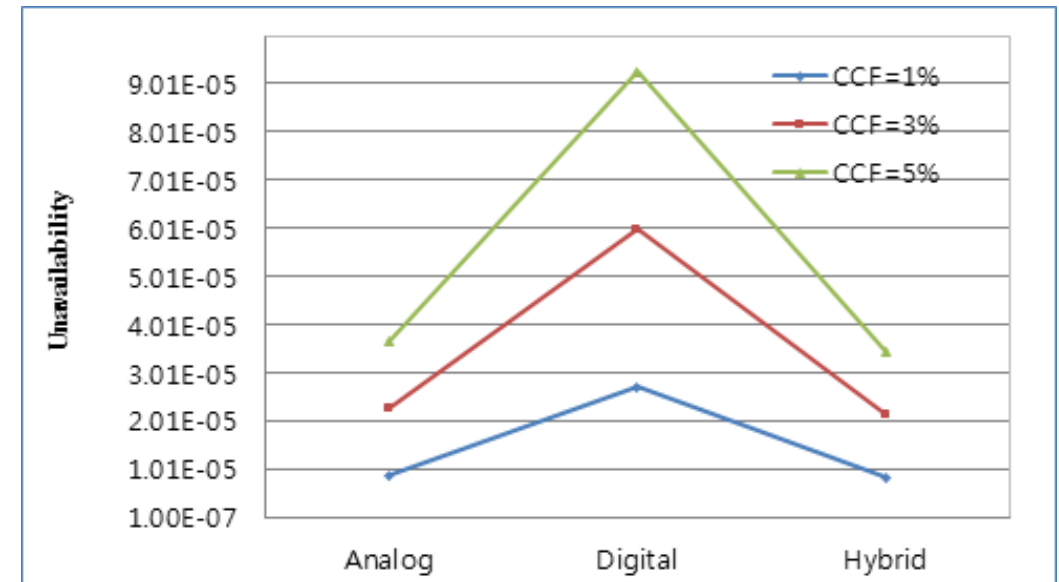


# 연구로 계측제어시스템 아키텍처 최적화

- 아날로그/디지털/하이브리드 원자로보호계통 분석
  - 선행 연구 사례(Q series, Eagle 21 등)를 통해 하이브리드 계측제어시스템 제안
- 각 원자로보호계통의 CCF를 고려한 이용불능도 계산
  - 디지털 아키텍처의 이용불능도가 가장 ↑
  - 하이브리드 아키텍처의 경우 디지털 아키텍처보다 이용불능도 ↓



Hybrid Architecture

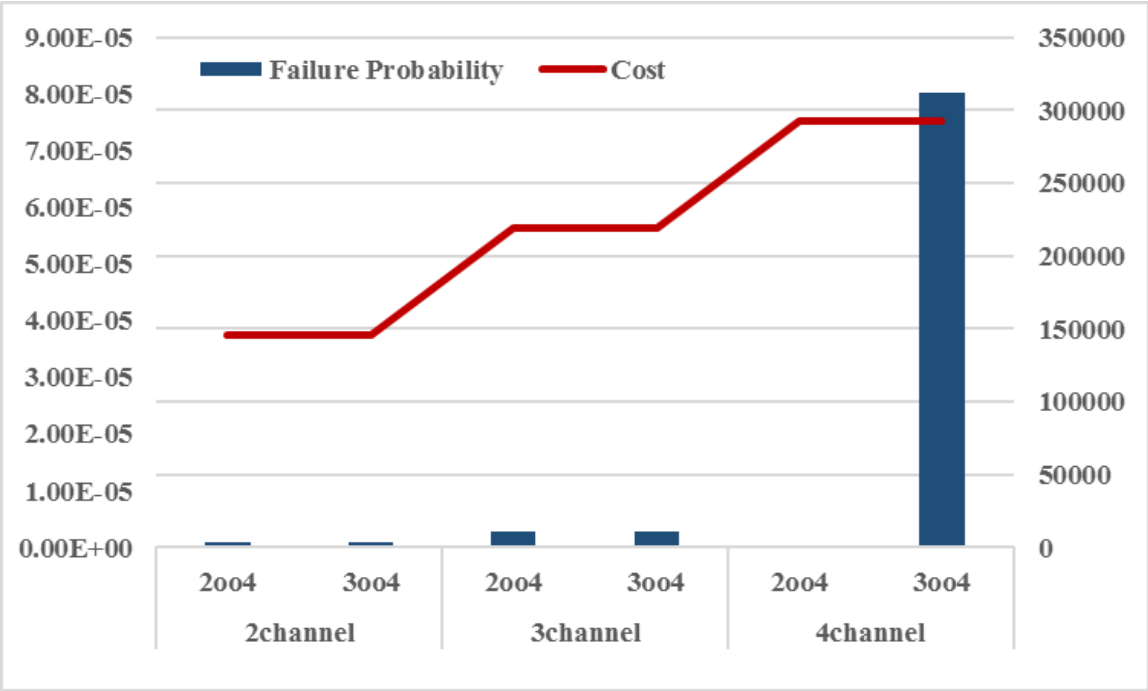


# 연구로 계측제어시스템 아키텍처 최적화

## ▪ TRIGA 사례 연구

- TRIGA의 RPS를 기본으로 다양한 아키텍처 생성
- 실제 TRIGA RPS에 사용된 실질적인 비용 정보 확보
- Digital BP의 고장률과 비용정보 고려
- Case Study 사례에 대한 결과로써 4채널, 2 out of 4 아키텍처가 비용 대비 가장 효율적이라는 결과 도출 가능

구성 기기	상대 비용
Relay (Analog)	
BP (Digital)	
CP (Analog)	
CP (Digital)	
IC (Analog)	
AC (Analog)	
TT (Analog)	

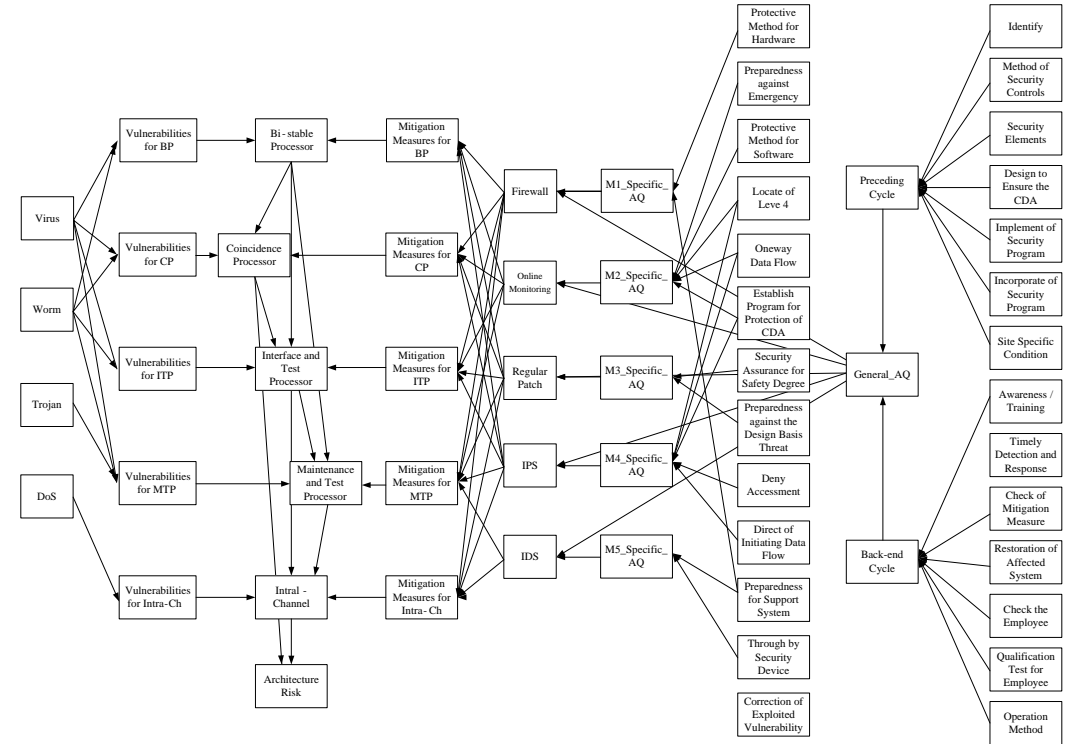


	Base	2 Channel		3 Channel		4 Channel	
		2004	3004	2004	3004	2004	3004
Reliability	-	-5.0	-5.1	-1.2	-1.2	<b>7.45</b>	-2.7
Index	-	E-12	E-12	E-11	E-11	<b>E-13</b>	E-10

# 연구로 사이버보안 평가

- 목표: 연구용 원자로의 특성을 고려한 **사이버보안 모델** 개발 및 연구로에 최적화 된 **사이버보안 요소** 도출
- 방법: **상용로 및 연구로 아키텍처**가 반영된 사이버보안 평가모델을 개발하고, **Bayesian update**를 통해 두 모델간 사이버보안 평가 결과의 차이 분석

- I. 사이버보안 **활동품질** 분석모델
- II. 사이버보안 **아키텍처** 분석모델
- III. 사이버보안 **평가모델**



# 연구로 사이버보안 평가

## ■ 사이버보안 활동품질 분석모델

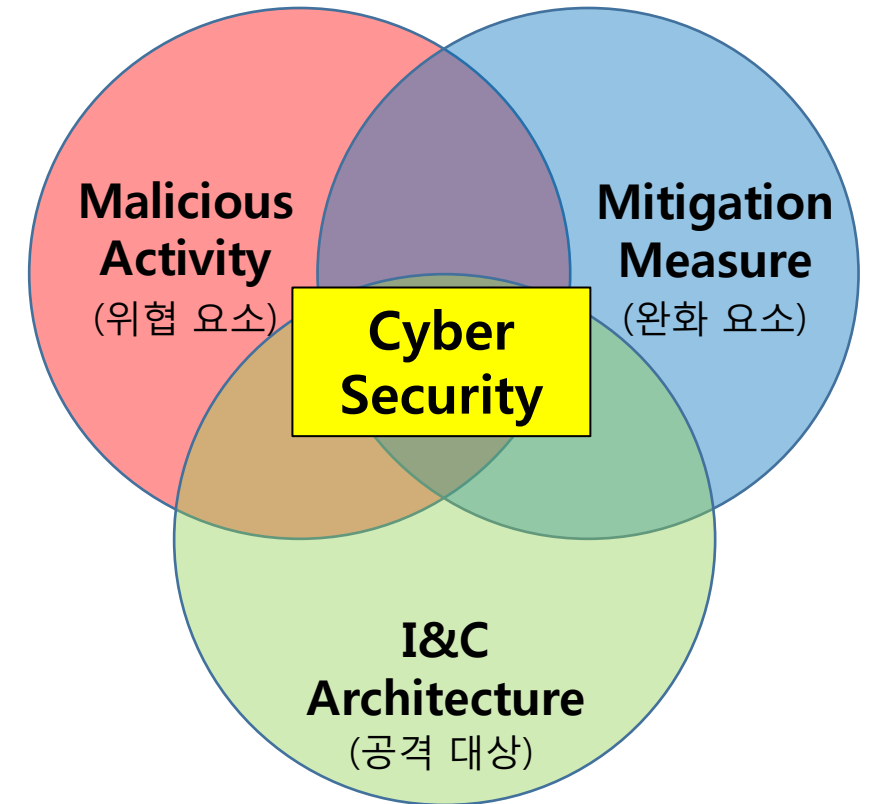
- 사이버보안 관련 규제지침의 수행 정도를 분석하는 모델
- 사이버보안의 규제지침 이행 정도는 전체적인 사이버보안에 영향을 줄 수 있음
- 규제지침이 잘 지켜지면 활동품질(Activity-Quality)가 향상되고, 사이버보안의 위험성이 낮아지게 됨
  - KINAC/RS-015 기준
  - 사이버보안 생명주기와 매칭 작업 수행
  - 101개의 체크리스트 작성
  - 이행 정도는 제시된 표를 기준으로 평가
  - 평가된 점수는 정량화 되어 모델에 반영
- 사이버보안 활동품질 모델은 차후 사이버보안 아키텍처 분석모델의 완화 방법과 연계

순번	대분류	중분류	소분류	이행 정도 평가				
				상	상중	중	중하	하
1	기술적 보안조치	접근 통제	계정 관리					
2			접근통제 이행					
3			데이터 이동 통제					
4			기능의 분리					
5			최소 특권					
6			접속실패 기록					
7			시스템 사용 공지					
8			이전 접속기록 공지					
9			세션 잠금					
10			접근통제 감독 및 검토					
11			식별이나 인증 없이 허가된 활동					
12			네트워크 접근통제					
13			안전하지 않은 프로토콜의 제한					
14			무선연결 금지					
15			안전하지 않은 연결					
16			휴대용 대체 및 모바일 기기 접근 통제					
17			특정 프로토콜 가시성					
18			제3자 제품 사용					
19			외부시스템의 사용					
20		감사 및 책임	감사 대상 비상사건					
21			감사 기록의 대상					
22			로그 저장 용량					
23			로그 저장용량 초과 시의 대응					
24			감사대상 기록의 검토, 분석 및 보고					
25			감사대상 기록의 축약 및 생성					
26			타임스탬프					
27			감사 정보의 보호					
28			부인방지					
29			감사기록의 보존					
30			감사기록의 생성					
31		시스템 및 통신의 보호	응용 프로그램 보안기능의 분리					
32			공유 자원					

# 연구로 사이버보안 평가

## ■ 사이버보안 아키텍처 분석모델

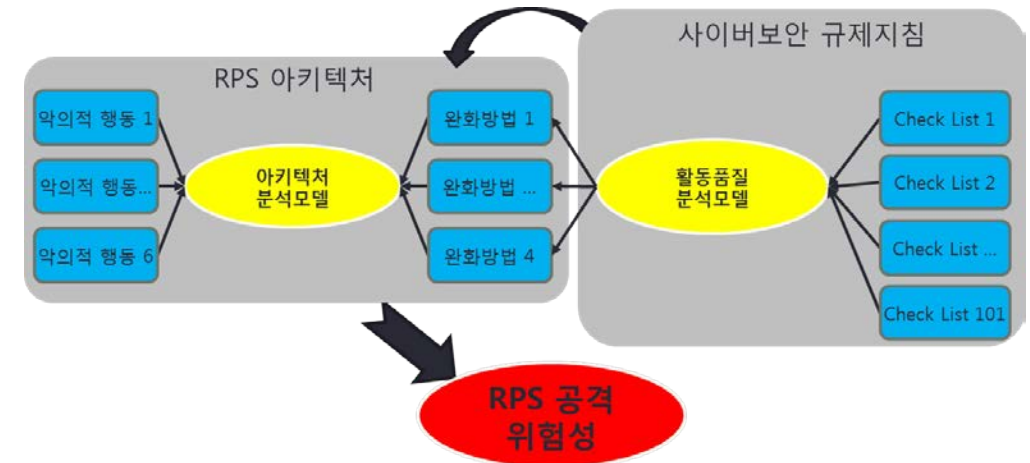
- 계측제어 아키텍처
  - 안전계통 중 RPS 선정
  - 상용로와 연구로 모두 BP, CP, ITP, MTP 로 구성
- 악의적 행동
  - DoS Attack
  - Network Scan & Sniffing
  - Packet Modification
  - Local Exploit to Escalate Privilege
  - Illegal Command Execution
  - Processor Resource Exhaust Attack
- 완화 방법
  - Network Monitoring
  - Host Monitoring
  - Encryption
  - Access Control



# 연구로 사이버보안 평가

## ■ 사이버보안 평가모델

- 사이버보안 아키텍처 분석모델과 활동품질 분석모델을 하나의 사이버보안 평가모델로 통합
  - BBN 을 활용하여 사이버보안 평가모델 구축
  - Risk 개념을 활용하여 NPT (Node Probability Table) 기본값 입력
  - Bayesian update를 통해 사이버보안 평가 수행
- 연구로 RPS에 대하여 사이버보안 평가모델로 사이버공격 시나리오를 가정하여 이에 대한 사례 연구 수행
  - 연구로와 상용로의 차이점 파악

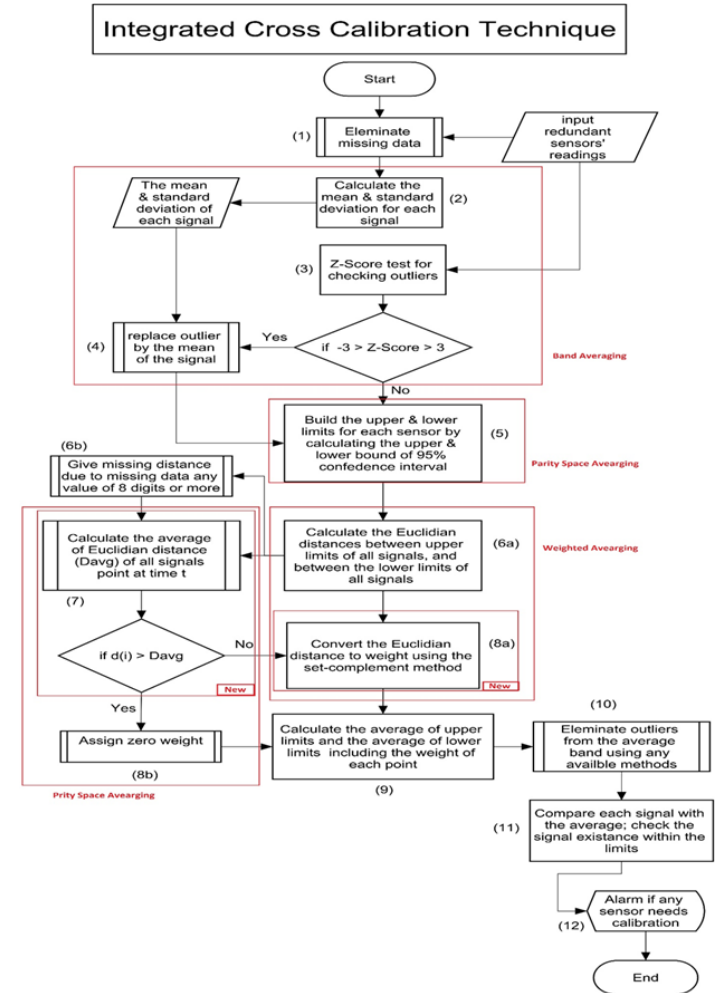


# 연구로 운전지원시스템 개발

- 목표: 연구로 운전정비지원시스템의 신뢰도를 향상 시킬 수 있는 **통합 교차 교정 방법론** 개발
- 방법: 연구로 운전정비지원시스템 현황 분석 및 운전 및 정비 신뢰도를 개선을 위한 **통합 교차 교정 방법론** 제안

I. 연구로 운전정비지원시스템 현황 조사

II. 통합 교차 교정 방법론



# 연구로 운전지원시스템 개발

## 연구로 운전정비시스템 현황 조사

- 연구로 운전정비지원시스템 기술수준에 대한 문헌 조사 결과

Component	Online Monitoring	Online Diagnostics	Online Prognostics
Reactor Structure	***	***	**
Non-Reactor Structure	****	***	**
Mechanical Components	****	***	***
Electrical Power System	****	**	**
Power Electronics Systems	***	**	*
Micro-electronic Systems	****	****	**
Process Instrumentation	****	****	**
Nuclear Instruments	****	****	**

'\*' : 해당 기술의 필요성은 논의되고 있으나, 아직 연구가 진행되거나 원자로에 아직 적용되지 기술

'\*\*' : 현재 연구개발 단계까지 논의가 된 기술

'\*\*\*' : 연구개발이 완료되어 곧 적용을 앞두고 있는 기술

'\*\*\*\*' : 이미 기술이 적용되고 있는 기술

- 국내 연구로 담당자와의 현장미팅을 통해 연구로에서 요구되는 운전정비지원시스템 현황조사
- 국제 연구로 전문가 대상 설문조사 수행
  - 연구로에 적용되어 있는 운전지원시스템 현황
  - 적용되지 않은 기술 중 연구로에 적용되면 연구로의 운전지원시스템을 향상 시킬 수 있는 기술 등
- 최종보고서는 IAEA의 IGORR (International Group on Research Reactors) 운영위원장에게 제출

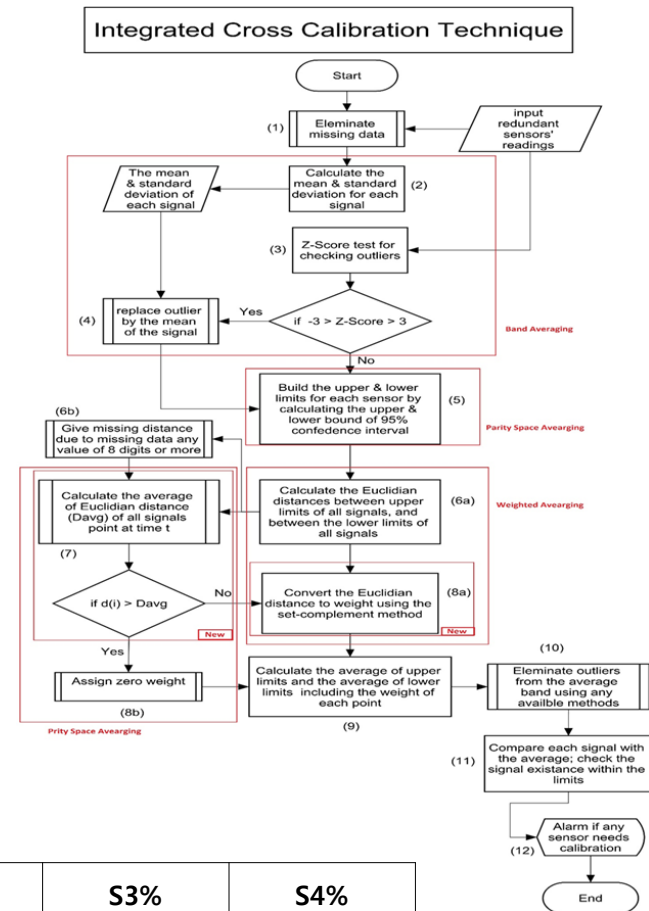
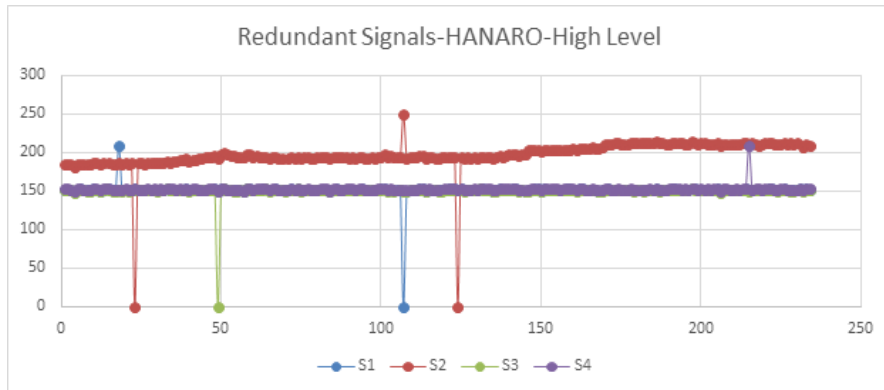
# 연구로 운전지원시스템 개발

## 통합 교차 교정 방법론

- Straight Averaging, Band Averaging, Weighted Averaging, and Parity Space Averaging 등의 기존 교차 교정 방법론의 단점을 보완하고, 각 방법의 장점은 모두 반영하는 하나의 통합 교차 교정 방법론 개발

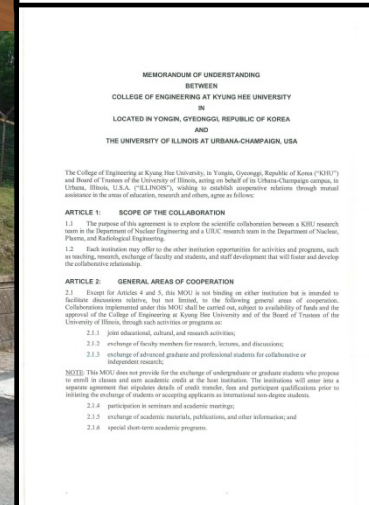
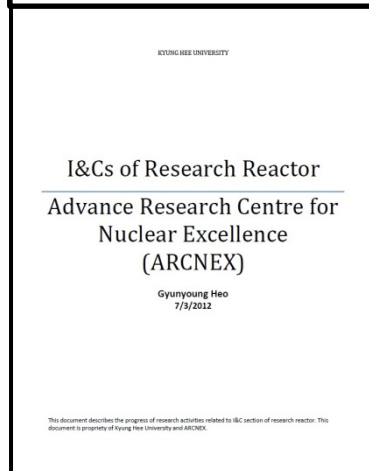
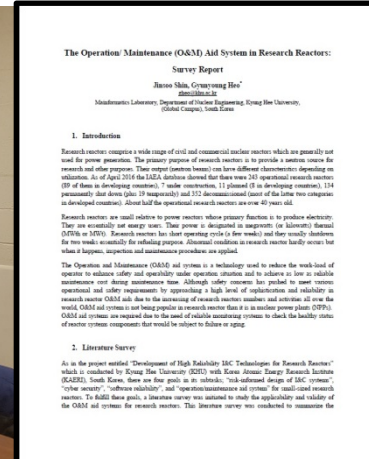
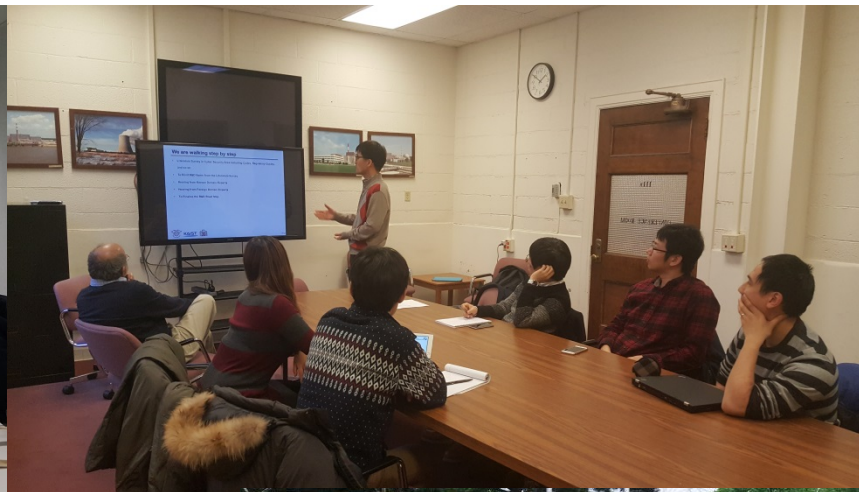
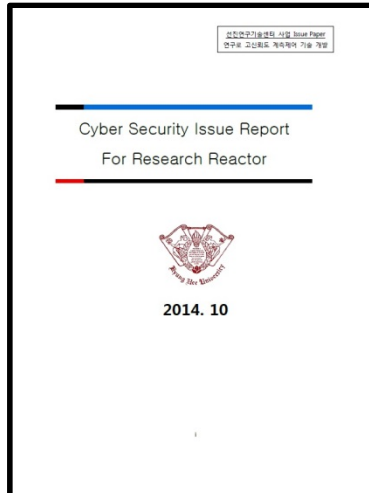
- 이상치 제거
- 센서 내 값들 간 거리에 따른 가중치 반영
- 센서 간 거리에 따른 가중치 반영
- 센서의 자체 유효 밴드 값 반영

- HANARO에서 수집된 데이터를 활용한 통합 교차 교정 방법론 적용



Technique	S1%	S2%	S3%	S4%
Simple Averaging	1.2821	0	0.8547	0.8547
Band Averaging	1.2821	0	0.4274	0.4274
Weighted Averaging	1.2821	0	0.8547	0.8547
Parity Space Averaging	63.2479	0	33.3333	63.2479
Integrated CC Averaging	96.5812	0	96.5812	97.0085

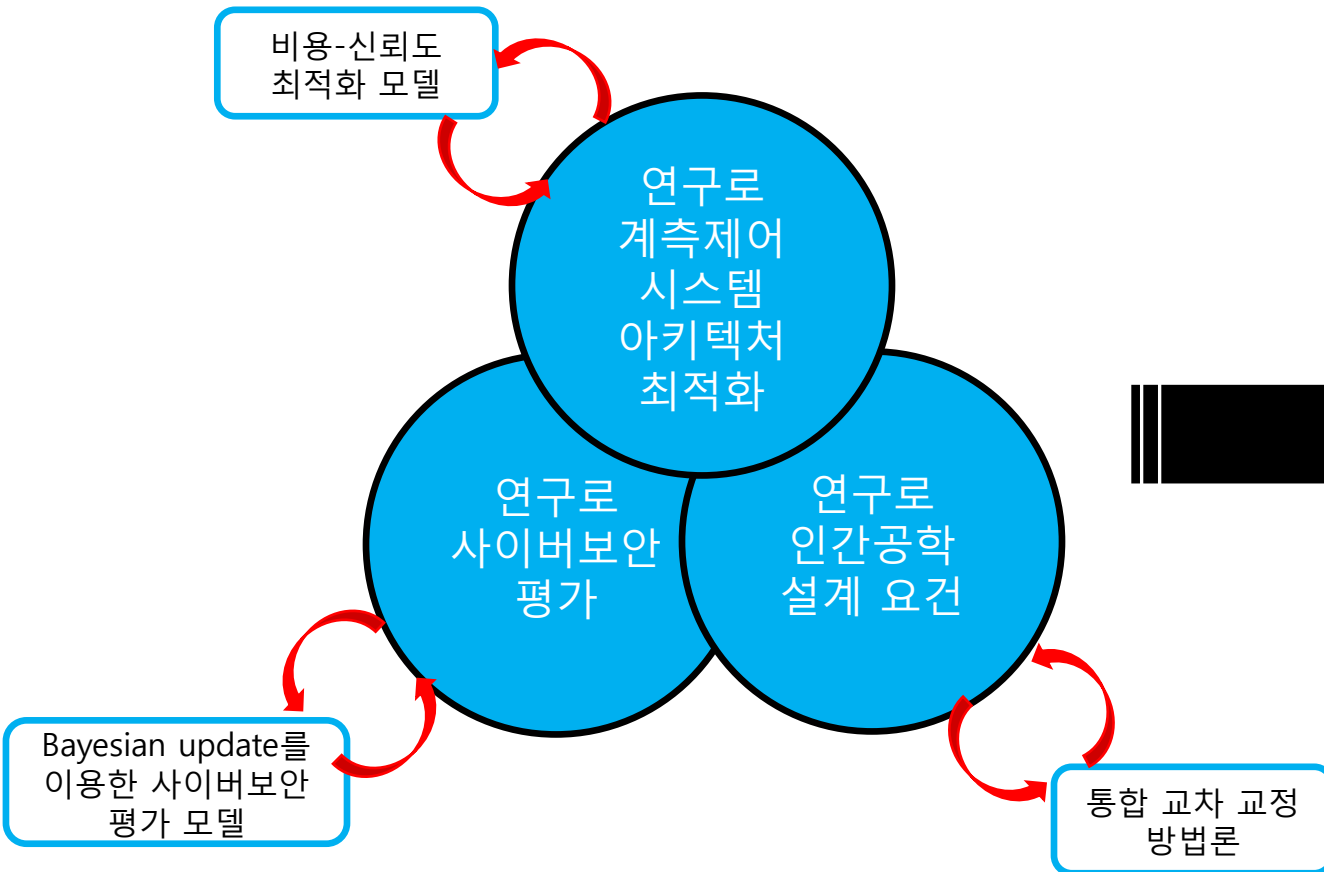
# 연구로 고신뢰도 계측제어 기술 개발



# 연구로 고신뢰도 계측제어 기술 개발

연구로 고신뢰도 계측제어 기술 개발

연구용 원자로 신기술 개발



- 연구용 원자로의 비용과 안전을 충족시키기 위한 최적화된 계측제어시스템 도출
- 연구용 원자로의 특성을 고려한 사이버보안 모델 개발 및 연구로에 최적화 된 사이버보안 요소 도출
- 연구로 운전정비지원시스템의 신뢰도를 향상 시킬 수 있는 통합 교차 교정 방법론 개발

# 감사합니다.

# 연구로 인허가제도 현황 및 제언



한국원자력안전기술원  
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY

김 선 재  
연구로건설PM/원자력심사단

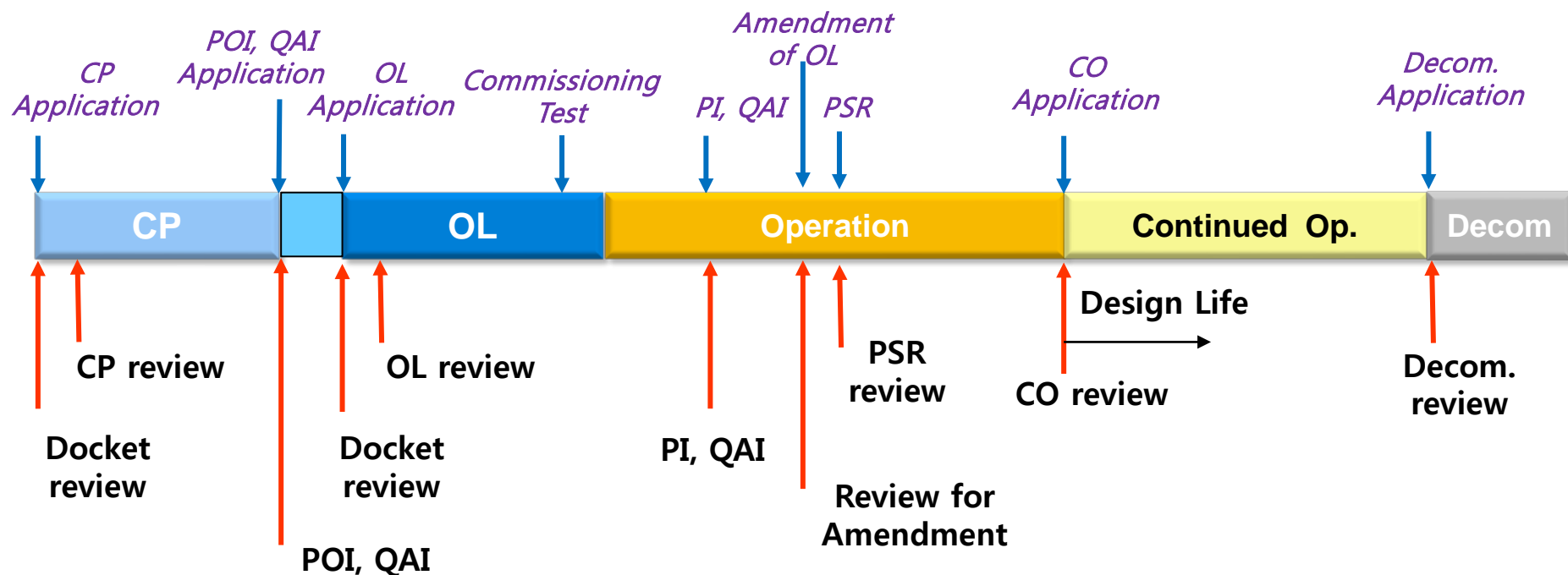
# 목차

- 연구로 life-cycle
- 안전규제법령체계
- 연구로 건설허가
  - 신청, 신청서류, 허가기준, 기술기준, 규제기준·지침 및 심사지침, 건설허가 사항의 변경, 사용전검사
- 연구로 운영허가
  - 신청, 신청서류, 허가기준, 정기검사, 주기적안전성평가
- 발전로 대비 연구로 차등적용 현황
- 연구로 인허가 제도 관련 법률 개정
- 인허가 제도 개선 제안

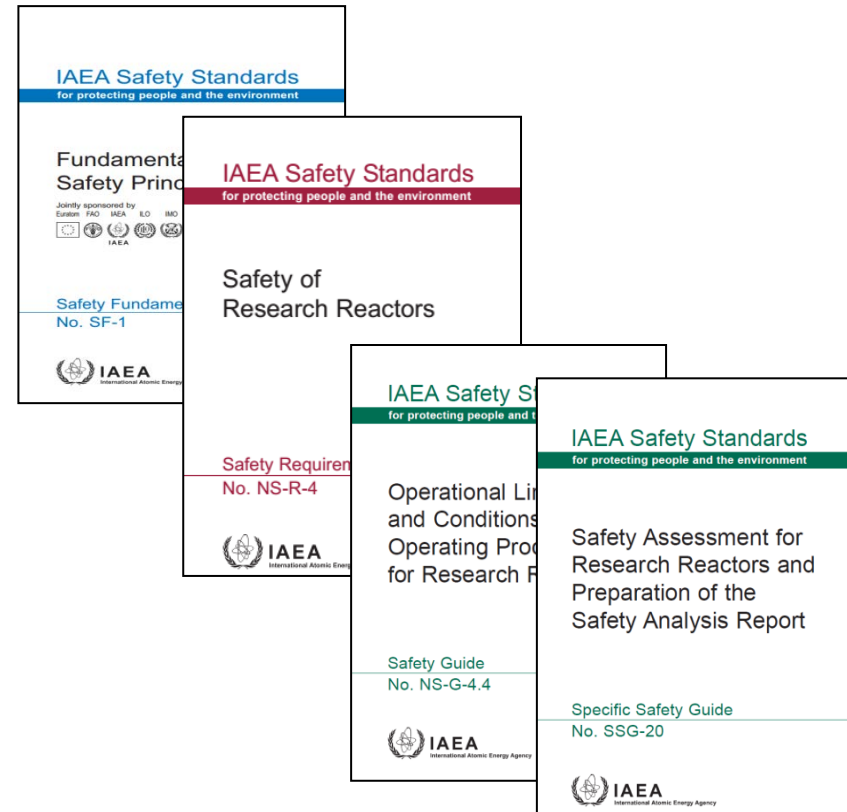
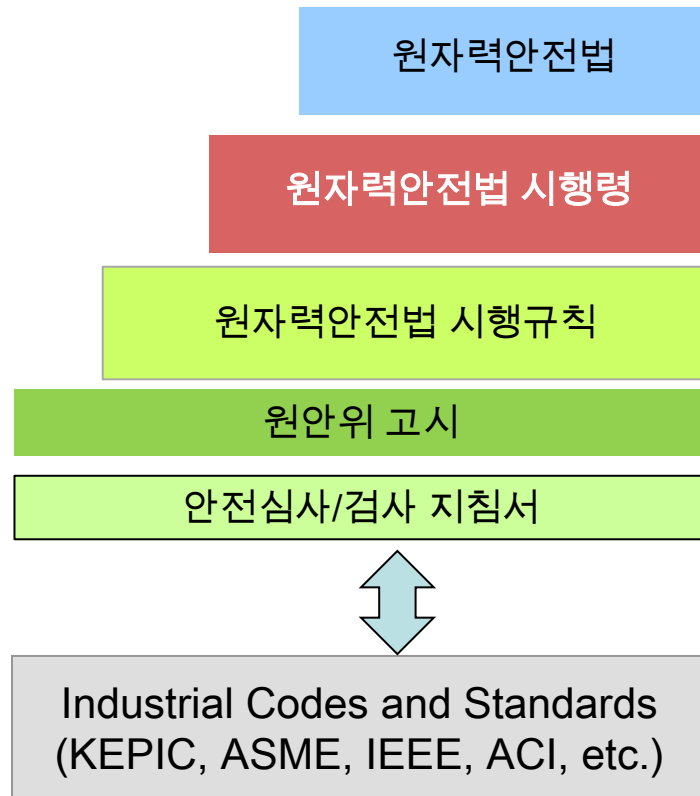
# 연구로 life-cycle

## □ 인허가 제도 및 규제활동

- 건설/운영허가, PSR, 계속운전 안전성평가, 해체승인
- 안전심사 및 규제검사(사용전검사, QA 검사, 정기검사 등)



# 원자력안전규제 법령체계



# 원자력안전규제 법령체계

<b>법</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 원자력안전법, 방호 및 방사능방재대책법 등</li> <li>■ 원자력안전 관련 제도</li> </ul>
<b>시행령</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 원자력안전법 시행령 등</li> <li>■ 법이 위임한 사항 및 집행에 필요한 사항</li> </ul>
<b>시행규칙 [규칙]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 원자력안전법 시행규칙 등</li> <li>■ 법령 위임사항 및 집행에 필요한 사항 (절차, 서식 등)</li> </ul>
<b>일반규제요건</b>	<b>기술기준규칙</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 법령에서 위임한 기술기준을 원칙수준으로 기술</li> <li>■ 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙 등</li> </ul>
<b>상세규제요건</b>	<b>위원외고시(기술기준)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 법령에 따라 기술기준 또는 절차·서식 등을 규정</li> <li>■ 원자로시설의 위치에 관한 기술기준 고시 등 87건</li> </ul>
	<b>규제기준</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기술기준의 해석 또는 세부사항을 규정(19개분야, 199건)</li> </ul>
<b>규제지침</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 기술기준 충족을 위해 허용 가능한 방법, 조건, 사양 등을 제시</li> <li>■ 약 200여건 개발 완료</li> </ul>
<b>심사및 검사지침서 등</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 규제 업무 수행 시 준수하여야 하는 세부적인 절차</li> <li>■ 적용분야, 수행절차, 허용기준 등이 포함.</li> <li>■ 심사지침서, 검사지침서 등</li> </ul>

제도  
절차

기술  
기준

규제  
기준  
등

정부  
제  
개정

K  
I  
N  
S  
제  
개정

# 연구로 건설허가 : 신청, 신청서류

## □ 건설허가의 신청

- 개정 원자력안전법(2014.5.21)에 따라 건설/운영허가를 분리·신청
- 원자력안전법 제30조(연구용원자로 등의 건설허가) 제1항
- 시행령 제43조(건설·운영 허가 신청)
  - 시행령 제47조(준용)에 근거 시행령 19조(허가의 처리 기간) 준용
- 시행규칙 제25조(건설·운영허가의 신청 등) 제1항

## □ 허가신청서류

- 원자력안전법 제30조 제2항
- 동법 시행규칙 제25조 제2항 및 제4항
  - PSAR, RER, QAP(construction), PDP, 설명서(원자로 사용목적, 설치에 관한 기술능력)
  - 해체계획서가 신청서류에 추가 (원자력안전법 개정(2015.1.20))

# 연구로 건설허가 : 신청, 신청서류

## □ 허가신청서류 구성 및 내용

- 동법 시행규칙 제25조 제2항에 따라, 시행규칙 제4조 제2~5항 **준용**
  - RER 내용 : 제4조제2항에 따라 목차 구성
    - 고시 제2014-11호(원자로.06) RER 작성에 관한 규정
  - PSAR 내용 : 제4조제3항에 따라 목차 구성
    - 다만, 해당 원자로의 사용목적 또는 그 원리의 차이로 인하여 적용하기가 적합하지 아니한 사항은 기재하지 아니함.
    - 연구로의 경우 국제규범을 기준으로 SAR 구성([참조, IAEA SSG-20](#))
      - ☞ 참고 : 시행규칙 vs 기장연구로 PSAR 목차 비교표
  - QAP 내용 : 제4조제4항에 따라 목차 구성
    - 고시 제2014-23호(원자로.26) QA 세부요건에 관한 기준
  - PDP 내용 : 제4조제5항에 따라 목차 구성
    - 고시 제2015-8호(원자로.41) DP 작성에 관한 규정
  - 기술능력설명서
    - 고시 제2014-33호(원자로.37) '원자로시설의 설치 및 운영에 관한 기술능력 설명서 작성에 관한 규정'

# [참고] NPPvs RR SAR 목차 비교

연구로 SAR 구성 (IAEA SSG-20 기준)		국내 발전용 원자로 (OPR1000) SAR 구성	USNRC SAR 작성 지침 (NUREG-1537, Part 1)
1. 시설개요		1. 개요 및 일반사항	1. 시설
	1.1 개요	1.1 개요	1.1 개요
	1.2 연구용원자로 일반설명	1.2 발전소 일반사항	1.2 안전성 요약
	1.3 다른 연구용원자로와의 비교	1.3 비교표	1.3 일반사항
	1.4 운영자 및 하청업체	1.4 참여기관	1.4 공유시설 및 기기
	1.5 안전성 특성 및 운영	1.5 기술정보	1.5 유사시설과의 비교
	1.6 원자로 이용계획	1.6 참고자료	1.6 운전 요약
		1.7 도면 및 기타	1.7 미국 폐기물정책법 준수
		1.8 NRC RG 및 TMI 2 조치사항	1.8 시설 보완 및 이력
2. 안전목표 및 설계요건		2. 부지특성	2. 부지특성
	2.1 개요	2.1 지리와 인구	2.1 지리 및 인구통계
	2.2 안전목표 및 설계요건	2.2 인근 산업시설	2.2 인근의 산업, 수송 및 군사시설
	2.3 구조물, 계통 및 기기의 등급분류	2.3 기상	2.3 기상
	2.4 외부사건 설계기준	2.4 수문공학	2.4 수문
	2.5 규격 및 기준	2.5 지질, 지진 및 지반	2.5 지질, 지진 및 지질 공학
	2.6 기기 검증		

# [참고] 시행규칙 vs 기장연구로 목차 비교표

시행규칙 제4조(건설허가의 신청)제3항		기장연구로 SAR 구성 (IAEA SSG-20 기준)	
1. 다음 각 목의 일반적 사항			
	가. 허가신청내용의 개요		
	나. 발전용원자로 및 관계시설과 그 부지의 주요특성	1. 시설개요	
			1.1 개요
			1.2 연구용원자로 일반설명
	다. 유사한 다른 원자로시설과의 비교내용		1.3 다른 연구용원자로와의 비교
	라. 원자로시설의 건설에 관한 계약당사자 및 그 책임 범위		1.4 운영자 및 하청업체
	마. 추가로 제출될 기술자료		1.5 안전성 특성 및 운영
			1.6 원자로 이용계획
			2. 안전목표 및 설계요건
			2.1 개요
			2.2 안전목표 및 설계요건
			2.3 구조물, 계통 및 기기의 등급분류
			2.4 외부사건 설계기준
			2.5 규격 및 기준
			2.6 기기 검증 (내진 및 동적검증, 내환경검증)

# 연구로 건설허가 : 허가기준

## □ (허가기준) 원자력안전법 제30조제3항

- 연구용원자로의 건설허가기준은 원자력안전법 제30조제3항에 따라 동법 제11조(허가기준)를 **준용** - 발전로의 건설허가 기준을 준용
  - 건설에 필요한 기술능력을 확보할 것
    - － 시행규칙 제8조(기술능력)
  - 위치·구조 및 설비가 위원회규칙으로 정하는 기술기준에 적합하여 방사성 물질 등에 따른 인체·물체 및 공공의 재해방지에 지장이 없을 것
  - 건설로 인하여 발생하는 방사성물질 등으로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해 방지에 적합
    - － 시행령 제174조(환경상의 위해방지)
  - 품질보증계획서 내용이 위원회규칙으로 정하는 기준에 적합
    - － 고시 제2014-23호(원자로.26) QA 세부요건에 관한 기준
  - 해체계획서 내용이 위원회규칙으로 정하는 기준에 적합

☞ 위원회 규칙: 원안위 규칙 제3호 '원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙'

# 연구로 건설허가 : 기술기준

## □ (기술기준) 원안위 규칙 제3호

- '원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙'을 연구로 및 관계시설의 기술기준으로 **준용**
  - 제2장 제1절( 3조~10조) : 원자로시설의 위치
  - 제2장 제2절(11조~49조) : 원자로시설의 구조·설비 및 성능
  - 제2장 제4절(67조~85조) : 원자로시설의 건설 및 운영에 관한 품질보증
  - 제2장 제5절(85조2~17) : 원자로시설의 해체
  - 제2장 제6절(85조18~23) : 원자력시설의 사고 관리 (RR 해당사항 없음)
- (규칙의 적용범위) 규칙 제3조제2항 및 제11조제2항
  - 당해 시설의 사용목적, 원리적 차이 또는 설계의 특성상 당해 시설에 그대로 적용할 수 없거나 적용하지 아니하더라도 안전상 지장이 없다고 원안위가 인정하는 경우에는 일부규정을 적용하지 아니할 수 있음

# 규제기준·지침 및 심사지침

## □ 규제기준 및 지침

- 경수로형 원전 규제기준 및 지침 (2011.7)

## □ 심사지침

- 연구용·교육용 원자로시설 안전심사지침서 (KINS/GE-N10, Vol.2, '14.12)
- 방사선환경영향평가서 심사지침 (개정 3, 2013.9)
- 경수로형 원전 안전심사지침서 (KINS/GE-N001, Vol.4, 2015.3)
- (참조기준) 발전로의 기술기준을 준용하고 연구로의 고유특성을 반영, IAEA 및 USNRC의 안전기준을 참조하여 차등적용
  - IAEA Safety Requirements NS-R-4
  - IAEA Specific Safety Guide No. SSG-20,
  - NUREG-1537 Part 1 and 2
- ☞ IAEA Safety Standards : SSG-22, Use of a Graded Approach in the Application of the Safety Requirements for Research Reactors

# 연구로 건설허가 : 건설허가 사항의 변경

## □ 건설허가 사항의 변경신고

- 원자력안전법 제30조(연구용원자로 등의 건설허가)제1항
- 시행령 제44조(변경허가 신청)
- 시행규칙 제26조(변경허가의 신청)
- 시행규칙 제30조(준용)에 근거, 시행규칙 6조(경미한 사항의 변경신고)  
준용

## □ 건설허가의 취소

- 법 제32조(건설·운영 등 허가의 취소 등)

# 연구로 건설허가 : 사용전검사 등

## □ 사용전검사

- 법 제34조(준용)에 근거, 법 16조(검사) 준용
- 시행령 제47조(준용)에 근거, 시행령 제27, 28, 29, 30, 31, 31조의2를 준용
  - 제27조(사용전 검사), 제28조(사용전 검사 신청), 제29조(사용전 검사의 시기 등), 제30조(잠정합격), 제31조(품질보증검사), 제31조의2(공급자 등 검사)
- 시행규칙 제30조(준용)에 근거, 시행규칙 15조(사용 전 검사의 신청) 준용

## □ 안전관련설비의 계약신고, 부적합사항 보고

- 법 제34조(준용)에 근거 법 제15조의2(안전관련설비 계약 신고), 3(부적합 사항 보고) 준용
- 시행규칙 제30조(준용)에 근거, 제14조의 2,3 준용
  - 시행규칙 14조의2(안전관련설비 계약 신고), 제14조의 3(안전관련설비 계약 변경신고) 준용

# 연구로 운영허가 : 신청, 신청서류

## □ 운영허가의 신청

- 개정 원자력안전법(2014.5.21)에 따라 건설/운영허가를 분리·신청
- 원자력안전법 제30조의2(연구용원자로 등의 운영허가) 제1항
- 시행령 제43조(건설·운영 허가 신청)
  - 시행령 제47조(준용)에 근거 시행령 33조(운영허가 신청) 및 시행령 19조(허가의 처리 기간) 준용
- 시행규칙 제25조(건설·운영허가의 신청 등) 제1항

## □ 허가신청서류

- 원자력안전법 제30조의2 제2항
- 시행규칙 제25조 제3,5항
  - TS, FSAR, QAP(Operation), RER(변경내용), PDP(변경내용) 설명서(운전에 관한 기술능력, 핵연료의 장전계획, EOP의 작성 시 적용할 기술적 근거 및 검증방법)
  - “사고관리계획서” → “비상운전절차서”

# 연구로 운영허가 : 신청, 신청서류

## □ 허가신청서류 구성 및 내용

- 동법 시행규칙 제25조 제2항에 따라, 시행규칙 제16조 제2,3,5항 **준용**
  - TS 내용 : 제16조제2항에 따라 목차 구성
    - 고시 제2015-01호 운영기술지침서 작성 기준
  - FSAR 내용 : 제16조제3항에 따라 목차 구성
    - 다만, 해당 원자로의 사용목적 또는 그 원리의 차이로 인하여 적용하기가 적합하지 아니한 사항은 기재하지 아니함.
    - 연구로의 경우 국제규범을 기준으로 SAR 구성(참조, IAEA SSG-20)
  - QAP 내용 : 제4조제4항에 따라 목차 구성
    - 고시 제2014-23호(원자로.26) QA 세부요건에 관한 기준
  - RER 내용 : 제4조제2항에 따라 목차 구성 (고시 제2014-11호 RER 작성 규정)
  - PDP 내용 : 제4조제5항에 따라 목차 구성 (고시 제2015-8호 DP 작성 규정)
  - 기술능력설명서
    - 고시 제2014-33호(원자로.37) '원자로시설의 설치 및 운영에 관한 기술능력설명서 작성에 관한 규정'

# 연구로 운영허가 : 허가기준

## □ (허가기준) 원자력안전법 제30조의2 제3항

- 연구용원자로의 건설허가기준은 원자력안전법 제30조제3항에 따라 동법 제21조(허가기준)를 준용 - *발전로의 운영허가 기준을 준용*
    - 운영에 필요한 기술능력을 확보할 것
      - 시행규칙 제8조(기술능력)
    - 위치·구조 및 설비가 위원회규칙으로 정하는 기술기준에 적합하여 방사성 물질 등에 따른 인체·물체 및 공공의 재해방지에 지장이 없을 것
    - 건설로 인하여 발생하는 방사성물질 등으로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해 방지에 적합
      - 시행령 제174조(환경상의 위해방지)
    - 품질보증계획서 내용이 위원회규칙으로 정하는 기준에 적합
      - 고시 제2014-23호(원자로.26) QA 세부요건에 관한 기준
    - 해체계획서 내용이 위원회규칙으로 정하는 기준에 적합
- ☞ 위원회 규칙 : 원안위 규칙 제3호 '원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙'

# 연구로 운영허가 : 운영허가 사항의 변경

## □ 운영허가 사항의 변경신고

- 원자력안전법 제30조(연구용원자로 등의 건설허가)제1항
- 시행령 제44조(변경허가 신청)
- 시행규칙 제26조(변경허가의 신청)
- 시행규칙 제30조(준용)에 근거, 시행규칙 18조(경미한 사항의 변경신고)  
준용

## □ 운영허가의 취소

- 법 제32조(건설·운영 등 허가의 취소 등)

# 연구로 운영허가 : 정기검사, PSR 등

## □ 정기검사

- 법 제34조(준용)에 근거, 법 22조(검사) 준용
- 시행령 제47조(준용)에 근거, 시행령 제35조(정기검사) 준용
- 시행규칙 제30조(준용)에 근거, 시행규칙 19조(정기검사) 준용

## □ 주기적 안전성평가

- 법 제34조(준용)에 근거 법 제23조(주기적 안전성평가) 준용
- 시행령 제47조(준용)에 근거 시행령 제36~제39조 준용
  - 제36조 (주기적 안전성평가의 시기 등), 제37조(주기적 안전성평가의 내용), 제38조(주기적 안전성평가의 방법 및 기준), 제39조(주기적 안전성평가보고서의 심사처리기간)
- 시행규칙 제30조(준용)에 근거 시행규칙 제20조, 제21조 준용
  - 제20조(주기적 안전성평가의 세부내용), 제21조(주기적 안전성평가의 기준)

# 발전로 대비 연구로 차등적용

## □ 제한구역 설정

- 시행령 제129조(제한구역의 설정범위 등)
  - 열출력 10MWth 이하인 연구로, 제한구역을 설정하지 않을 수 있음

## □ 방사선 비상계획구역

- 방호방재법 제2조, 제20조 및 제20조의2
  - 예방적보호조치구역 (PAZ), 긴급보호조치계획구역(EPZ) 구역 설정

	NPP	RR	
PAZ	3~5 km	-	
EPZ	20~30 km	2~10 MWt	0.5 km
		10 ~ 50 MWt	1.5 km
		50 ~100 MWt	5 km

# 발전로 대비 연구로 차등적용

## □ 방사선 환경조사 및 환경영향 평가실시

- 법 104조(환경보존) :
  - 열출력 100kW 이상의 연구용원자로의 경우 환경영향 평가 실시
- 제2014-11호(원자로.06), "원자력이용시설 방사선환경영향평가서 작성 등에 관한 규정"
  - 연구로는 **평가서** 작성(평가서초안 작성 대상시설에서 제외)
    - 초안 작성 대상시설 : 발전용원자로 및 관계시설, 방사성폐기물 처분시설 및 사용후핵연료 중간저장시설
  - 연구용원자로 **원자력발전소에 준하여 작성**하되, 기술항목 중 시설의 사용목적이나 설계상의 원리적인 차이로 인하여 적용하기 어려운 사항이나 적용할 필요가 없을 때에는 해당 항목을 제외할 수 있다.
- 환경영향평가서의 주민의견수렴 및 공청회
  - 법 103조(주민의 의견수렴)
  - 평가서초안을 작성 대상 시설의 경우, 의견수렴 및 공청회 개최

# 연구로 인허가 제도 관련 법률 개정 -1/4

## □ 연구로 건설/운영허가의 분리, PSR 수행

- 원자력안전법(2014.5.21 개정)에 따라 건설/운영허가를 분리·신청
- 법 제30조(연구용원자로 등의 건설허가) 개정
- 법 제30조의2(연구용원자로 등의 운영허가) 신설
- 법 제34조(준용) 개정 (법 제23조(PSR)를 준용, 연구로에 PSR 적용)
- SAR 목차 구성 : 시행규칙 제4조제3항(NPP SAR) 준용
  - 국제규범을 기준으로 SAR 구성(참조, IAEA SSG-20)
  - 시행규칙의 SAR 목차 내용의 대부분을 포함
- ☞ 연구용·교육용 원자로시설 **안전심사지침서** (KINS/GE-N10, Vol.2, '14.12) 개정시 IAEA SSG-20 목차 이용

# 연구로 인허가 제도 관련 법률 개정 -2/4

## □ 건설/운영허가 신청서류에 해체계획서 추가

- 원자력시설 해체에 관한 안전관리 강화를 위해 개정(2015.1.20)
  - 법 제10조(건설허가) 법 제11조(허가기준) 개정
  - 법 제20조(운영허가) 법 제211조(허가기준) 개정
  - 법 제28조(발전용원자로 및 관계시설의 해체) 개정
  - 법 제92조의2(해체계획서의 주기적 갱신) 신설
  - 법 103조(주민의 의견수렴) 개정
- 
- 경과조치 : 건설 또는 운영 중에 있는 사업자는 시행일부터 3년 이내에 이 법에 따른 해당 시설의 해체계획서를 위원회에 제출,승인
- 
- ☞ NPP : 해체용이성평가보고서를 해체계획서에 포함하여 작성
  - RR : Chapter 19(해체)를 별도의 문서로 작성, 제출

# 연구로 인허가 제도 관련 법률 개정 -3/4

## □ 운영허가 신청서류에 사고관리계획서 추가

- 중대사고를 포함한 사고관리를 규정한 안전법 개정('15.6.22 공포, '16.6.23 시행)
- 제2조(정의), 제20조(운영허가) 및 제21조(허가기준+제6항 추가) 개정
- 시행령 제35조(정기검사)에 사고관리계획의 내용(허가기준 제6항) 추가
- 원안위 고시(2014-11호) 방사선환경영향평가서 작성에 관한 규정의 개정
  - 작성요령 중 '사고의 가정 항목'의 '중대사고는 평가대상에서 제외한다' 삭제 (별표 2, 6.1)
  - '발전소 운영중 발생 가능한 사고를 유형별로 가정하고 가정된 사고유형별 발생확률을 평가한다.' 로 변경.

## □ 연구로 인허가 미치는 영향

- 연구로 운영허가 기준으로 준용하는 허가기준(제21조제6항)에 사고관리계획이 언급되어 있으나,
- 연구로 운영허가 신청서류에 '사고관리계획서'가 포함되지 않으므로 허가기준 제21조제6항이 적용되지 않음.

# 연구로 인허가 제도 관련 법률 개정 -4/4

## □ 연구로 인허가 미치는 영향 (계속)

- 연구로의 경우, '비상운전절차서'를 사고관리계획서로 인정하여 기존의 인허가 체계를 유지함(근거, 시행규칙 제25조제2항)
- '원자로 시설의 기술기준에 관한 규칙' 제2장 제6절(제85조18~23) '원자로시설의 사고관리'는 연구로에 적용되지 않음
- 연구로 PSR에서도 사고관리계획이 평가항목에 포함되지 않음
- 시행령 제35조(정기검사)의 합격기준의 변경은 연구로 정기검사 합격기준에 영향을 주지 않음.
- RER 작성의 방안의 변경 :
  - 원안위 고시 제2014-11호의 제5조제4항에 따라 '... 사용목적이나 설계상의 원리적인 차이로 인하여 적용하기 어려운 사항이나 적용할 필요가 없을 때에는 해당 항목을 제외할 수 있다'에 근거하여
  - 연구로의 경우, 중대사고를 평가대상에서 제외할 수 있음.

# 인허가 제도 개선 제안

## □ 원자로 및 관계시설에 대한 정의 명확화

- 관계시설 vs 부대시설 (vs 이용시설)
- RIPF (동위원소 생산시설) ? ⊂ 관계시설
- RWTF, FMPF (방사성폐기물처리시설, FM 생산시설) ⊂ 관계시설
- 연구로 건설허가(법 제30조) vs 동위원소 생산허가(법 제53조)

## □ 부지사전승인(ESA) 제도

- 신청 : RER, 부지조사보고서(chapter 3)
- 부지사전승인 이후 총리령으로 정하는 범위에서 공사 착수 가능

## □ 건설허가 및 건축허가

- NPP : 건축허가 ⊂ 건설허가 (원자력안전법 제10조제6항)
- RR : 건설허가와 별도로 건축허가 필요

# 인허가 제도 개선 제안

## □ 차등적용(Graded Approach)에 대한 법적근거

- 위원회규칙 원자로시설에 관한 기술기준의 적용
- (적용범위) 제3조제2항 및 제11조제2항
  - 당해 시설의 사용목적, 원리적 차이 또는 설계의 특성상 당해 시설에 그대로 적용할 수 없거나 적용하지 아니하더라도 안전상 지장이 없다고 원안위가 인정하는 경우에는 일부 규정을 적용하지 아니할 수 있음
- 안전등급 및 규격, 기술기준의 차등적용에 대한 법적 근거 필요

## □ 연료장전 허가 및 운영허가 절차

- NPP : 연료장전 이전에 고온기능시험 완료, 운영허가 발급
- RR : 연료장전 이후에 시운전시험 수행 필요.
  - Opt1 : 별도의 '연료장전 승인' → 연료장전 → 시운전시험 → 운영허가 발급
  - Opt2 : 조건부 운영허가 → '연료장전' → 시운전시험 → 최종 운영허가

# 인허가 제도 개선 제안

## □ 인허가 신청전 Feasibility Study 필요

- 허가신청자, 규제기관, 학계 등이 참여, Code V/V 및 인허가 요건 등에 대한 사전검토를 통해, 사전준비, 필수기술개발, 등 인허가 프로세스의 효율성 제고 효과

## □ 원자로조종사/조종감독자(RO/SRO) 면허 요건 수립

- 원안위 고시 제2014-71호(면허.01)
- 출력별 면허제도 운영
  - 1 kW (~ 1kWt), 2 MW(1kWt ~ 10 MWt), 10MW (10 ~ 100 MWt)
- 하나로 vs 기장연구로 설계특성/차이점을 고려한 별도의 면허 필요성



# **Question & Answer**

Thank You for Your Attention



# 차등접근의 연구로 적용 현황과 제안

오 수 열

[syoh@kaeri.re.kr](mailto:syoh@kaeri.re.kr)



Korea Atomic Energy  
Research Institute

- 차등접근의 정의와 필요성
- IAEA의 연구로에 대한 차등접근 지침
- 우리나라의 연구로에 대한 차등접근 현황
- 차등접근의 실효적 연구로 적용을 위한 제안

- IAEA의 정의 (IAEA Safety Glossary 2007)

- 제어를 상실할 개연성과 상실 시 가능한 결과 및 제어 상실에 수반되는 위험의 수준과 상응하도록 제어 수단이나 조건의 엄격함을 정하는 절차 또는 방법

*For a system of control, such as a regulatory system or a safety system, a process or method in which the stringency of the control measures and conditions to be applied is commensurate, to the extent practicable, with the likelihood and possible consequences of, and the level of risk associated with, a loss of control.*

- 방사선 작업이나 선원의 특성, 방사능 노출의 개연성과 크기에 상응하도록 안전요건을 적용하는 것

*An application of safety requirements that is commensurate with the characteristics of the practice or source and with the magnitude and likelihood of the exposures.*

- 잠재 위험의 크기에 따라 안전요건 만족 방법에 차등을 두는 것

- 연구로와 원전의 잠재 위험의 크기가 서로 다름
- 연구로 사이에서도 출력 등에 따라 잠재 위험의 크기가 서로 다름
- 차등접근으로 안전성을 저해하여서는 안 됨.  
안전 요건(safety requirement)을 만족하여야 하는데\*,  
어떻게 만족하느냐는 시설마다 다를 수 있음.

\* 이 점에 대해서는 논란이 있음. IAEA는 개념적으로 이러한 철학을 유지하고 있으나, 현실적으로 차등접근은 요건(또는 허용기준)의 차등화를 포함하지 않을 수 없음. 따라서 최근 IAEA의 차등접근 기술회의(2016.5)에서는 "적용 배제 사유를 정당화할 수 있으면 그 안전요건을 배제할 수 있다"고 결론 내림.

# 참고: IAEA의 Safety Standard Series 문서 체계

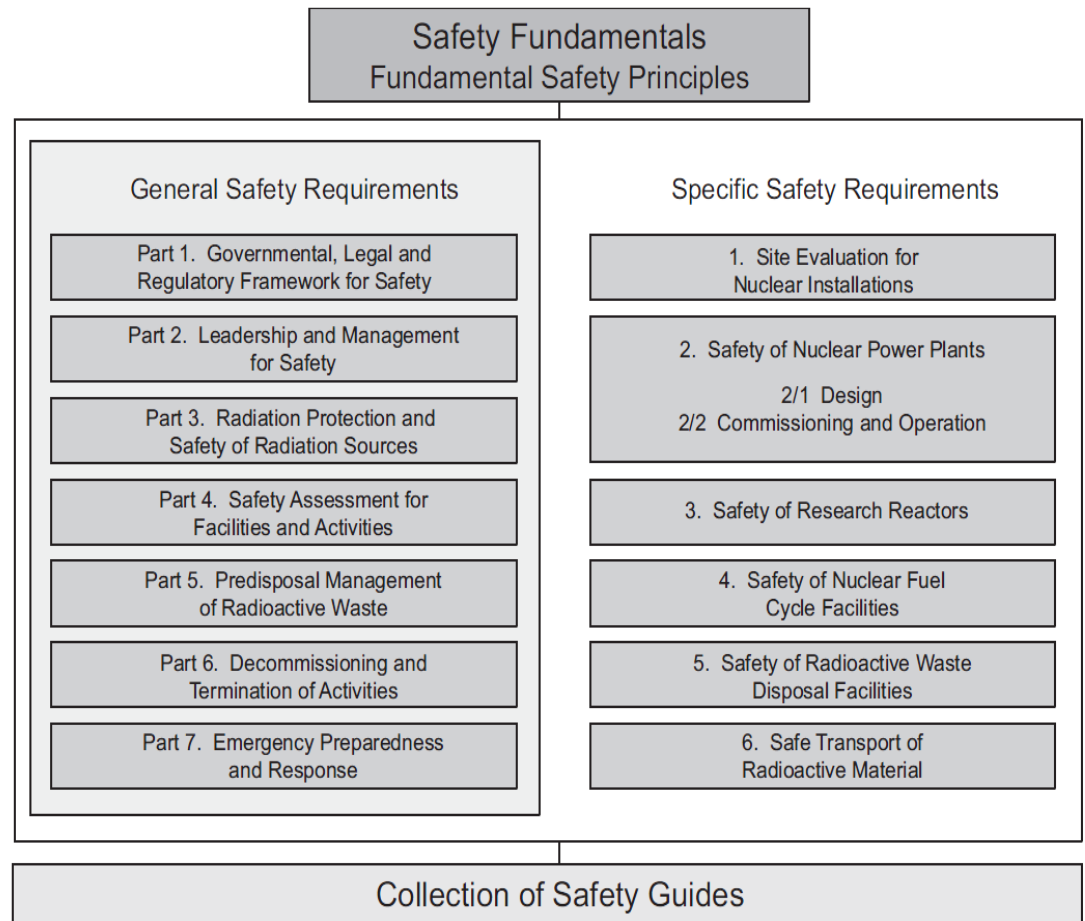
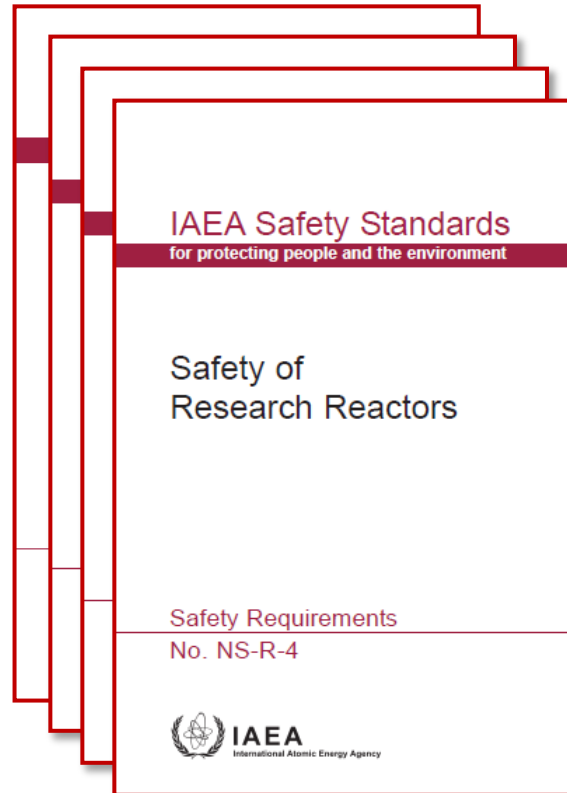
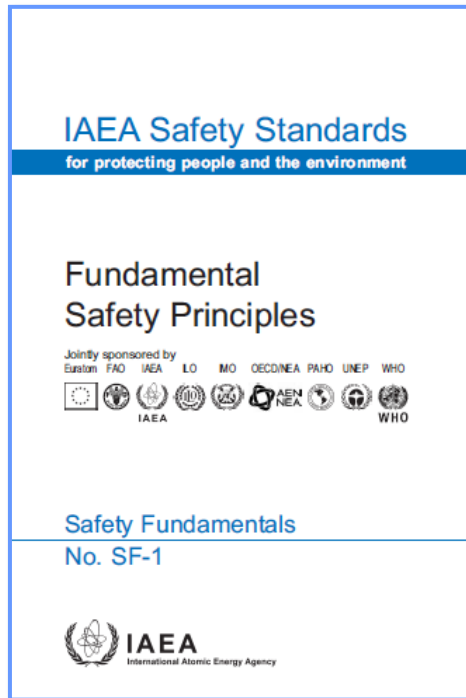
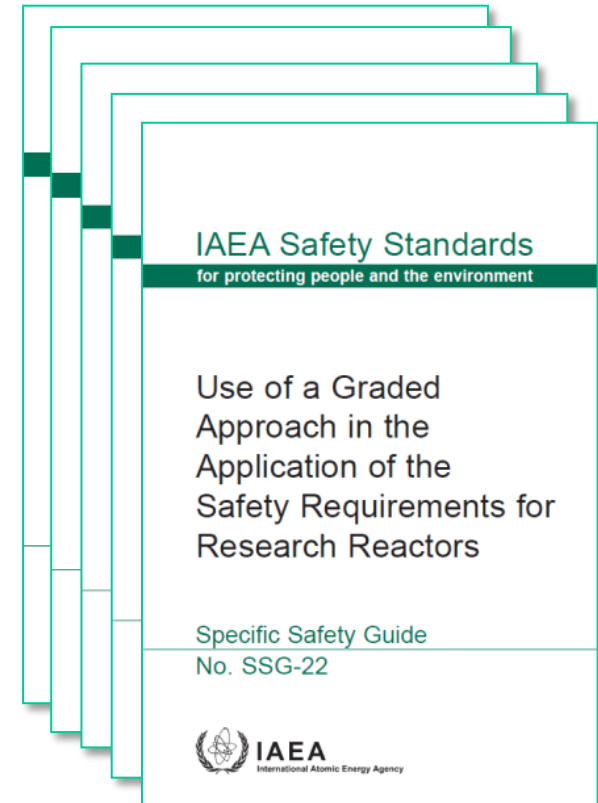


FIG. 1. The long term structure of the IAEA Safety Standards Series.

# IAEA Safety Standard Series



Specific Safety Requirement  
No. SSR-3



- “Use of a Graded Approach in the Application of the Safety Requirements for Research Reactors,” Specific Safety Guide No. SSG-22, IAEA (2012)
- 차등접근 기본 요소
  - 연구로 전 생애주기(부지평가, 설계, 운영, 해체)에 걸쳐 차등접근 적용. 규제 및 안전 관리에 대해서도 차등접근 적용
  - 안전기능과 운전제한조건을 유지하여야 하며, 부적절한 방사선 위해가 있어서는 안 됨.
  - 차등화는 안전해석, 규제요건, 공학적 판단에 근거하여야 함.
- Two Steps in Graded Approach
  - Step 1: Categorization of the Facility in accordance with potential hazards
  - Step 2: Analysis and Grading of Activities and/or SSCs in accordance with the importance to safety
- 설계 단계에 중점을 두고 있음.

- 세 가지 범주에 대해 기술: 설계철학, 일반 설계요건, 특정 설계요건
- 설계 철학
  - 다중방호(Defense in Depth) 개념을 적용하여야 함. 그러나 차등접근 가능  
(예: 저출력 RR에 대해서는 격납 기능이 필요하지 않을 수도 있음)
  - Main Safety Function\*을 갖추어야 함. 그러나 차등접근 가능  
(예: 냉각을 위해 잔열제거계통이 꼭 있어야 되는 것은 아님)
  - (허용기준 자체의 차등화가 아니라) 허용기준 만족 방법에 대해서 차등 접근함. Code & Standard를 차등 적용

\* Main Safety Functions

- Control of reactivity (safe shutdown)
- Cooling of radioactive material (removal of residual heat)
- Confinement of radioactive material

## • 일반 설계요건

- 구조물, 계통, 기기(SSC)의 등급화: 각 SSC의 중요도를 결정론적 방법에 따라 정하여야 하며 확률론적 방법과 공학적 판단으로 보강할 수 있음.
- 기술기준 (code and standard): IAEA 안전기준 같은 국제 기준이나 국가별 기준을 적용할 수 있음. 중요한 점은 SSC의 등급을 고려하여 적절한 것을 선택하여야 한다는 것임.
- 설계기준 (design basis): 가상 초기사건과 설계기준 사고를 선정하는 데 적용하는 요건에 대해서는 차등접근할 수 없음. 그러나 그렇게 결정된 설계기준 사고들의 조합 등을 통하여 설계기준을 정하는 데는 차등접근 가능.
- 신뢰도를 위한 설계: 다중성, 다양성 설계 등에 대해서 차등접근함.
- 시운전을 위한 설계: 시운전 중의 시험 및 측정을 위한 설계 항목들에 대해 차등접근함.
- 검사, 시험, 유지보수: 작업자의 피폭 제한에 대해서는 차등접근할 수 없음. 기기의 노후화에 따른 검사, 시험 등의 종류와 주기 등에 대해 차등접근함.
- 비상계획을 위한 설계: 경보계통, 통신계통 등의 설계나 비상훈련 등의 규모나 시행 주기 등에 대해 차등접근함. 또한 보조 제어실 설치 여부, 제어 자동화 등에 대해서 차등접근함.
- 해체를 위한 설계: 작업자의 피폭 제한 등을 만족하면서 차등접근함. 방사성폐기물 저장시설의 유무 등이 주요 차등접근 항목임.
- 방사선 방호를 위한 설계: 연구로의 규모에 따라 차등접근함.
- 안전해석: 안전해석의 범위와 깊이, 해석방법 등에 대해 차등접근할 수 있음.
- 인적 요소 및 인간공학, 연구로 활용과 설비 변경, 장기 정지 등에 대해서도 차등접근할 수 있음.

## • 특정 설계요건

- 원자로 및 반응도 제어계통: 설계 수명, 중성자속의 크기, 열적 및 기계적 스트레스 등에 따라 이들 설계에 차등접근하여야 함. 간단하지만 보수적인 요건을 둠으로써 광범위한 분석을 하지 않아도 됨.
- 원자로 정지계통: 정지 기능의 유무는 차등접근의 대상이 아니지만, 정지계통의 채널 수나 계측의 수준 결정에 차등접근을 적용할 수 있음. 제2의 독립된 정지계통의 필요성을 고려하여야 함.
- 원자로 보호계통: 보호계통의 설계에 있어서도 차등접근을 적용할 수 있음. 모든 가상 초기사건에 대해서 자동 정지가 필요 없다고 확신할 수 있으면 운전원 정지도 고려할 수 있음.
- 원자로 냉각계통 등: 정격출력 운전 중 및 정지 후 냉각 방식에 대해 차등접근을 적용할 수 있음.
- 격납 수단: 환경 방출 제한을 만족하는 한 차등접근을 적용할 수 있음.
- 계측 제어: 계측 제어 계통의 자동화는 설계기준에 근거하여야 하며 특히 유지 보수성을 고려하여야 함. 계측 대상, 계측기의 종류나 수량과 위치, 자동화의 정도 등을 차등접근을 통하여 정할 수 있음.
- 방사선 감시: 연구로의 출력 준위를 차등접근의 기준으로 하고 있음.
- 핵연료 취급 및 저장: 사용 핵연료의 종류 등에 따라 차등접근을 적용할 수 있음. 임계도, 기계적 파손, 부식 등이 주요 고려 사항임.
- 보조계통: 전기, 기기 냉각수, HVAC 등에 대하여 차등접근을 적용할 수 있음. 비상 전원의 종류나 용량은 원자로 냉각 방식, 운전 시간 등에 따라 달라지므로 일관성 있는 차등접근이 필요함.
- 방사성 폐기물 처리: 방사성 폐기물의 취급, 처리, 저장, 수송, 처분 등과 방출 감시 등에 대하여 차등접근을 적용할 수 있음. 규제 요건을 만족하여야 함.
- 건물 및 구조물: 이들이 어떤 안전 기능을 가지느냐에 따라 차등접근함. 이들의 자동화에 따라 다른 계통의 등급도 결정될 수 있으므로 면밀한 접근이 필요함.
- 안전에 중요하지 않은 기타 계통: 통상적인 산업 기준에 따라 설계함.

- 안전 관련 법령상 차등접근
  - 발전용원자로와 연구용원자로를 구분하여 조문을 둠으로써 차등화하고 있음. (예: 원자력안전법 제3장 제1절 및 제2절 vs. 제3절)
  - 연구로에 대해서는 많은 경우 원전에 대한 제 조문을 준용함. 즉, *mutatis mutandis* (필요한 변경을 가하여) 적용
  - 한편, 연구로 중에서도 열출력 기준으로 차등화하고 있음
- 연구로 안전심사지침 중 차등접근 (KINS/GE-N10 vol. 2, 2014)
  - "...발전용 원자로시설과 동등한 수준의 규제 대책과 요건이 적용되지 않을 수도 있다. 따라서 원자력안전관계법령의 규제요건이 연구용·교육용 원자로 시설에 적용되더라도 그 적용 수준은 원자로시설의 설계특성에 따라 크게 달라질 수 있다."
  - 차등접근 정신을 수용하고 있음 (원전 vs. RR, 대형 RR vs. 소형 RR)

# 원자력안전법 중 차등접근 (건설·운영)

KNS Workshop  
2016.10.26, 경주

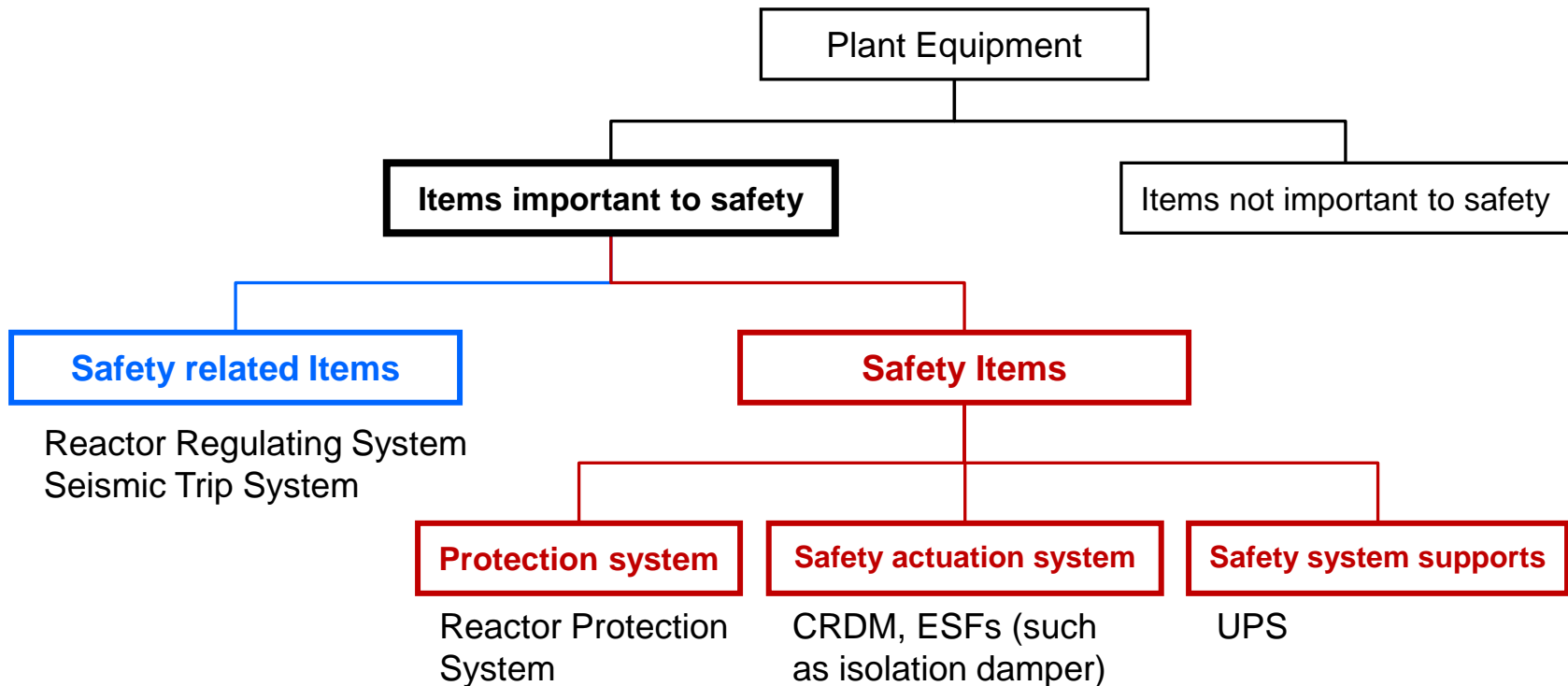
발전용원자로	연구용원자로	
조항	조항	준용 여부
제10조(건설허가)	제30조(연구용원자로 등의 건설허가)	11, 14조 준용
제11조(허가기준)		30조에 따라 준용
제12조(표준설계인가)		-
제13조(표준설계인가의 취소)		-
제14조(결격사유)		30조에 따라 준용
제15조(계량관리기준)		34조에 따라 준용
제15조의2(안전관련 설비 계약 신고)		34조에 따라 준용
제15조의3(부적합사항 보고)		34조에 따라 준용
제15조의4(성능검증 관리기관 지정 등)		-
제16조(검사)		34조에 따라 준용
제17조(건설허가의 취소 등)	제32조(건설허가·운영허가의 취소 등)	17조 2-4항 준용
제18조(기록과 비치)		34조에 따라 준용
제19조(승계)		34조에 따라 준용
제20조(운영허가)	제30조의2(연구용원자로 등의 운영 허가)	14, 21조 준용

발전용원자로	연구용원자로	
조항	조항	준용 여부
제21조(허가기준)		30조의 2에 따라 준용
제22조(검사)		34조에 따라 준용
제23조(주기적안전성 평가)		34조에 따라 준용
제24조(운영허가의 취소 등)	제32조(건설허가·운영허가의 취소 등)	17조 2-4항 준용
제25조(기록과 비치)		34조에 따라 준용
제26조(운영에 관한 안전조치 등)		34조에 따라 준용
제27조(발전용원자로 및 관계시설의 사용 정지 등의 조치)		34조에 따라 준용
제28조(발전용원자로 및 관계시설의 해체)		34조에 따라 준용
	제33조(사업의 중단폐지 등의 신고)	-
	<b>제34조(준용)</b>	15, 15의2, 15의 3, 16, 18, 19, 22, 23, 25-28조 준용
제103조(주민의견 수렴)		-
제104조(환경보존) - REIA		열출력 100 kW 이상

## ➤ (제안 1) 연구로용 규정 개발 또는 정비

- 기술기준 정비
  - 규칙 제17호 "원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙"
  - 연구로 특성을 반영한 조항을 신설하거나 별도 규칙을 제정
- 연구로 SSC 안전등급 규정 개발
  - 고시 제2016-10호 "원자로시설의 안전등급과 등급별 규격에 대한 규정"
  - 위 고시는 PWR용으로서 연구로용 규정 필요 (예: IAEA plant equipment의 구분)
- 연구로 PSR 규정 개발
  - 고시 제2013-31호 "원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술기준 적용에 관한 지침"
  - 가압경수로용 원자력발전소 주기적안전성평가 심사지침서, KINS/GE-N7, KINS (2015)
  - 연구로 특성(저온,저압 등)을 반영한 규정 및 심사지침 필요
- 연구로 안전심사지침 개정
  - "연구용,교육용 원자로시설 안전심사지침" KINS/GE-N10 Vol. 2, KINS (2014)
- KEPIC 보완
  - 연구로용 QA 기술기준, 연구로 SSC 등급 개발 시 적용 code 등 개발/보완

- IAEA의 SSC 분류 (IAEA Safety Glossary, 2007)



Cf. “Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants,” Specific Safety Guide No. SSG-30, IAEA (2014)

## ➤ (제안 2) IAEA 안전요건 및 차등접근 지침 수용

- 현황
  - "Safety of Research Reactors" (SSR-3)
  - "Use of a Graded Approach in ..." (SSG-22)
  - 부분적으로 수용 중 (예: 연구로 안전심사지침서의 목차)
- 필요성
  - 특히 원자력 신규 진입국들은 IAEA의 안전요건 및 지침들을 규제 근거 문서로 생각
  - 수출 연구로 사업 뿐만 아니라 국내 연구로 사업도 국제기준을 따를 필요가 있음
  - 차등접근으로 안전성을 해치지 않으면서 설계 경량화 가능
- 수용 방안
  - 현행 국내 규정과 양립성 검토
  - 필요 시 현행 규정 개정 또는 보완

## ➤ (제안 3) IAEA 문서 제정/개정 시 적극 참여

- IAEA 문서 추적 및 대응 체제 수립 (개인 단위 접촉 지양)