

연구용 원자로 기술 개발 및 수출 현황

2023. 5. 17., 제주국제컨벤션센터

한국원자력학회 원자로시스템기술연구부회



연구용 원자로 기술 수출 및 해외 협력 현황

2023. 05. 17.

한국원자력연구원 박수기



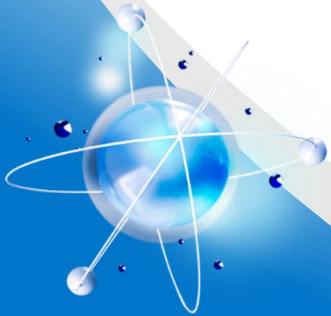
발표 내용

1. 연구로 모델 개발 현황

2. 연구로 기술 수출 현황

- 델프트공대 연구시설 구축 및 연구로 개조 사업
- 해외 TRIGA 연구로 계측제어계통 개선 사업

3. 연구로 해외 기술 협력



1. 연구로 모델 개발 현황



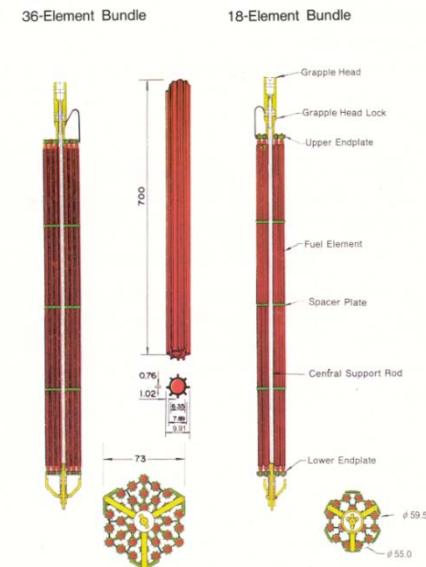
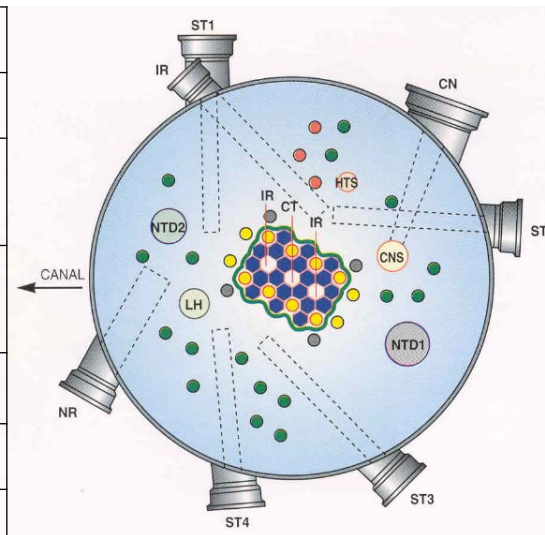
국내 연구용 원자로

	KRR-1 (TRIGA-Mark II)	KRR-2 (TRIGA-Mark III)	AGN-201	HANARO	KJRR
Owner (Site)	KAERI (Seoul)	KAERI (Seoul)	Kyunghee Univ. (Suwon)	KAERI (Daejeon)	KAERI (Ki-Jang in Busan)
Criticality	19/03/1962	10/05/1972	03/12/1982	08/02/1995	30/04/2027
Status	Decommissioned	Decommissioned	Operating	Operating	Under Construction
Power (thermal)	250kW	2 MW	10W	30 MW	15 MW
Supplier	GA	GA	AGN	KAERI/AECL	KAERI
Utilization	<ul style="list-style-type: none"> • Education and Training • Basic research • RI production 	<ul style="list-style-type: none"> • Education and Training • Basic research • Application of Beam & NAA • RI production 	<ul style="list-style-type: none"> • Education and training • Physics Tests 	<ul style="list-style-type: none"> • Neutron Beam • NAA • RI Production • NTD Production • Fuel and Material Irradiation • Education and Training 	<ul style="list-style-type: none"> • RI production (Mo-99) • NTD

HANARO (하나로)

- **Project Period : 1986 – 1995**
- **Supplier : KAERI (NI), KEPCO E&C (A/E), HDEC (Construction)**
- **Utilization**
 - 4 Standard Beam Tubes, 1 CNS, 1 Neutron Radiography
 - 2 NTD, 3 PTS, 1 HTS, 21 Vertical Holes for RI production and Fuel & Material Irradiation Tests
- **Design Features**

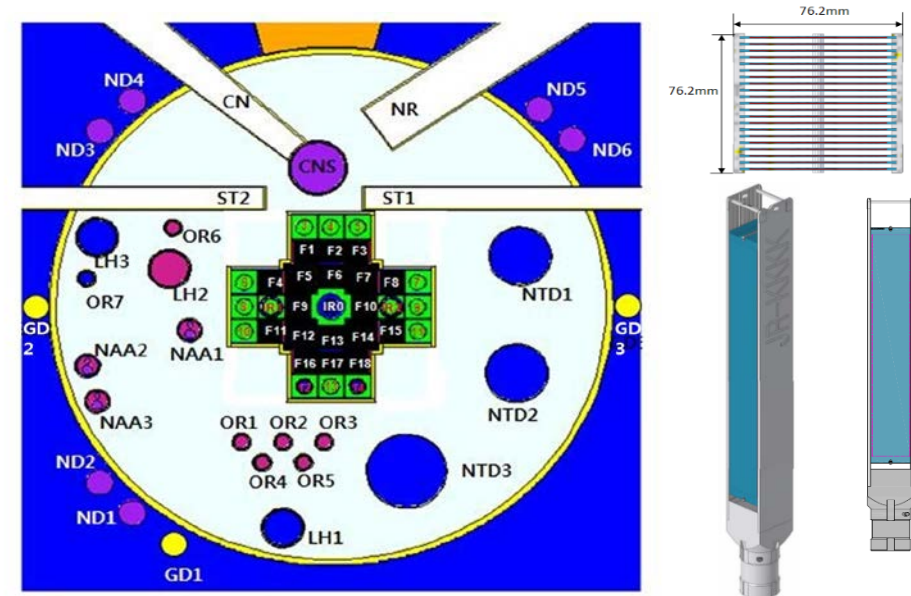
Reactor Type	Open Pool and Open Tank
Thermal power	30 MW
Max. thermal neutron flux	4.5×10^{14} (n/cm ² -sec)
Fuel	U ₃ Si (19.75wt%, 3.15gU/cc, Rod)
No. of Fuel	36-rod : 20, 18-rod: 12
Coolant / Mod.	Light water
Reflector	Heavy Water
Neutron absorber	Hafnium
Core cooling	Upward flow



Jordan Research and Training Reactor (JRTR)

- Project Period : 2010.03.-2017.06.
- Supplier : **KAERI and Daewoo E&C**
 - KAERI : Reactor System Design, Commissioning, Education and Training
 - Daewoo E&C : Architect Engineering, Procurement and Construction
- Scope of Supply : **Reactor system and Utilities, RPF, NAA, RTF, Training Center**
- Utilization
 - 2 Standard Beam Tubes, 1 CNS hole, 1 Neutron Radiography, 1 Thermal Column
 - 3 NTD holes, 3 PTS, Vertical Holes for RI production and Fuel & Material Irradiation
- Design Features

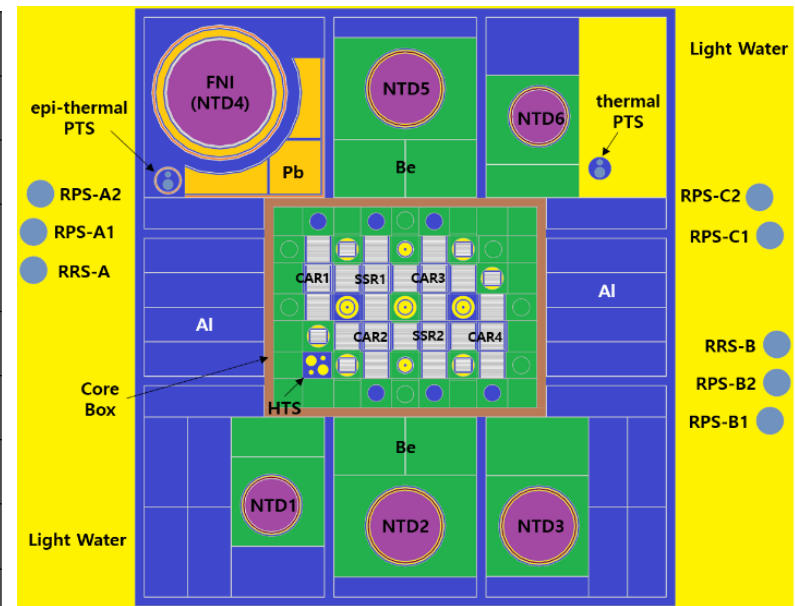
Reactor Type	Open Pool and Open Tank
Thermal power	5 MW
Max. thermal neutron flux	1.45×10^{14} (n/cm ² -sec)
Fuel	U ₃ Si ₂ (19.75wt%, 4.8gU/cc, Plate)
No. Fuel	18
Coolant / Mod.	Light water
Reflector	Heavy Water, Beryllium
Neutron abs.	Hafnium, B ₄ C
Core cooling	Downward flow



Medical Isotope & Radiation Application ReactOr (기장연구로)

- **Project Period : 2012.04.-2027.03.**
- **Supplier : KAERI**
 - KAERI : Reactor System Design, Commissioning, **Procurement of Main Components**
 - Daewoo E&C, HYUNDAI E&C and GS Const.: A/E, Procurement and Construction
- **Scope of Supply : Reactor system and Utilities, FMPF, RPF, RTF**
- **Utilization**
 - **6 FM irradiation holes, 6 NTD** including 1 FNI, 1 HTS, 1 Thermal PTS, 1 Epi-thermal PTS
 - 9 Vertical Holes for RI production
- **Design Features**

Reactor Type	Open Pool and Open Tank
Thermal power	15 MW
Max. ther. neutron flux	3.2×10^{14} (n/cm ² -sec)
Fuel	U-7Mo/Al-5Si (19.75wt%, 8gU/cc, 6.5gU/cc, Plate)
No. Fuel	SF : 16, FF : 6
Coolant / Moderator	Light water / Light water
Reflector	Beryllium, Aluminum
Neutron abs.	Hafnium
Core cooling	Downward flow



Low Power Research Reactor

■ Inherently Safe Design

- Low excess reactivity (~ 4 mk), high reactivity feedback, Natural circulation cooling
- **No fuel damage although all control absorber rods are withdrawn**

■ Core Configuration

- Fuel assemblies : 3 x 3 rods, 20
- Reflectors : Be blocks (32), Gr. Blocks (28), **Be block (Reactivity compensation)**

■ Utilization

- **3 irradiation holes for RI, 4 pneumatic transport systems**

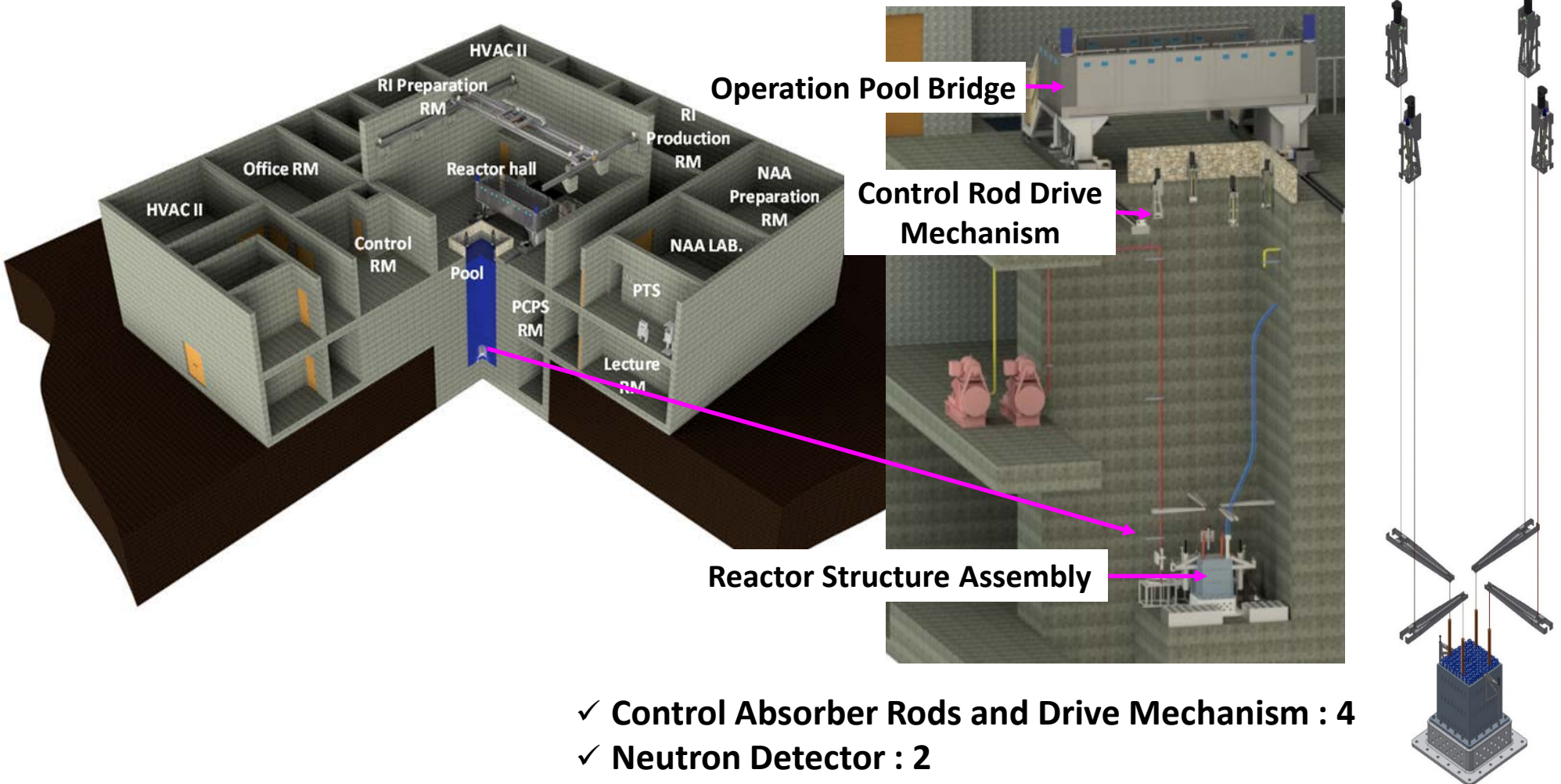
■ Design Features

Reactor type	Open pool and open tank
Thermal Power	50 kW
Max. ther. neutron flux	4.0×10^{12} (n/cm ² -sec)
Fuel	UO₂ (4.65wt%, Rod)
No. of Fuel	20
Coolant / mod.	Light water
Reflector	Beryllium, Graphite
Neutron abs.	B ₄ C
Core cooling	Natural circulation



Low Power Research Reactor

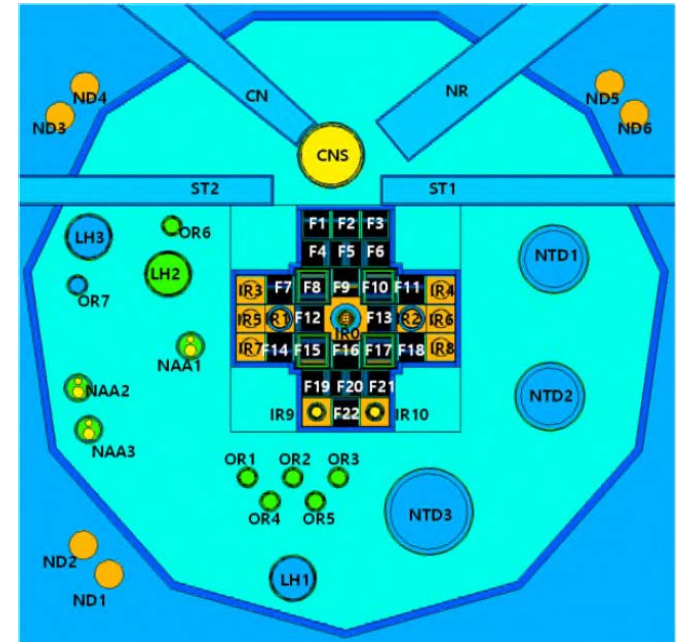
▪ Reactor Building and Pool



Medium Power Research Reactor

■ Design Features

Reactor type	Open pool and open tank
Thermal Power	10 MW
Max. ther. neutron flux	2.5×10^{14} (n/cm ² -sec)
Fuel	U-7Mo/Al-5Si (19.75wt%, Plate, 8.0gU/cc, 6.5gU/cc)
No. of Fuel	22
Coolant / mod.	Light water
Reflector	Heavy Water, Beryllium
Neutron abs.	Hafnium, B ₄ C
Core cooling	Downward flow



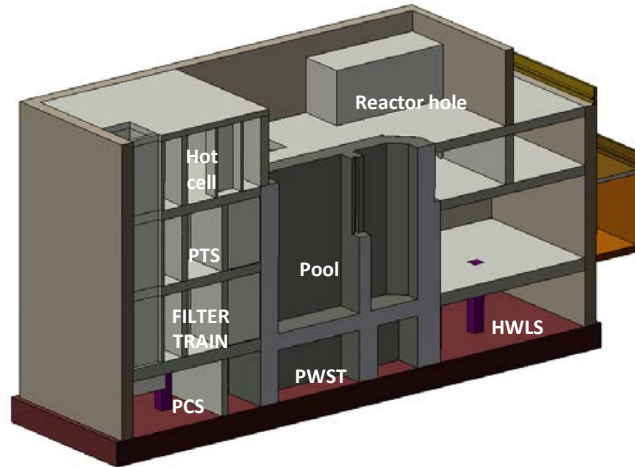
■ Utilization

✓ Cycle Length : 39 (JRTR) ⇒ 68 days

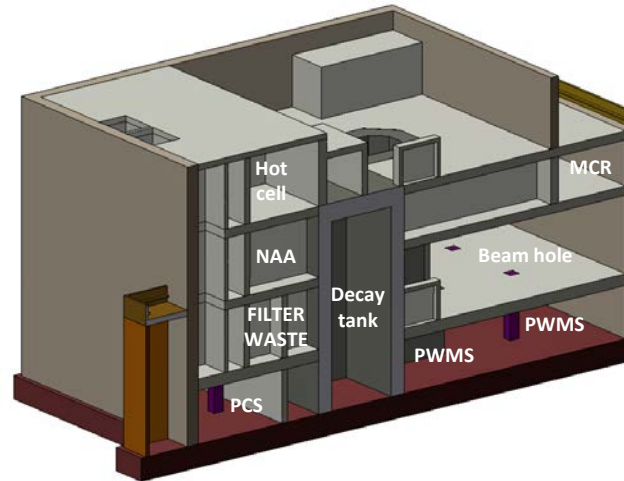
IR0	Ir-192	PTS for NAA	3
IR9	Mo-99	NTD	3
IR10	I-131	IR, OR, LH	Others
Neutron Beam Tubes	Standard 2 ea., Neutron Radiography 1 ea. Cold Neutron Beam 1 ea.		

Medium Power Research Reactor

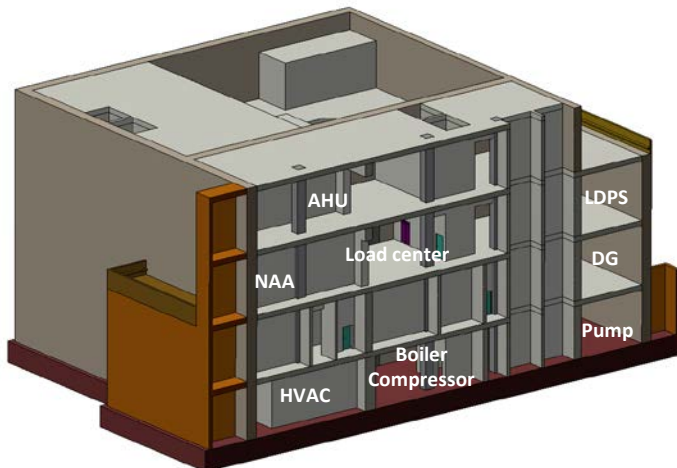
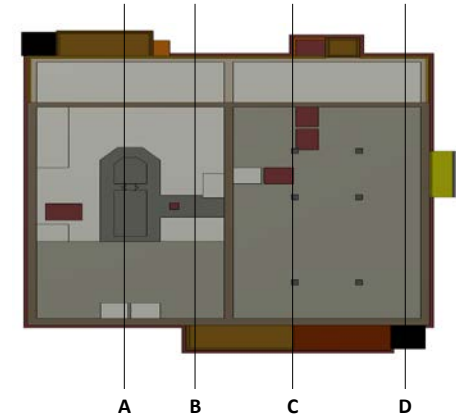
■ Reactor Building and Pool



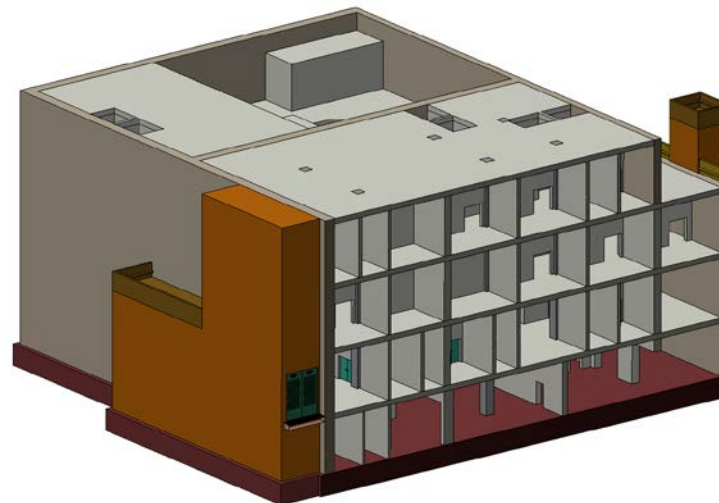
< Section A-A view >



< Section B-B view >



< Section C-C view >



< Section D-D view >

국내 연구로 수출 모델 요약

■ 확보한 모델

연구로 모델	이용 분야	수요국	주요특성	기술 현황
저출력연구로	교육/ 훈련용	원자력기술 후발국	~ 1 MW, 자연순환냉각, 봉형 UO ₂ 핵연료	기술보유, 수출모델 확보 (핵연료 제조?)
중출력연구로	다목적 연구용	원자력기술 후발국/개도국	1~10 MW, 하향류 노심 판형 U-7Mo/Al-5Si or U ₃ Si ₂ -Al 상부구동 제어봉/정지봉	기술보유, 수출모델 확보 (JRTR 수출 경험)
기장연구로	동위원소, NTD 생산 전용	원자력기술 선진국	15 MW, 하향류 노심 U-7Mo/Al-5Si 판형 하부구동 제어봉/정지봉	개발 중 안전등급의 비상노심냉각 계통 적용

■ 확보 필요 모델

고출력연구로 (10 ~ 30MW)	다목적 연구용	원자력기술 개도국/ 선진국	10~30 MW, 상향류 노심, 판형 U-7Mo/Al-5Si or U ₃ Si ₂ -Al 하부구동 제어봉/정지봉	예상 수요국 (방글라데시, 태국, 남아공, 미국)
-----------------------	------------	-------------------	--	--------------------------------

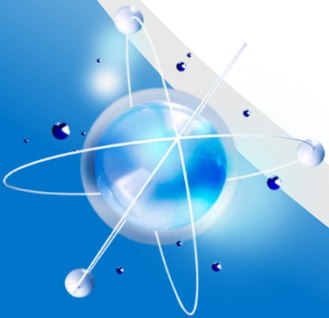
✓ 요소기술 개발 중

- 판형핵연료 고정장치, 상향류 반응도제어장치
- 안전성 검증 열수력 실험 자료 생산, 일차냉각계통/공학안전설비 설계기술
- 동적제어봉가 측정 기술, 스마트유지보수기술, 자동운전기술 등



2. 연구로 기술 수출 현황

- 델프트공대 연구시설 구축 및 연구로 개조 사업
- 해외 TRIGA 연구로 계측제어계통 개선 사업



Overseas Projects of KAERI in RRs

Project Name	Country	Period	Objective	Remarks
PCS Upgrade	Greece (DEMORITOS)	'09.5. ~ '13.5.	• Engineering & Safety Analysis for Replacing PCS of 5MW RR	Completed
Consulting on I&C Upgrade	Thailand (TINT)	'09.11 ~ '13.11	• Refurbishment & Digitalization of Control Room (TRIGA, 2MW)	Completed
ReDICS (I&C Upgrade)	Malaysia (MNA)	'12.6. ~ '14.3.	• Refurbishment & Digitalization of Control Room (TRIGA, 1MW)	Completed (EPC turnkey)
JRTR	Jordan (JAEC)	'10.3. ~ '17.6.	• Construction of 5MW RR and Exp. Facilities • Training & Education	Completed (EPC turnkey)
JRTR Op. Support	Jordan (JAEC)	'17.3. ~ '22.12.	• Technical Support for Operation	Completed
OYSTER	Netherlands (TU Delft)	'14.8. ~ '15.10.	• Basic Design	Completed
		'17.2. ~ '23.12.	• Detail Design, Fabrication, Installation, Commissioning	On-going
I&C Upgrade	Bangladesh (BAEC)	'21.7. ~ '23.11.	• Refurbishment & Digitalization of Control Room (TRIGA, 3MW)	On-going

델프트공대 연구로시설 구축 및 연구로 개조 사업

▪ 사업 개요

- ✓ 발주처 : Delft University of Technology
- ✓ 공급자 : 한국원자력연구원-현대엔지니어링 컨소시엄
- ✓ 사업 기간
 - 1단계 : 2014. 8. ~ 2015.10., 냉중성자 생산 시설 및 빔튜브 개조 기본설계
 - 2단계 : 2017. 2. ~ 2023.12., 상세설계, 제작, 설치, 시운전
- ✓ 주요 직무

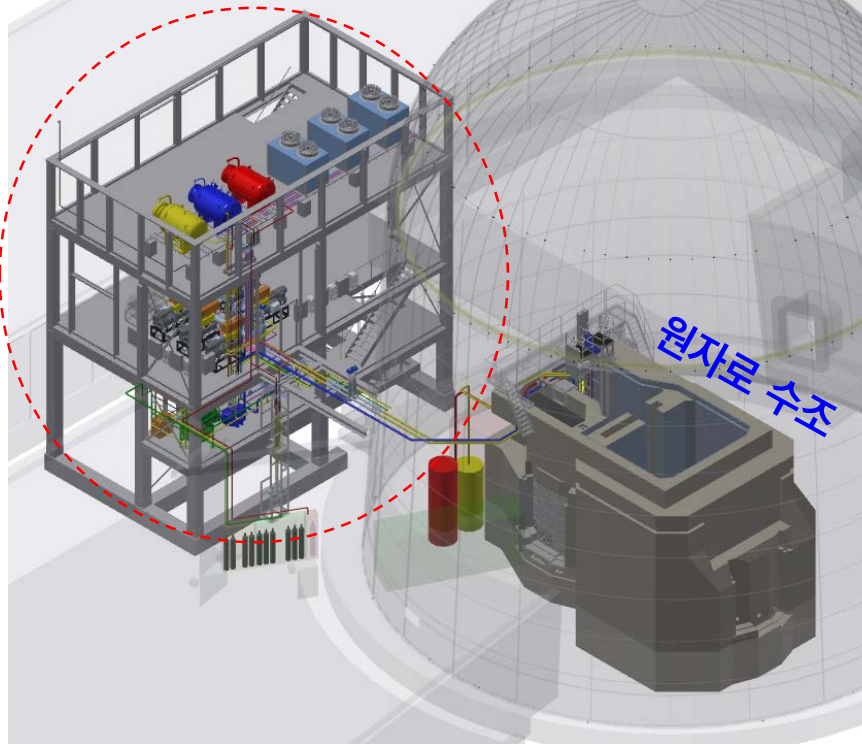
수조내기기 분야 In-Pool Assembly (IPA)	노심 앞에 설치되어 극저온 액체수소를 통해 열중성자를 냉중성자로 변환시키는 역할을 하는 핵심 장치 제작
빔 튜브 개조 분야 Beam Tube Modification	IPA 설치를 위해 기존 빔튜브를 제거하고 새로운 빔튜브를 설치
공정계통 분야 CNS Utility Systems	극저온 액체수소 생산에 필요한 공정계통 구축. (수소계통, 헬륨냉동계통, 진공계통, 가스 블랭킷 계통 등)

델프트공대 연구로시설 구축 및 연구로 개조 사업

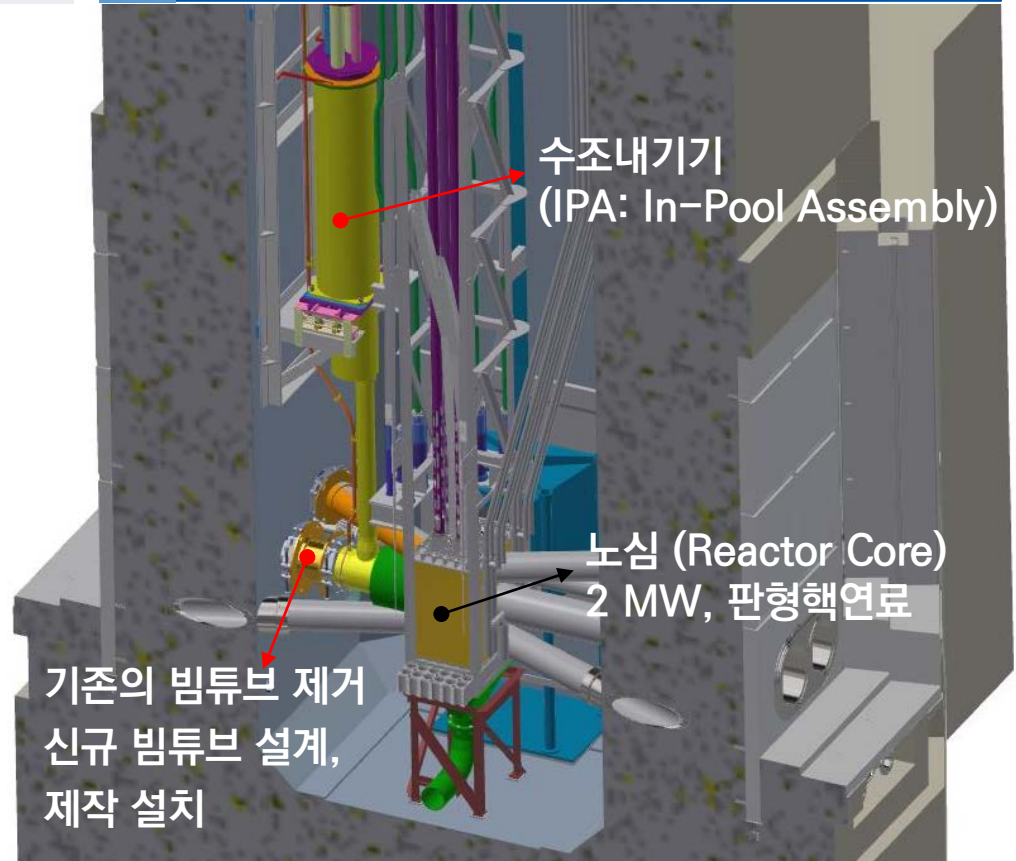
■ 주요 업무

원자로 건물

공정계통건물 (신축)



1 수조내기기 설계 / 제작 / 설치



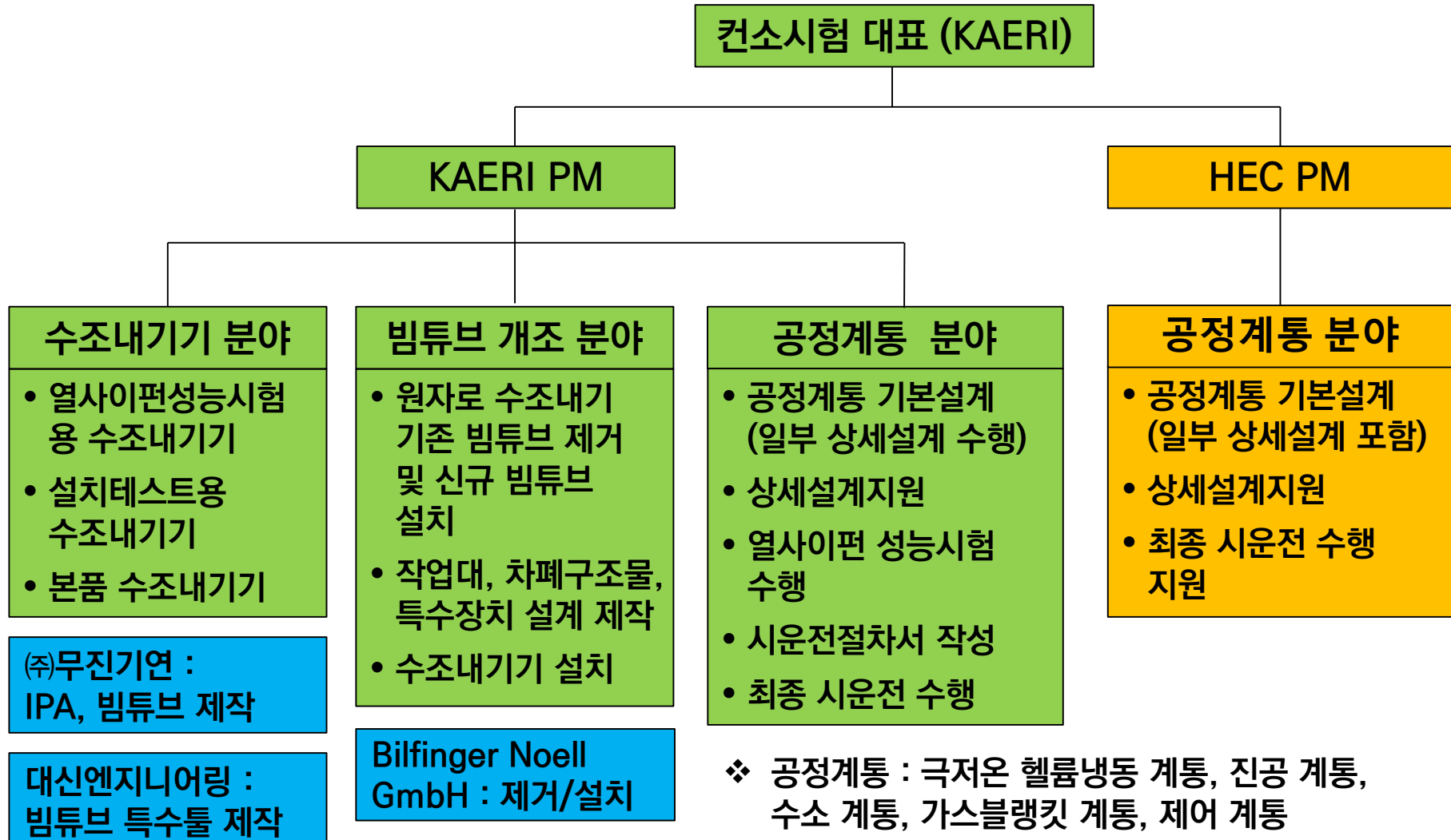
2 빔 튜브 제거 / 설계 / 제작 / 설치

3 공정계통의 기본 설계 (일부 상세설계) 및 최종 시운전

※ 시설계통의 상세설계 및 건설 : 발주처 업무

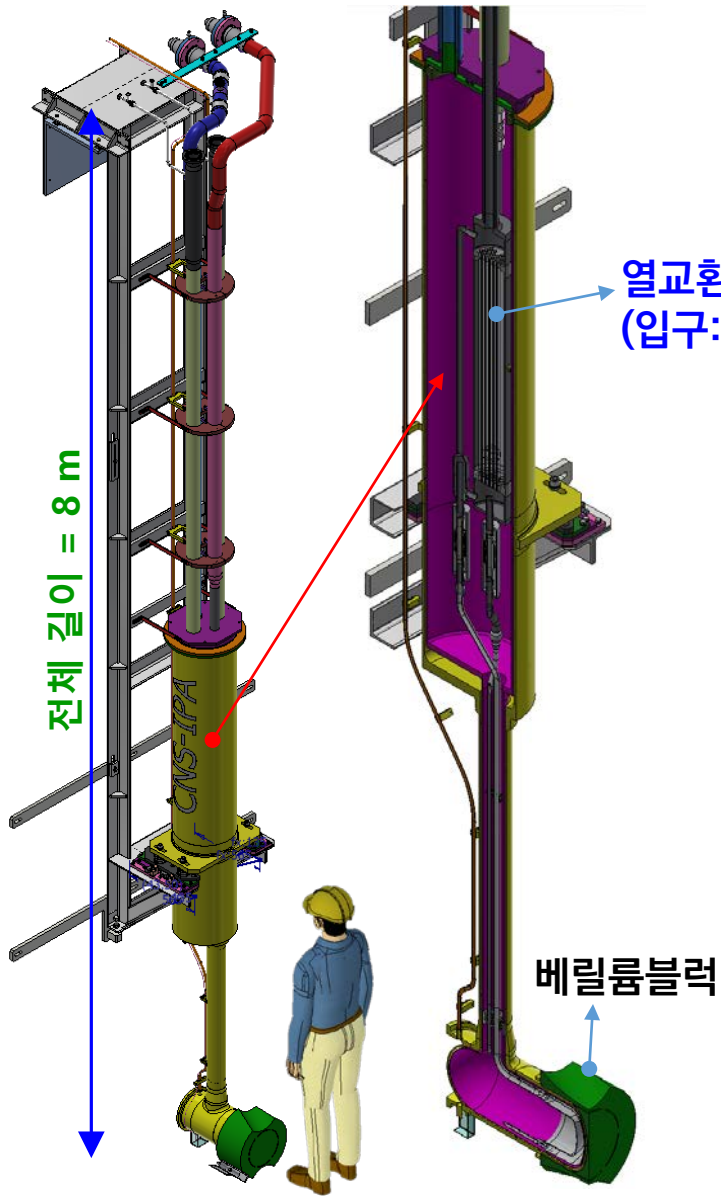
델프트공대 연구로시설 구축 및 연구로 개조 사업

▪ 기관별 업무 및 사업 수행 조직



델프트공대 연구로시설 구축 및 연구로 개조 사업

■ 수조내기기



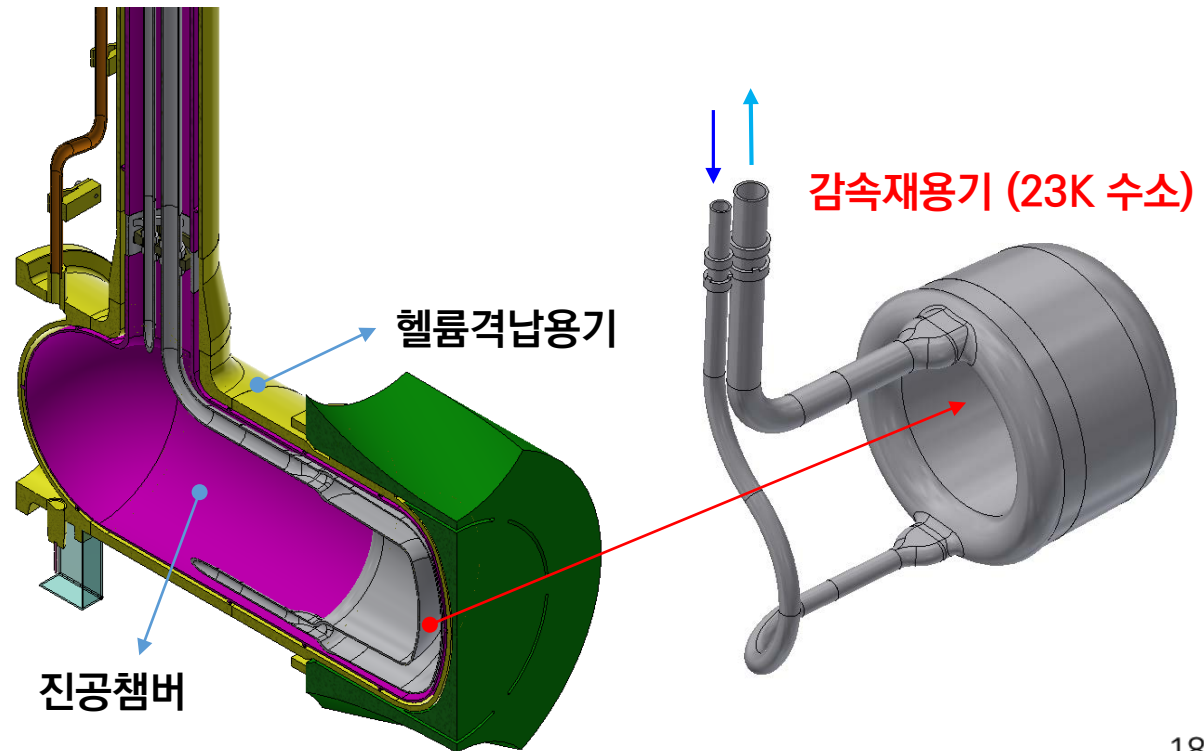
✓ 삼중 구조물 / 극한 운전 조건

- Grey: 수소 층 (운전 온도 < -250°C)
- Pink: 진공 층 (운전 압력 < $1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$)
- Yellow: 헬륨 층 (설계 압력 ; 30 bar)

✓ Gain Factor (5\AA : 15, 10\AA : 25)

✓ 설치 공간 제약 : 기존 구조물과의 간섭, 설계 제한

✓ ASME 기술 요건 + PED (유럽압력용기 요건)



델프트공대 연구로시설 구축 및 연구로 개조 사업

■ 수조내기기 설계 /제작 현황

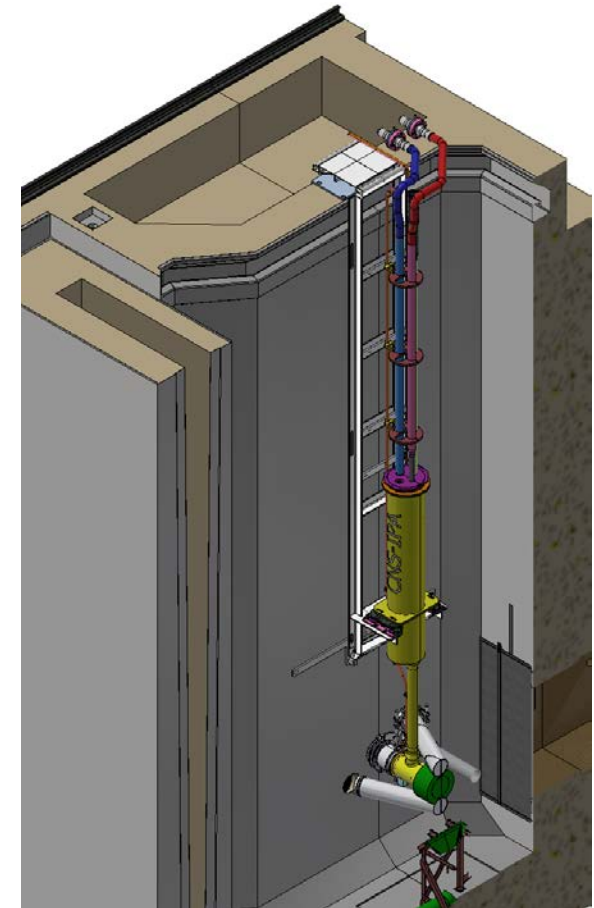
1. 열사이편 성능시험용
수조내기기 제작/시험 완료



2. 설치 테스트용 수조내기기
제작/시험 완료

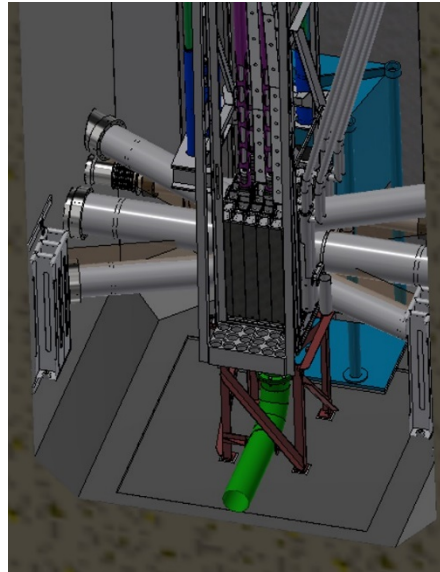
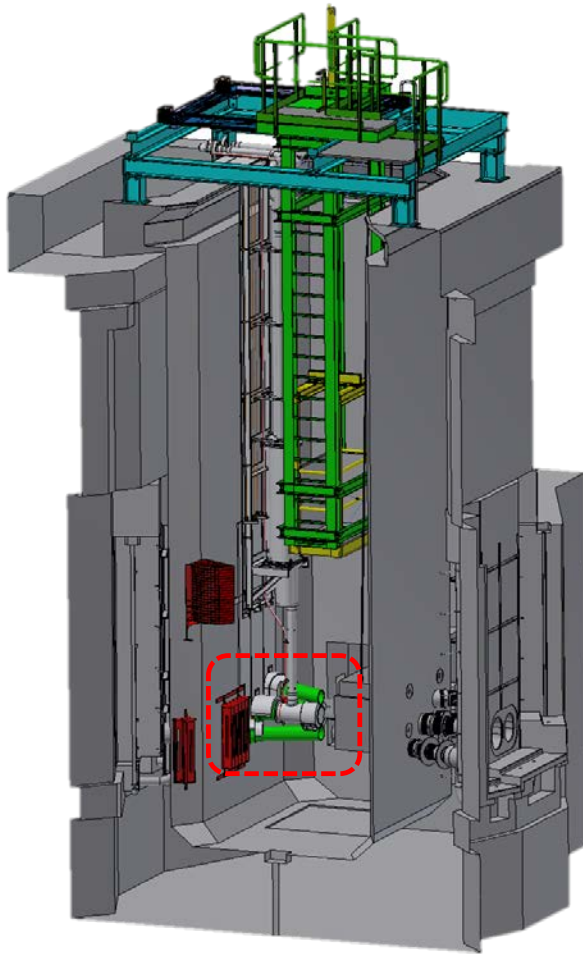


3. 실제 설치할 본품 수조내기기
제작 중

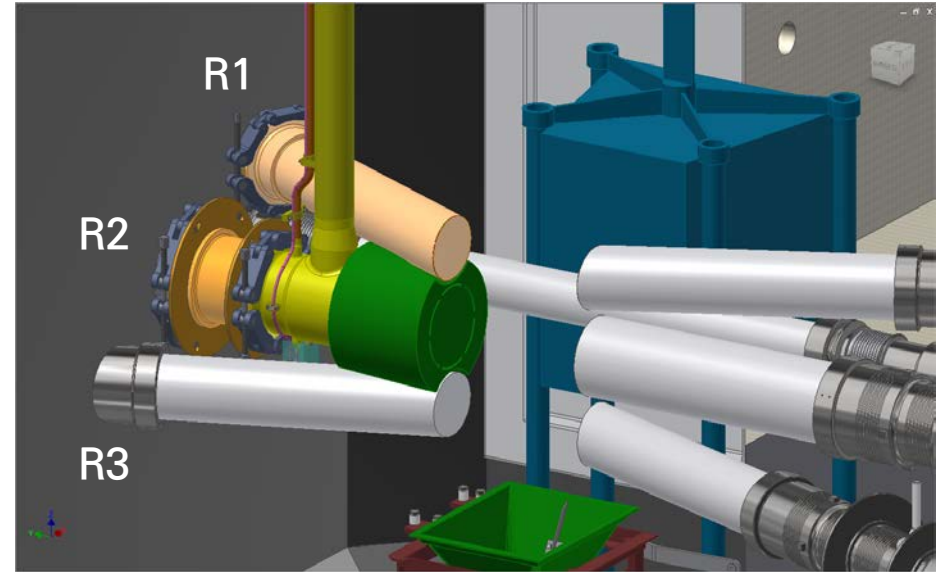


델프트공대 연구로시설 구축 및 연구로 개조 사업

■ 빔튜브 개조



빔튜브 개조 전

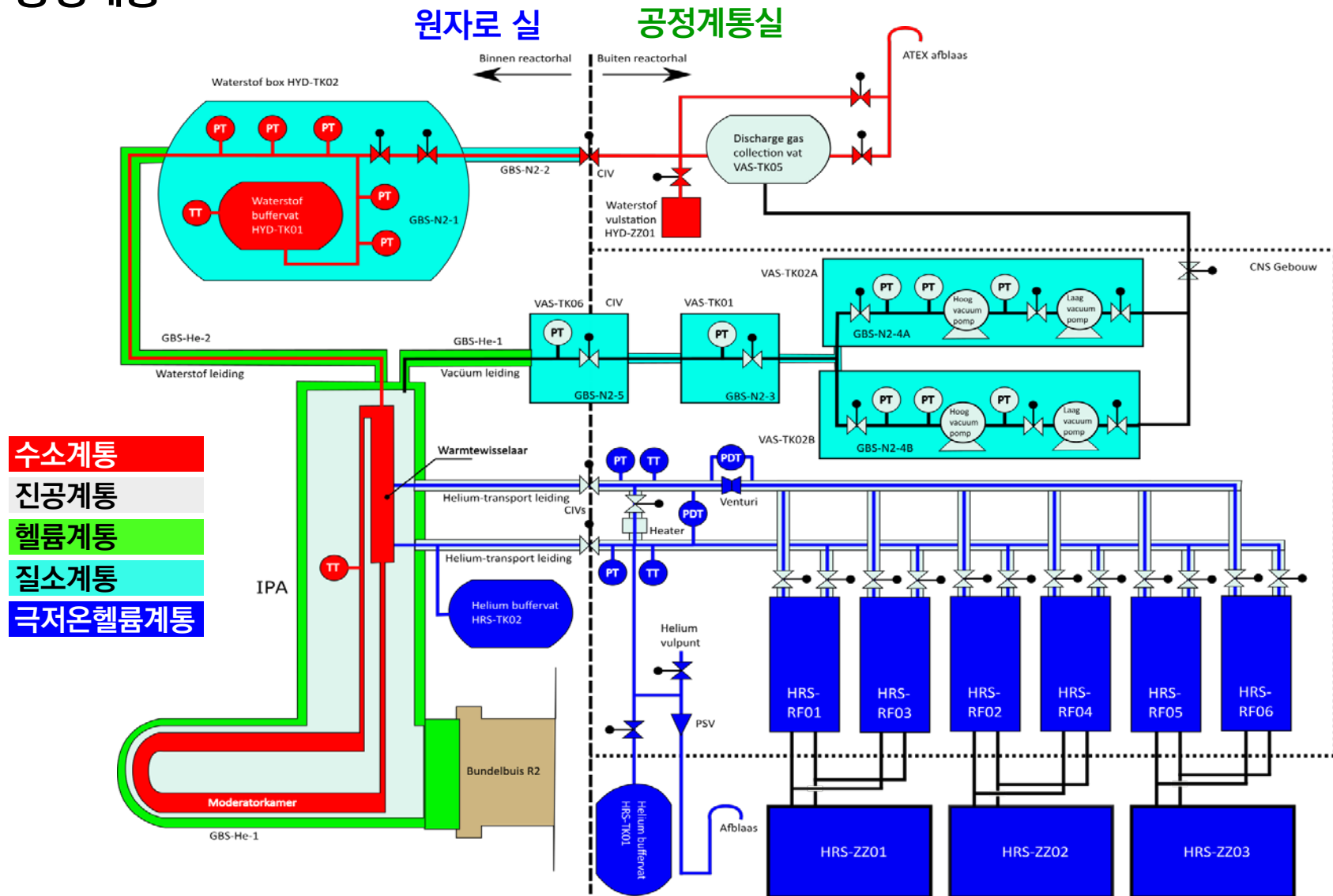


빔튜브 개조 후

- ✓ 기존의 빔튜브 R1, R2 제거
- ✓ R1, R2 개조 현황
 - R1: 기존의 빔튜브 길이와 같고, 장탈착이 가능하도록 QDS를 적용한 새 빔튜브 설치
 - R2 : IPA 설치 공간을 남겨 둔 빔튜브 제작 설치
현재는 IPA 설치 공간에 더미 빔튜브 (R2 dummy) 설치
 - 향후 업무 : R1, R2 dummy 분리, IPA 설치, R1 재 설치

델프트공대 연구로시설 구축 및 연구로 개조 사업

■ 공정계통



델프트공대 연구로시설 구축 및 연구로 개조 사업

■ 공정계통



Hydrogen Buffer Tank



Helium Buffer Tank



Cryogenerator (980W)



Chiller for Cryogenerator

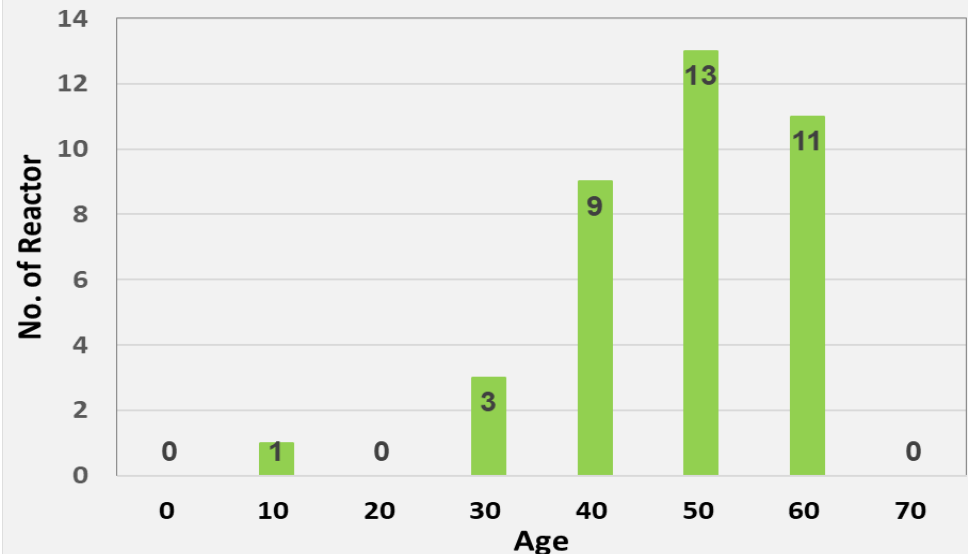
해외 TRIGA 연구로 계측제어계통 개선 사업



- KRR-1 (250 kW, 첫 임계 '62)
- TRIGA Mark-II
- Decommissioned
- 등록문화재 제577호 ('13.12.)

	World	USA
Operational	37	18
Shutdown	2	0
Under Decommissioning	7	3
Decommissioned	20	13
Total	66	34

[운영 중인 TRIGA 연구로 나이 분포]



해외 TRIGA 연구로 계측제어계통 개선 사업

- TRIGA 연구로 운영자의 계측제어계통 사업 발주 요인
 - ✓ Old Analog 기술 기반 계측제어계통
 - 노후화, 주요 자재 수급 어려움, 대체 자재를 이용한 수리에 한계
 - ✓ Upgraded 디지털 계측제어계통
 - 공급사인 GA사의 계측제어계통 사업 철수에 따라 기술지원 불가



Old Typical TRIGA Console



Upgraded TRIGA Console

해외 TRIGA 연구로 계측제어계통 개선 사업

원자력연구원의 계측제어계통 개선 사업 실적

	개선 전	개선 후	
태국 TINT TRR-1			
말레이시아 MNA TRIGA Mark II			
방글라데시 BAEC BTRR			

해외 TRIGA 연구로 계측제어계통 개선 사업

▪ 사업 개요

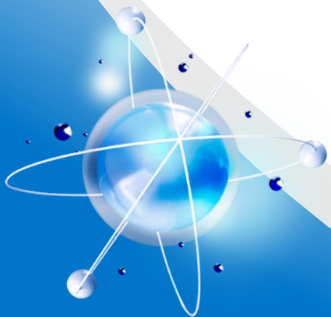
- ✓ 발주처 : Bangladesh Atomic Energy Commission
- ✓ 공급자 : 한국원자력연구원
- ✓ 사업 기간 : 2021.07.~ 2023.11.
- ✓ 주요 직무
 - TRIGA (3 MW, 첫 임계 '86) 연구로의 아날로그 계측제어계통을 디지털 시스템으로 일괄 교체
 - 사업 총괄, 기본설계, 시운전, 인허가 지원, BAEC 운영 인력에 대한 교육/훈련
- ✓ 협력 회사
 - RTP Korea : 디지털 계측제어계통 상세설계, 제작/납품, 현장 철거 및 설치 감독, 시운전 지원
 - Mirion : 핵계측계통 상세설계, 제작/납품, 현장 설치 감독 및 교육
- ✓ 주요 일정
 - (~'22.03) 기본설계, (~'22.09) 상세설계, (~'23.05) 주요 기자재 제작/납품
 - (~'23.08) 설치 및 시운전, 운영허가 획득 및 준공 (~'23.11)

해외 TRIGA 연구로 계측제어계통 개선 사업

▪ 추가 사업 개발

- ✓ 인도네시아 BATAN 연구소, TRIGA Mark II (2 MW, 첫 임계 '62) 운영 중
- ✓ GA사의 디지털 계측제어계통으로 업그레이드 했으나,
기술지원을 받지 못해 개선 사업을 희망하고 있음
- ✓ '21년 RFP 작성 지원을 요청 받았고, IAEA의 Scientist Visit Program 으로
KAERI 방문을 요청하였으나, 코로나로 중단
- ✓ 향후 BATAN 사업 수주가 예상됨

3. 연구로 해외 기술 협력



연구로 해외 기술 협력

■ 연구로 운영 현황('23.1) 및 건설 수요

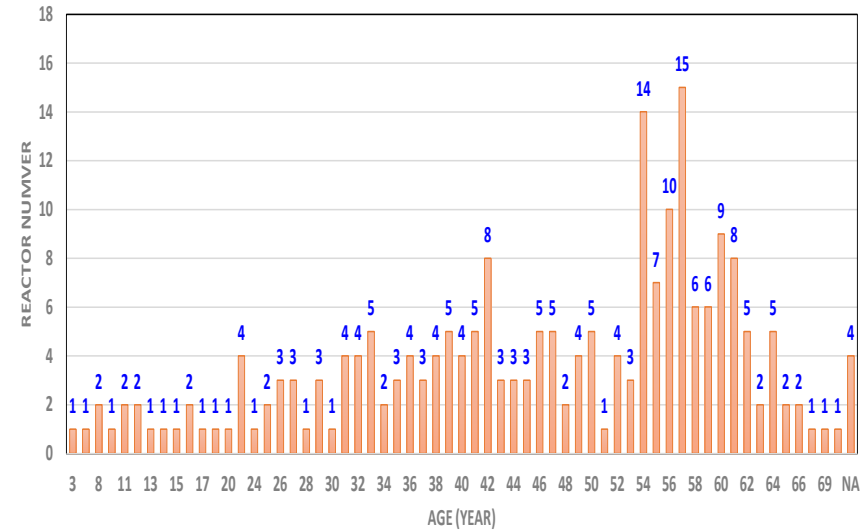
✓ 일시 정지 포함 운영 중인 연구로: 220기

✓ 40년 이상 경과 : 68% (159기)

✓ 50년 이상 경과 : 52% (115기)

✓ 60년 이상 경과 : 23% (50기)

➡ 교체, 개조 및 신규 건설 수요 예상



■ 연구로 도입 현황 (IAEA 자료)

검토 국가 (16개국, 16기) (Consideration)	Azerbaijan, Ethiopia, Ghana, Kenya, Malaysia, Mongolia, Myanmar, Tajikistan, The Philippines, Nigeria, Saudi Arabia, Senegal, South Africa, Sudan, Tanzania, Tunisia
준비 국가 (12개국, 12기) (Preparatory Work)	Bangladesh, Belarus, Belgium, Bolivia, China (2), Japan, Tajikistan, Thailand, USA, Vietnam, Zambia
실행 국가 (8개국, 13기) (Implementation)	Argentina (2), Brazil, France, India (2), The Netherlands, The Republic of Korea, Russian Federation (3), Saudi Arabia, Ukraine

■ 방글라데시

- ✓ TRIGA (3 MW, 첫 임계 '86) 연구로 운영 중, 15~20 MW의 다목적연구로 건설 희망
- ✓ KAERI-BAEC 간 워크숍 개최 ('19.02, '19.11, '20.02)
- ✓ 원자력협력재단 주관 Webinar 개최, KAERI의 기술자문 ('20.06)
- ✓ 연구로 이용 요건 및 설계 요건 수립 지원 ('20), 환경영향평가서 작성 지원 ('21.03)
- ✓ 연구로 건물 배치 지원 ('21.09), 연구로 부지 및 환경 조사보고서 검토 ('21.11)
- ✓ 연구로 건설 타당성평가 보고서 정부 제출 ('22), COVID 및 경제 문제로 사업 결정 지연

■ 태국

- ✓ TRIGA (2 MW, 첫 임계 '77) 연구로 운영 중, 10~20 MW의 다목적연구로 건설 희망
- ✓ KAERI-TINT 워크숍 개최 ('20.02), 다수의 화상 회의
- ✓ 원자력협력재단 주관 Webinar 개최, KAERI의 기술자문 ('20.06, '23.01)
- ✓ 연구로 노심 모델 제안 및 이용 요건 수립 지원 ('21.07~11.)
- ✓ 건설부지 주민의 반대로 주민설명회 개최가 지연됨에 따라 입찰 착수가 지연되고 있음
- ✓ 원자력협력재단과 TINT가 주관, KAERI의 기술자문 예정 ('23.06.12~13)
 - Onsite Consulting the Safety of the New Research Reactor to Secure Residents' Credibility

▪ 케냐

- ✓ 원전 도입을 위한 원자력 인력 양성 및 인프라 구축을 위한 연구로 건설을 추진 중
 - 케냐의 연구로 이용 요건 및 설계 요건 수립 지원
 - 5 MW 연구로 제안, 동위원소생산시설, 중성자방사화분석시설, 중성자빔 이용연구시설, 폐기물처리시설, 부대시설
 - 경제성 평가 모델 제공 및 KIPPRA의 경제성 평가 지원
 - '22년 말 연구로 건설 타당성 연구 완료
 - 향후 예상 일정 : '23 예산 확보, '25년 사업자 선정
- ✓ 케냐의 원자력연구센터(NRC)의 기능 및 필요 시설에 대한 자문 ('21.03)
- ✓ 원자력 인력 및 원자력 인력 개발 교육 ('22.02.14~17)
 - KAERI의 원자력교육센터 주관
 - NuPEA 및 케냐 Stakeholder 80여명이 화상 교육에 참석

■ 남아프리카공화국

- ✓ 남아공원자력공사(NECSA)가 SAFAR-1 (20 MW, 첫 임계 '65 임계)를 운영 중
- ✓ ('11.02) NECSA가 동위원소 전용로 입찰 착수
 - '사전자격심사 완료 ('11.06), 원전 도입과 연계한다며 입찰 중단 ('12.01)
- ✓ ('16.12) 남아공전력공사(EsKom)이 원전 사업 추진
 - 연구로 포함, 원전에 대한 Request for Information (RFI) 발행, RFI 답변 제출 ('17.04)
 - RFI 및 미국, 러시아, 한국 등과의 국제협약 체결이 남아공 대법원이 위법이라고 결정하며 사업 중단
- ✓ ('21.09) NECSA가 다목적연구로 건설 다시 추진 중
 - RFI 발행 ('22.02.), RFI에 대한 답변 제출 ('22.04)
 - 사업 범위 : 다목적 원자로, 핵연료/재료 조사시험시설, 중성자빔이용연구시설, 핵연료제조시설, 동위원소생산시설, 기타 부대시설
 - ('23.03) 개념설계 완료
 - ('23.06) 타당성 연구 완료
 - 일정대로 추진된다면 '24년 입찰 착수 예상

■ 요르단

✓ JRTR 운영지원 사업 ('17.08 ~ '22.12)

- KAERI의 JRTR 설계 인력 3인, JRTR에 12개월 파견, 연구로 운영 지원
- KAERI의 JRTR 설계 인력 및 하나로 전문가 4인, 1차 가동중검사 지원 ('22.11.21~12.14)

✓ KAERI 퇴직자 3인, 1년 반 ~ 3년, JAEC에 채용, 연구로 운영 지원

✓ JAEC이 JRTR에 NTD 설치 희망

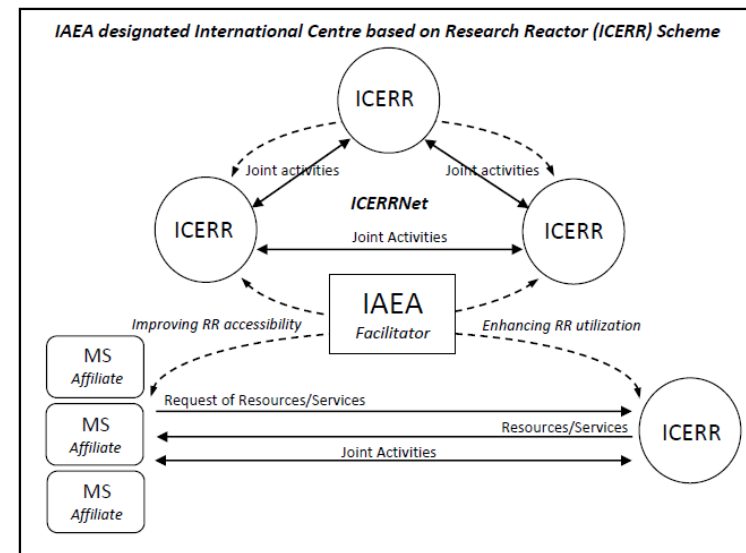
- 제안서 제출 요청에 따라 원자력연구원이 제안서 작성 제출
- JAEC이 예산 확보 중

■ KAERI, ICERR 선정

✓ IAEA가 ICERR (International Centers based on Research Reactors)로 선정 ('19.)

- HANARO, RIPF, NBF, IF, IMEF, NTC
- Education & Training, Professional Training
- International R&D Joint Project

✓ CEA, RIAR, SCK-CEN, INL, ORNL



감사합니다.

