

“소형모듈원자로(SMR) 개발 현황과 산업연계 및 육성” 세미나
창원컨벤션센터, 2021년 10월 20일(수)

우리나라 SMR 개발 현황

2021.10.20

한국원자력연구원 강한옥



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

Small Modular Reactor

01

| 원자력 기술의 특징

02

| SMR이란?

03

| 국내 SMR 개발(경수로)

KAERI

Korea Atomic Energy Research Institute

04

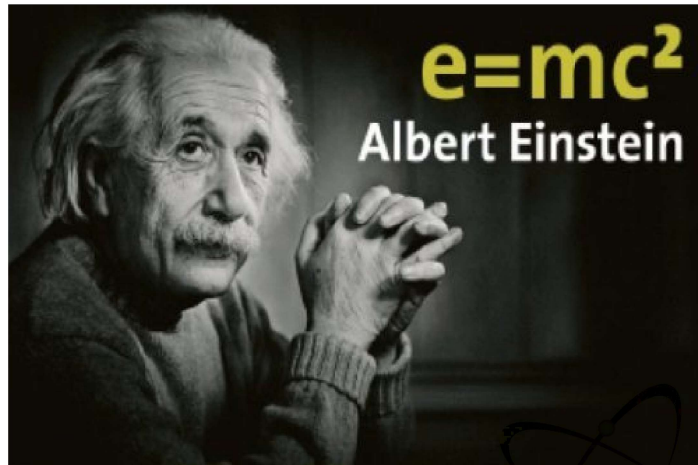
| SMR 혁신기술 개발

05

| 결 론

KAERI

원자력 에너지 개요



□ Einstein의 특수 상대성 이론 (1905년)

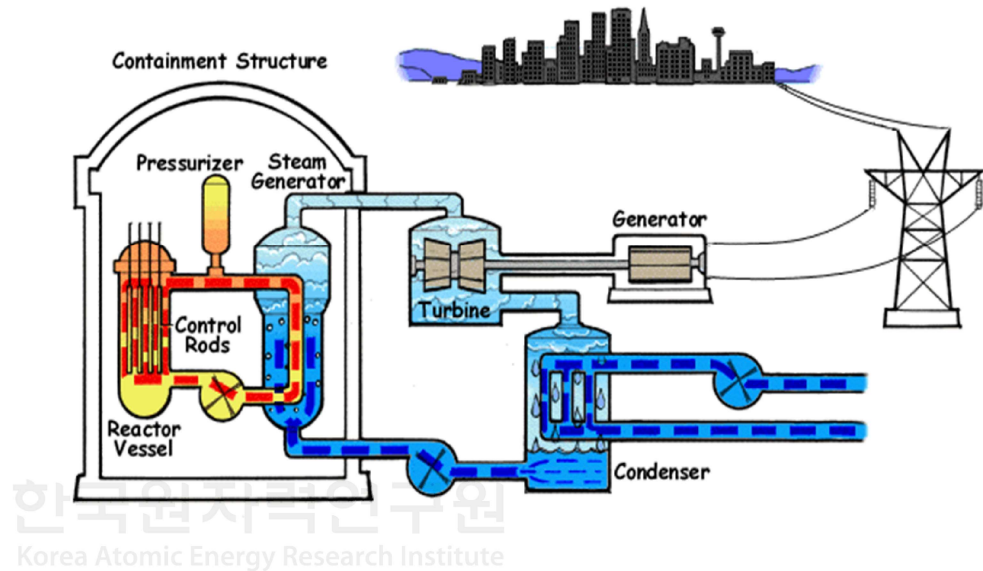
$$\Delta E = \Delta m \cdot C^2$$

C : 광속도 (3×10^{10} cm/sec), m : 물질의 정지질량

□ 1g의 물질이 핵분열 혹은 핵융합 반응에 의해 모두 에너지로 변환하였다면, 그 값은...?

$$\begin{aligned} \Delta E &= 1 \text{ g} \cdot (3 \times 10^{10} \text{ cm/sec})^2 = 9 \times 10^{20} \text{ g} \cdot \text{cm}^2/\text{sec}^2 \\ &= 9 \times 10^{20} \text{ erg} = 9 \times 10^{13} \text{ joule} \\ &\doteq 2 \times 10^{13} \text{ cal} = \mathbf{2 \times 10^{10} \text{ kcal}} \end{aligned}$$

⇒ 이 에너지는 약 3,000 kg의 석탄이 연소할 때 방출하는 열량에 해당한다.



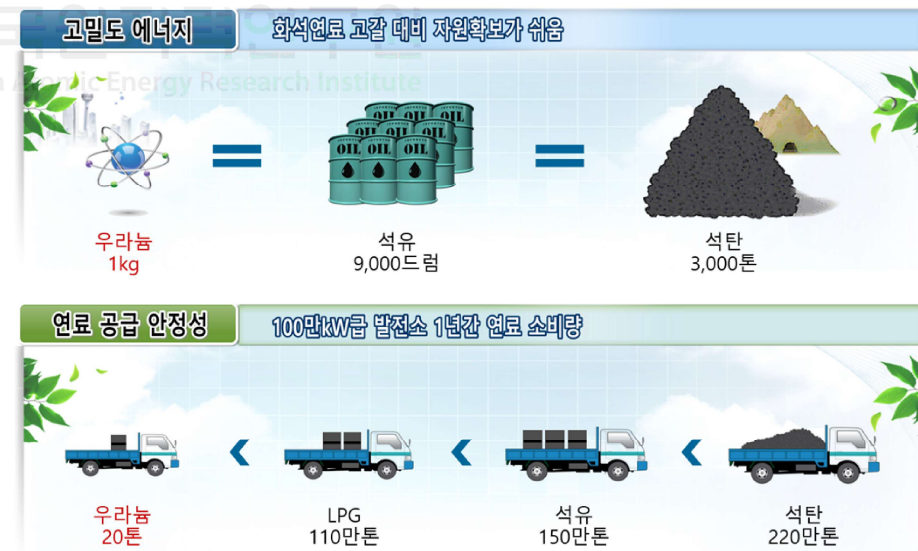
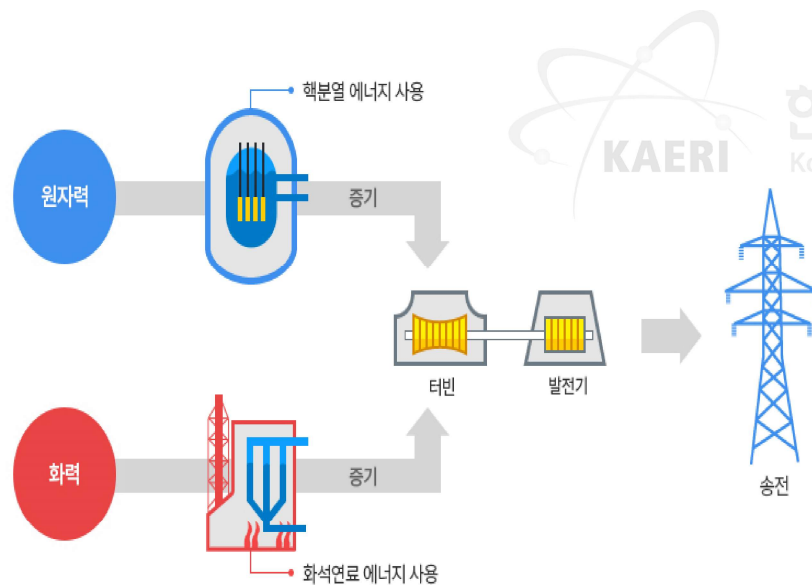
원자력에너지의 원천은 기술

원자력은 고밀도 에너지

- 우라늄 1kg은 석탄 3,000톤에 해당

원자력 부가가치의 대부분은 기술에서 발생

- 우리나라는 세계 최고수준의 원자력 건설/운영/기술 확보

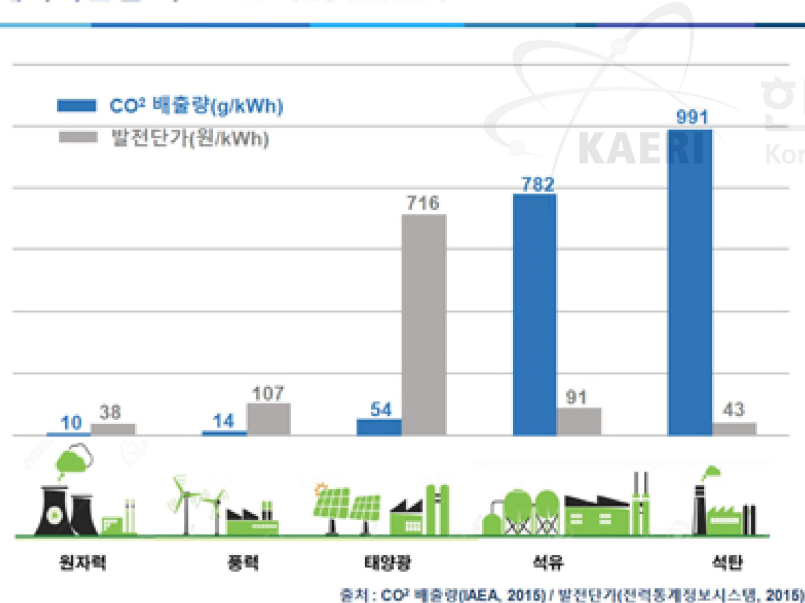


원자력과 기후위기

탄소 배출을 줄이기 위해 원자력발전이 다시 주목받고 있음

- 미국, 영국, 프랑스, 일본, 중국은 원자력을 기후변화 대응수단으로 활용
- 유엔기후변화 정부간 협의체(IPCC)는 전 세계 원전 용량이 2020년 10.8 EJ 에서 2050년 21.9 EJ로 증가하여, 연 2.5% 성장 예상

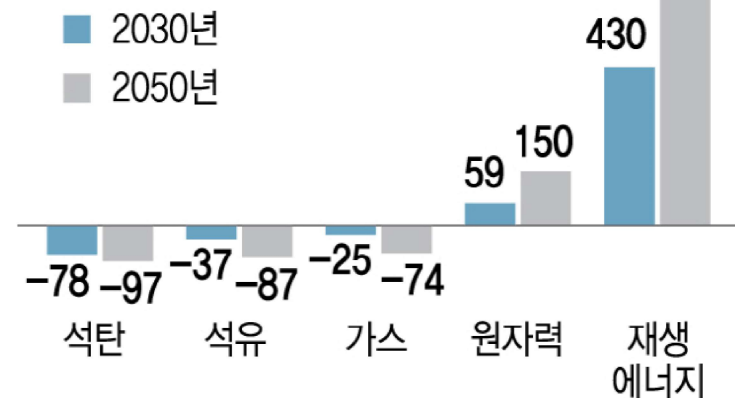
에너지원별 비교 - CO₂ 배출량 및 발전단가



지구온도 상승 1.5도 제한 시 에너지원 비중 변화 (단위: %)

※1차에너지 중 각각 비율(2010년 대비), 재생에너지는
바이오매스 제외
※P1 시나리오 기준

자료: 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)



Small Modular Reactor

01

| 원자력 기술의 특징

02

| SMR이란?

03

| 국내 SMR 개발(경수로)

KAERI

Korea Atomic Energy Research Institute

04

| SMR 혁신기술 개발

05

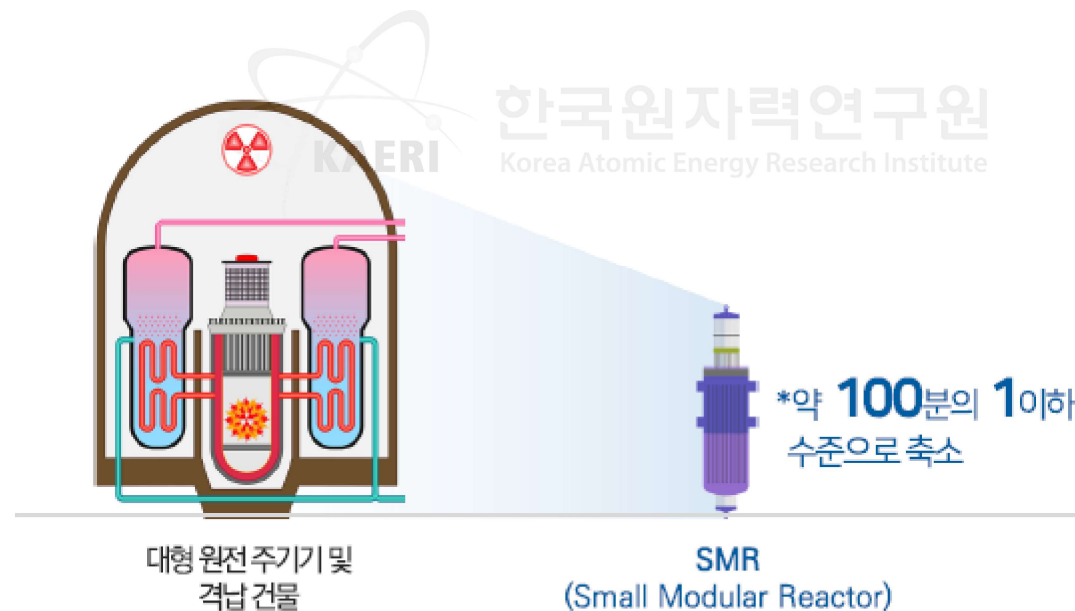
| 결 론

KAERI

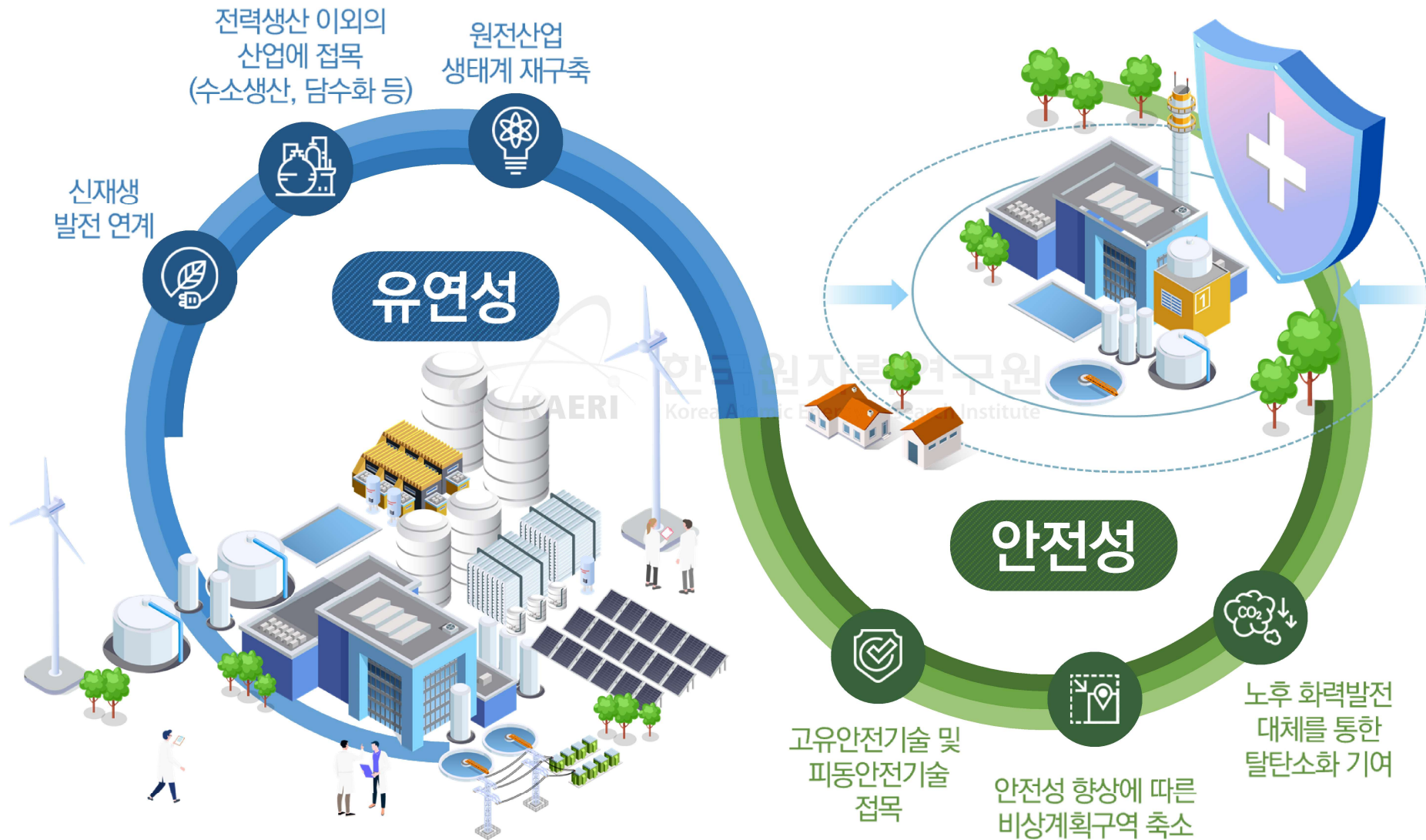
SMR이란?

소형모듈원자로(SMR: Small Modular Reactor) : 300 MWe 이하의 원자로

- 증기발생기, 냉각재 펌프, 가압기 등 주요기기를 하나의 용기에 일체화 가능
- 모듈 형태로 제작, 이송 및 건설이 가능하여 건설공기 단축과 건설비용 절감 가능
- 소형이라는 특성을 이용하여 다양한 지역 및 발전 목적에 따라 활용 가능



왜 SMR이 주목 받는가?



SMR 시장 전망

2035년까지 전세계 65~85GW 규모 시장 전망



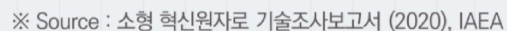
※ Source : Small Modular Reactors – once in a lifetime opportunity for the UK (2017)



(‘30~40년, 연간)

On-grid	국제 시장 규모	경쟁 전력원
석탄 화력 발전 대체	100조원 이상	천연 가스
Off-grid	국제 시장 규모	경쟁 전력원
오지	30조원	디젤
Off-grid	국제 시장 규모	경쟁 전력원
중공업 증기 공급	12조원	천연 가스
Off-grid	국제 시장 규모	경쟁 전력원
광산	3.5조원	디젤

※ Source : Canadian SMR Roadmap: Economic and Finance Working Group Report (2018)



해외 SMR 개발



* 해외의 경우 미국의 NuScale 원전이 기술성, 사업성 측면에서 가장 앞서있다고 평가됨

세계 SMR 개발 현황 (2/2)

총 71기
노형이 개발 중으로
미국, 러시아가 주도



개발 경험이
가장 많은
경수형이 주류

- 가압경수로(23기) 등
물 기반 원자로 31기
- 4세대 원전인 초고온가스로
14기, 고속중성자로 11기,
용융염로 10기 등 개발 중

개발 초기 단계로
시장 형성중

- (개발단계) 개념설계 40기,
기본설계 5기 등 개발
초기단계
- 상용화를 앞둔 노형은 운영
1건, 건설 중 2건, 설계인증
2건 * 수준

* 한국 SMART 인증 2012년,
미국 Nuscale 인증 2020.8월

※ IAEA 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」 ('20.9월)

Small Modular Reactor

01

| 원자력 기술의 특징

02

| SMR이란?

03

| **국내 SMR 개발(경수로)**

KAERI

Korea Atomic Energy Research Institute

04

| SMR 혁신기술 개발

05

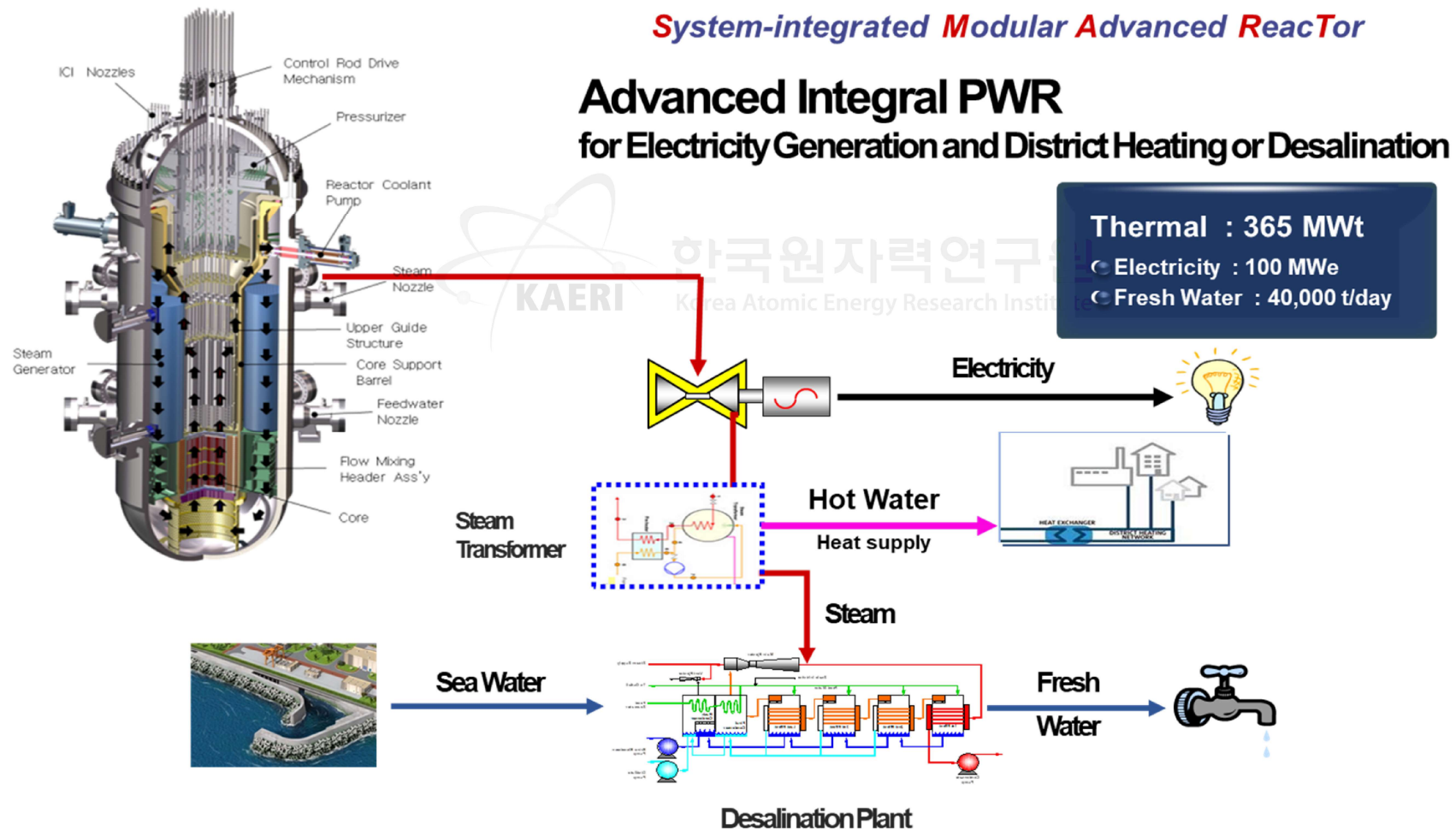
| 결 론

KAERI

SMART 개요

ALL IN ONE:

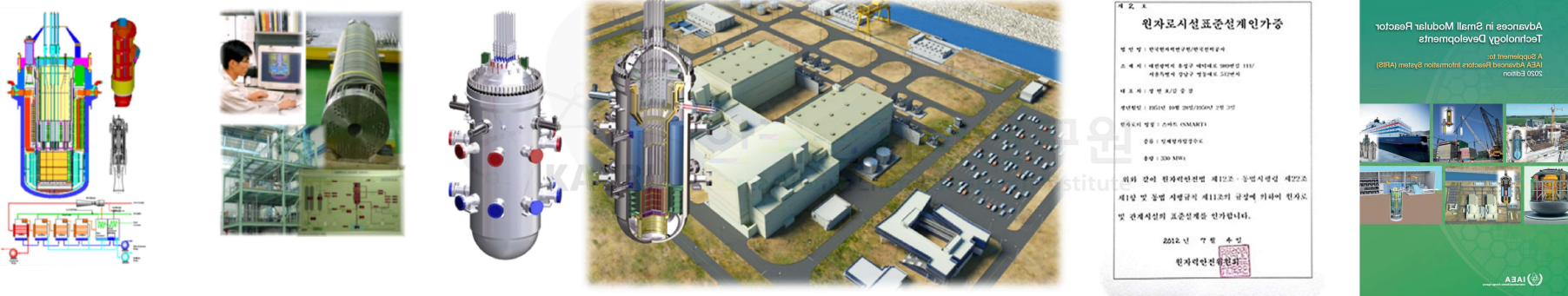
주요 기기를 하나로 합쳐 대형사고 가능성 원천 제거



SMART 기술 개발

» 자립을 이룩한 원전기술을 활용하여 신성장동력 창출을 위한 '수출 전략형 원자로' 개발 필요

- '97년부터 소규모 전력생산 및 해수담수화 시장을 겨냥하여 소형 일체형원자로인 SMART 개발 착수
- 일체형원자로 중 세계 최초로 표준설계인가를 획득('12.7)하여 상용화 기반 마련
- 투입 예산: '12년 까지 3,134억원, '13-'19년까지 1,775억원 투입 (정부, 민간, 사우디)



SMART 기술개발 경과



SMART 건설전설계 (Pre-Project Engineering)



» 한-사우디 SMART 파트너십 1단계 협력 사업

» SMART 첫호기 설계

◆ 사업 기간: 2015.12 ~ 2018.11

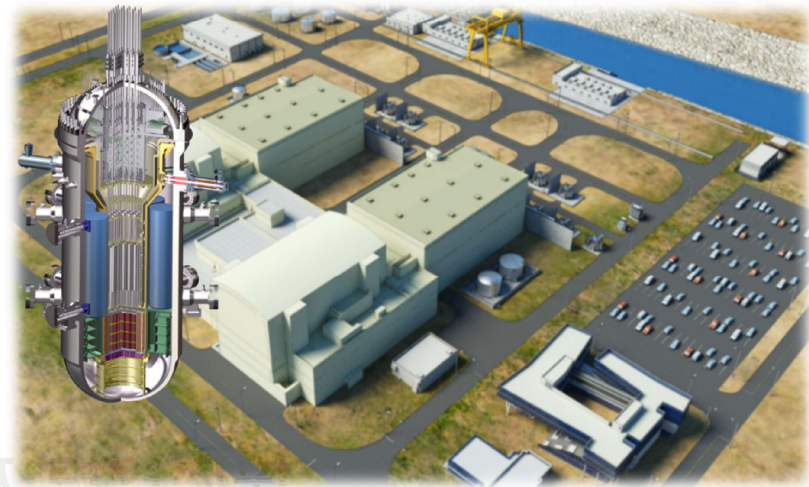
◆ 수행 업무

- 원자로계통
- 핵연료 개발
- 동력변환계통
- 주요기기 개발 및 검증
- 예비안전성분석보고서

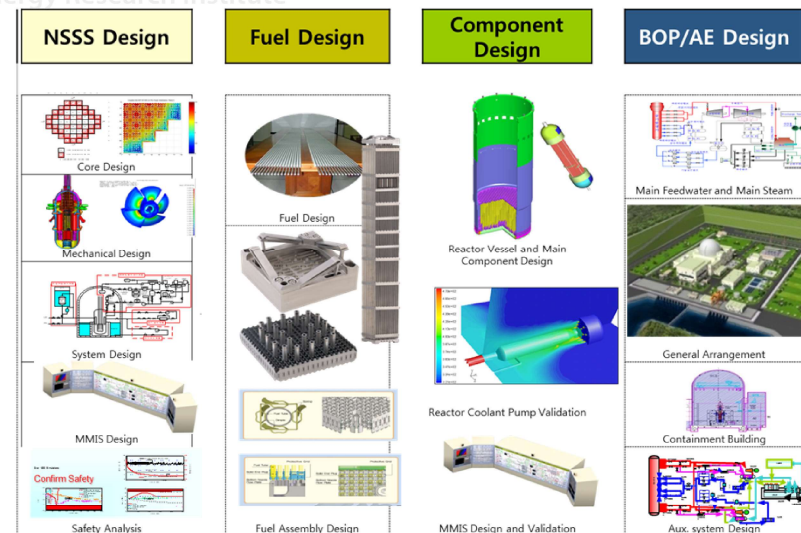
» 사우디 교육훈련 프로그램

◆ CRT-Basic, CRT-Technical, OJT, OJP

◆ K.A.CARE 엔지니어 48 명 참여

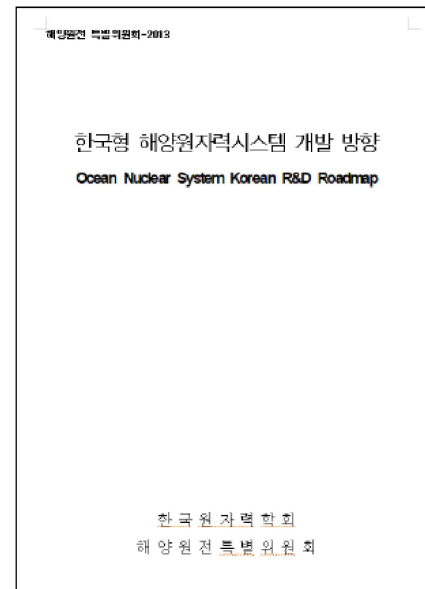


한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



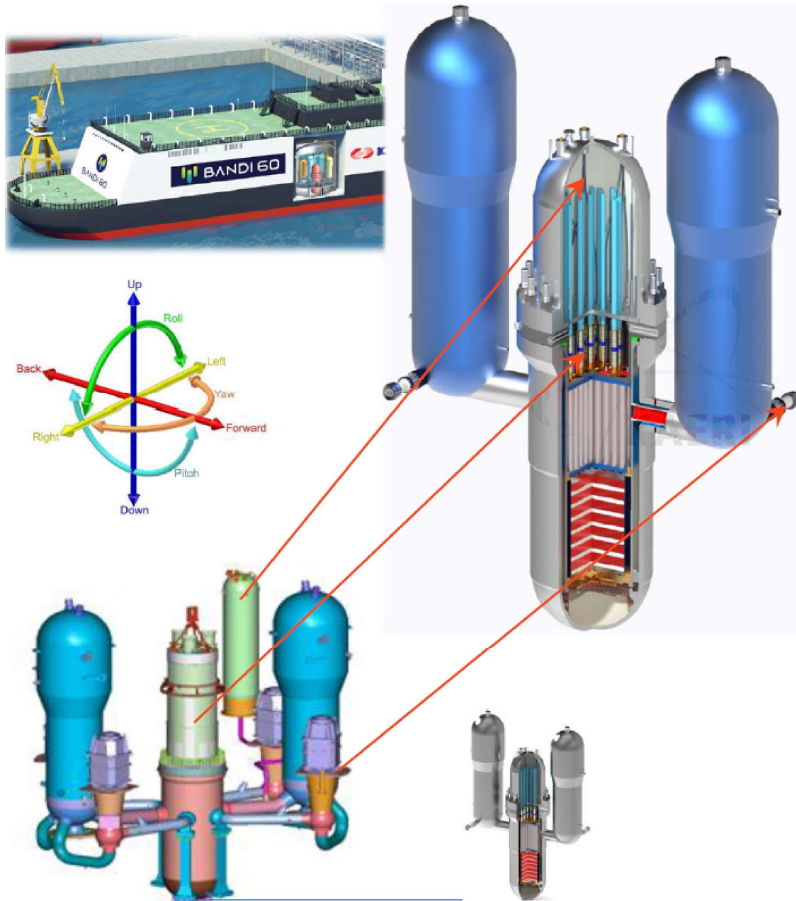
해양 SMR – 해양원전특별위원회 (2013)

- 시장 요구에 따라 착저식, 부유식, 동력선 등 다양한 가능성 확인
- 예상되는 주요 장애 요인
 - ✓ 양 산업간 사업 모델, 방식 등 차이점
 - ✓ 양 산업간 설계 규범, 표준, 인허가 체계 차이점
 - ✓ 사용후연료처리, 해상사고처리, 국제해양법 준수



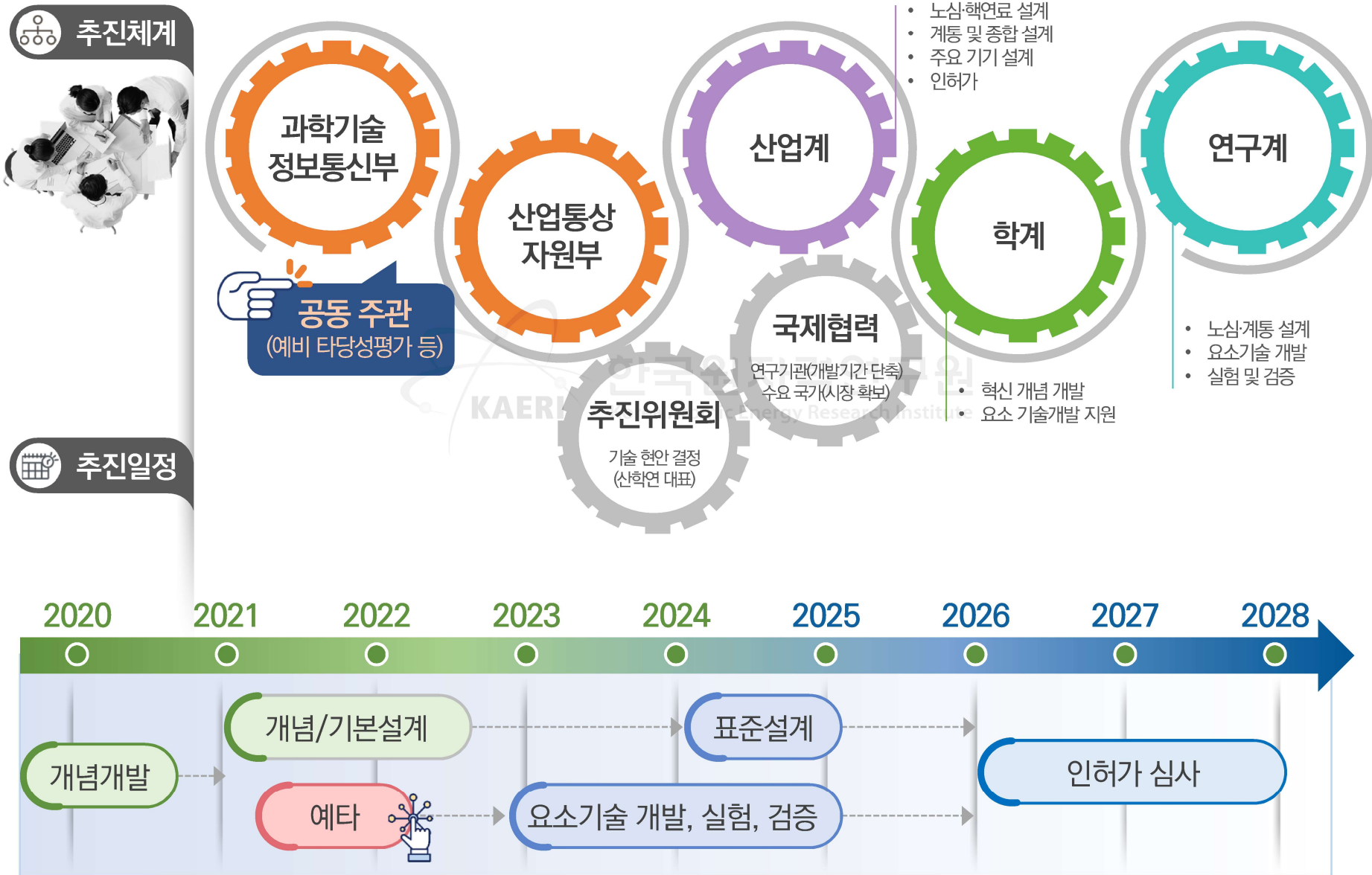
<한국형 해양원자력시스템 개발 방향, 한국원자력학회 해양원전특별위원회, 2013>

BANDI-60 (한전기술)



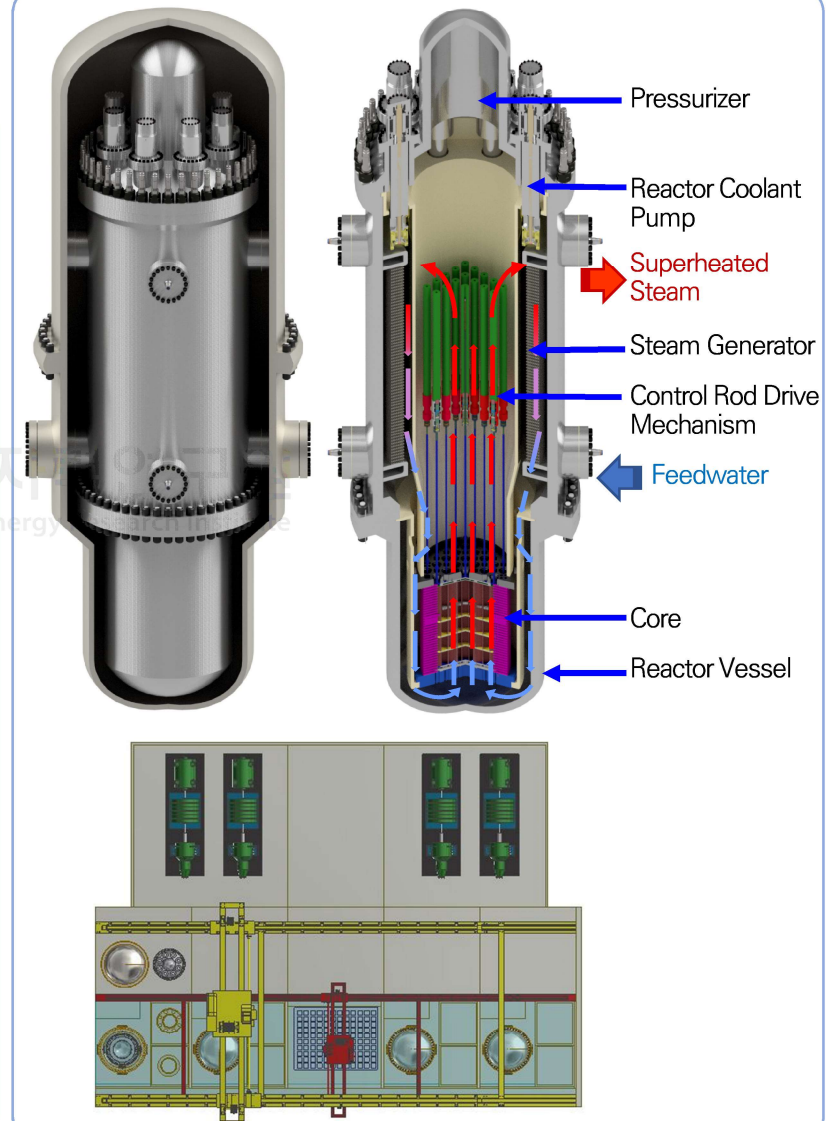
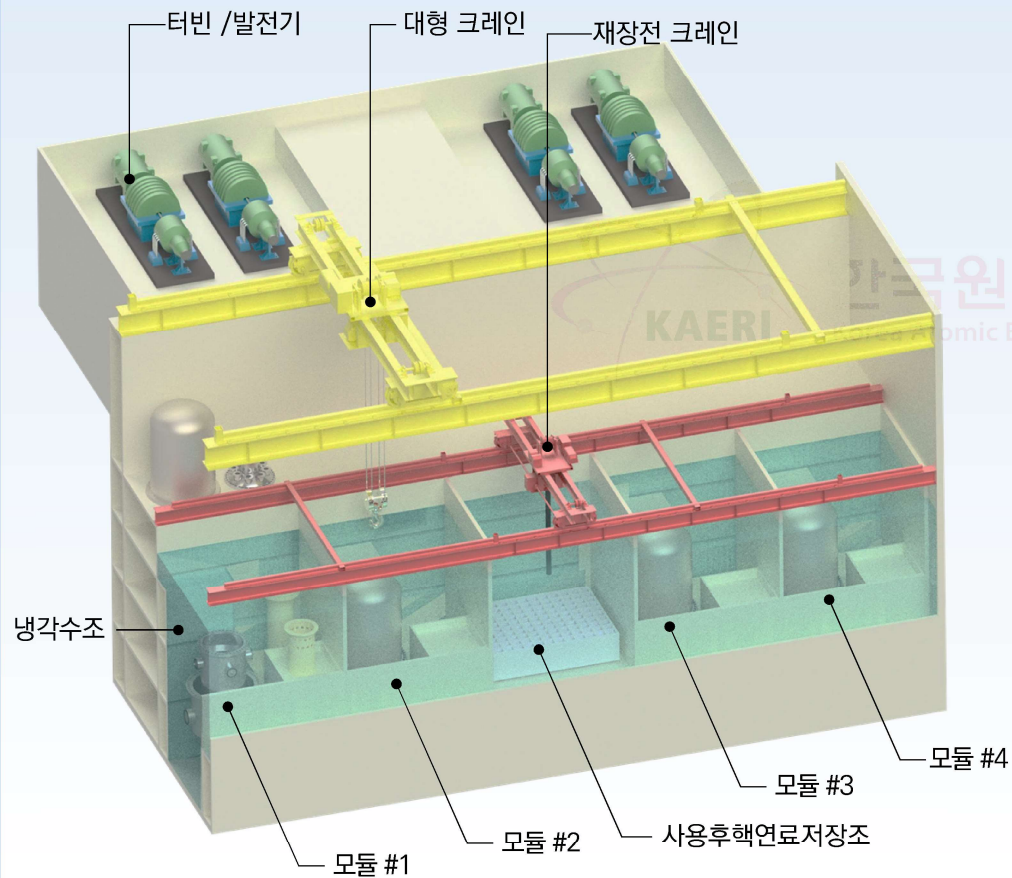
원자로	블록형 PWR ✓ 노즐-노즐 직접 연결
출력 (열/전기)	200 MWt (60 MWe)
일차냉각재 순환	강제 순환
핵연료 및 노심	17x17 봉형 UO ₂ ≤5% U-235 유효핵연료 길이 2m 재장전 주기 4~5년
반응도 제어	무봉산 / 가연성독물질(BP) 제어봉 ✓ 내장형 CEDM
중기발생기	재순환 U-tube형 / 판형 (Option) ✓ 포화증기
가압기	원자로 일체형 / 전열기, 스프레이
냉각재펌프	캔드 모터
비상안전주입	피동
잔열 제거	피동 (안전) / 능동 보조 (비안전)
설계 수명	60 yr

혁신형 SMR(i-SMR) 개발 계획



혁신형 SMR(i-SMR) 개념

Small Modular Reactor



Small Modular Reactor

01

| 원자력 기술의 특징

02

| SMR이란?

03

| 국내 SMR 개발(경수로)

KAERI

Korea Atomic Energy Research Institute

04

| SMR 혁신기술 개발

05

| 결 론

KAERI

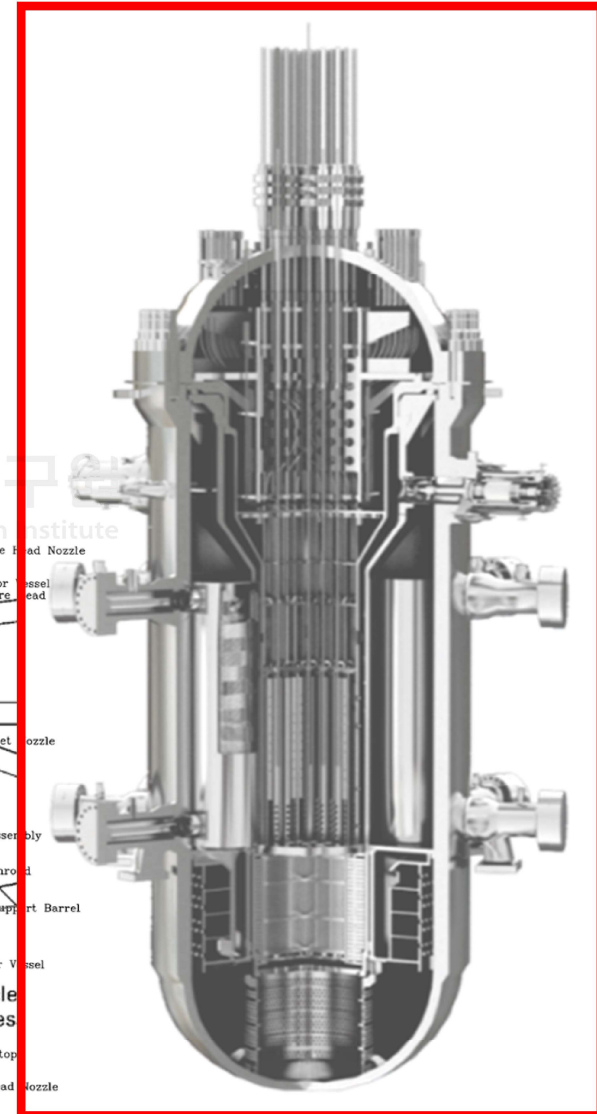
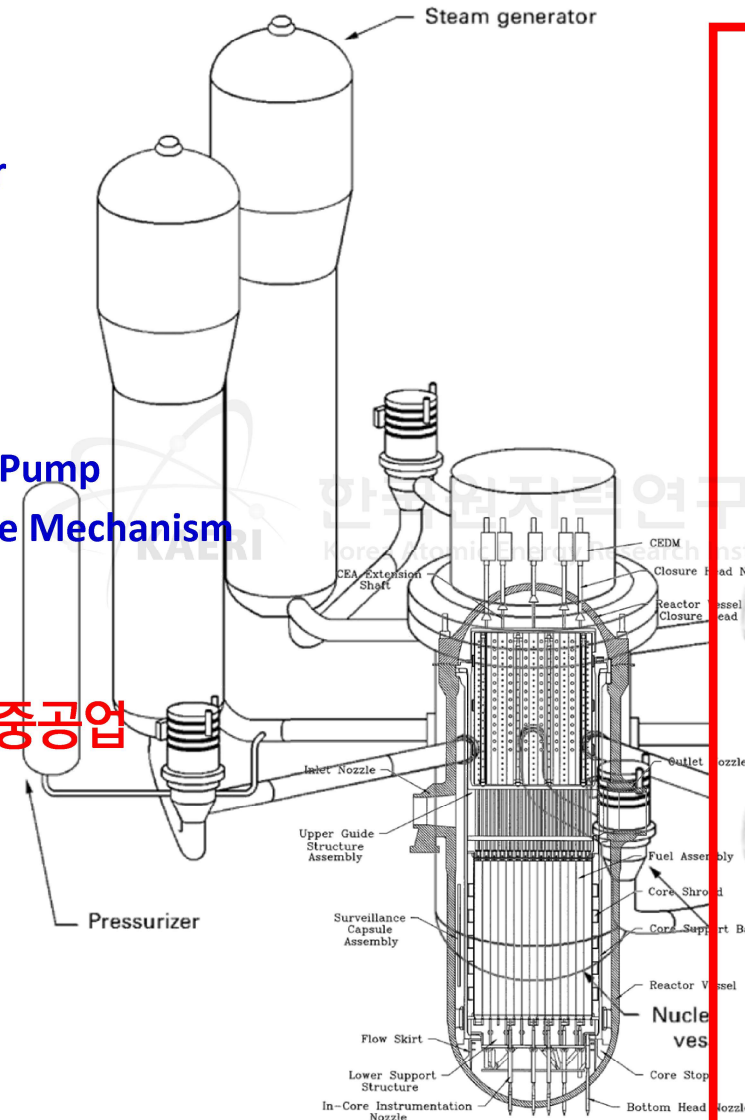
SMART 일체형원자로 - 두산중공업

● Conventional PWR

- Reactor Vessel
- Steam Generator
- Hot Leg
- Cold Leg
- Pressurizer
- Surge Line
- Reactor Coolant Pump
- Control Rod Drive Mechanism

❖ SMART RVA : 두산중공업

- 원자로집합체
- 원자로헤더
- 제어봉구동장치
- 증기발생기



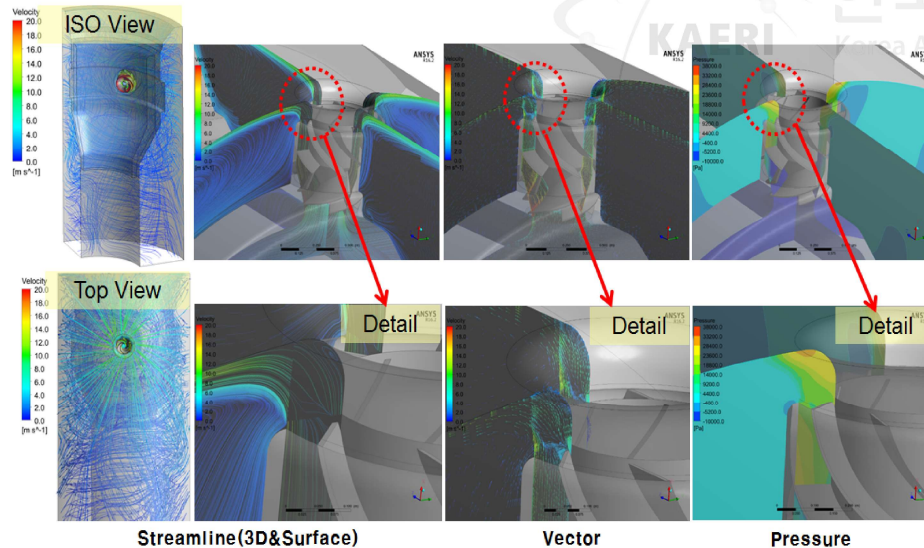
SMART 핵심기술 개발 – 효성굿스프링스

» SMART 원자로냉각재펌프

- ◆ 수력부 모델 설계 및 수력부 모델펌프 성능시험
- ◆ 완전특성 및 관성서행 시험
- ◆ 원자로냉각재펌프 원형펌프 개발 및 성능시험



펌프 회전자



펌프 유동해석

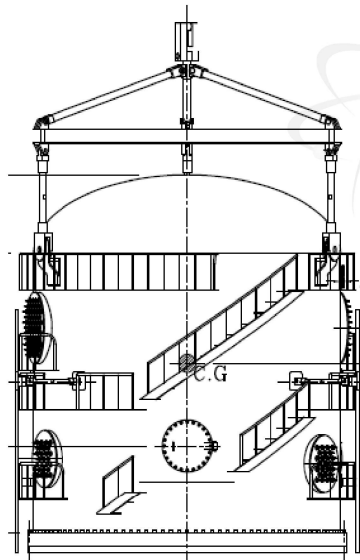


모델펌프 제작

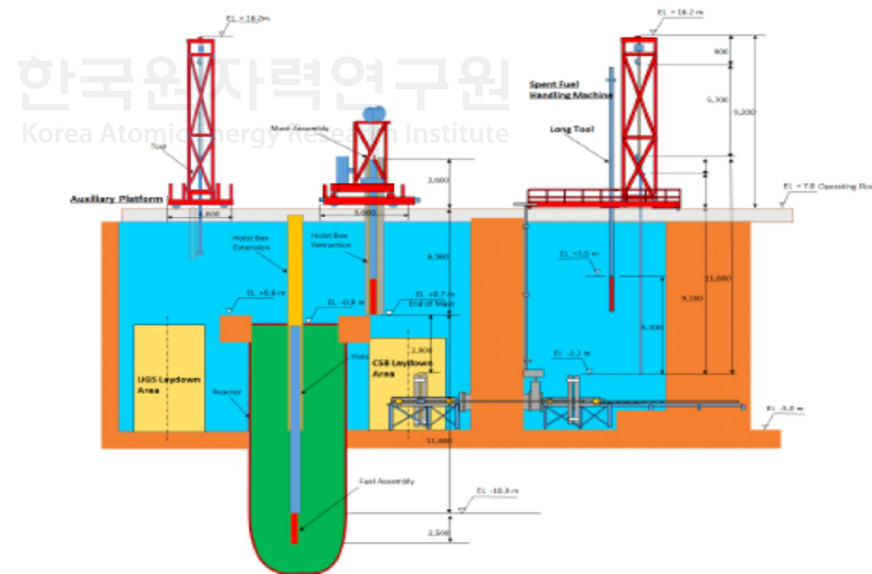
SMART 핵심기술 개발 – BHI

» SMART 주요 기기 개발

- ◆ SMART 압력및방사능저감계통 핵심기기
- ◆ SMART 핵연료취급계통



CPRSS LID

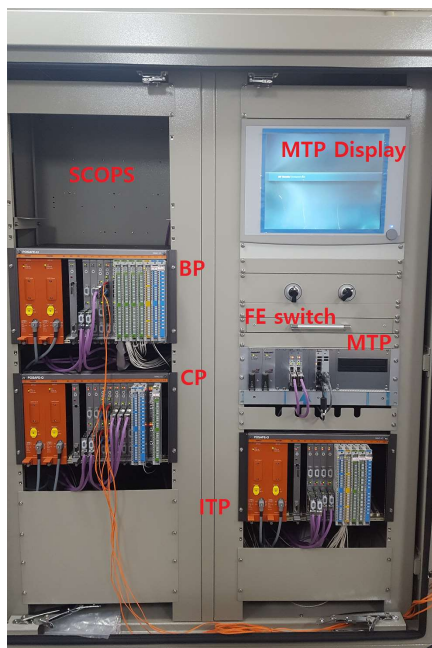


핵연료취급계통(FHS)

SMART 핵심기술 개발 – 수산 ENS

» SMART 플랜트 보호계통 설계/검증-수산 ENS

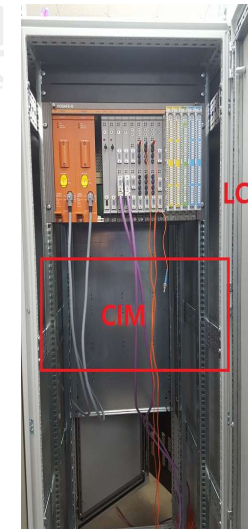
- ◆ 원자로보호계통(RPS) 검증설비 통합 및 시험
- ◆ 공학적안전계통(ESF-CCS) 검증설비 통합 및 시험



RPS 검증설비



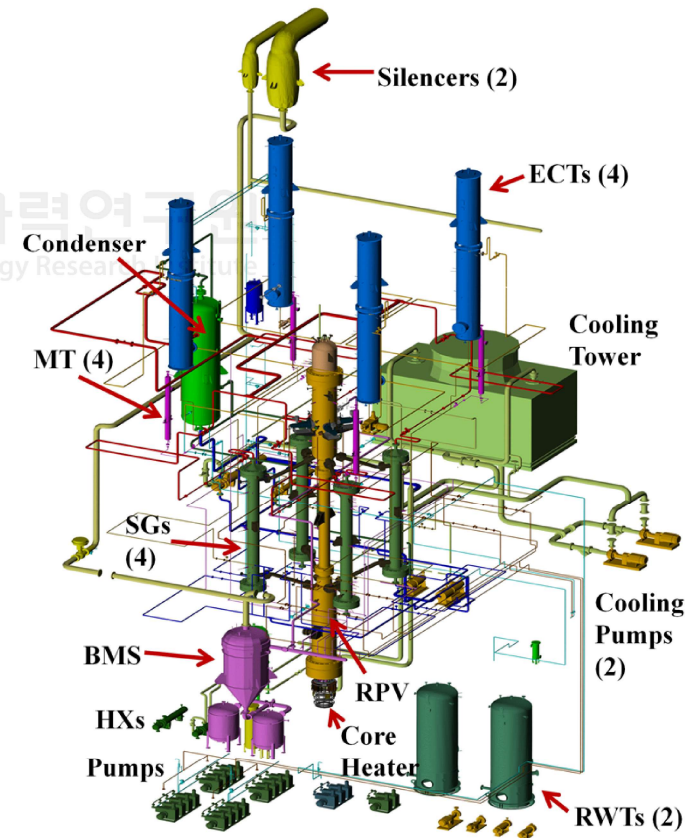
ESF-CCS 검증설비



SMART 종합검증설비 - 일진파워

» 세계 최대 규모 SMR 종합 열수력 검증장치 (높이 비율 1:1)

- ◆ 실제 운전조건(온도 323°C, 압력 150 bar) 달성
- ◆ 원자로 정상/비정상/사고 시나리오를 실제로 시뮬레이션



소형모듈원자로 혁신기술 개발

» 목표:

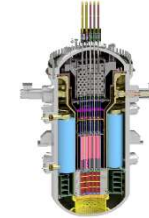
- ◆ 경제성 향상
- ◆ 안전성 향상



Safety

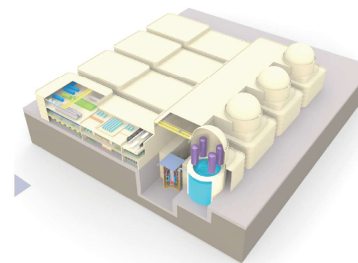
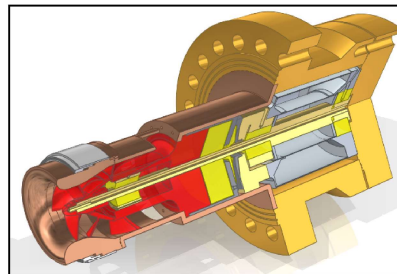
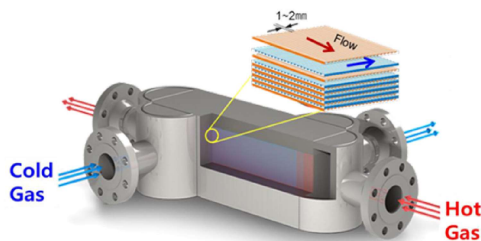


Economics



» 경제성 향상 기술

- ◆ 인쇄기판형 증기발생기 - 에너지
- ◆ 원자로냉각재펌프 - 효성굿스프링스
- ◆ 다수호기 블록화 - 한전기술
- ◆ 지능형 자율운전 - 지토



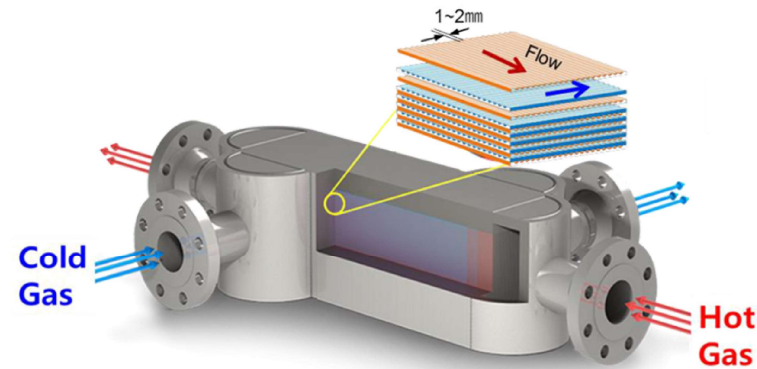
혁신형 SMART 플랜트 블록화 개념도,
200MWe × 4기



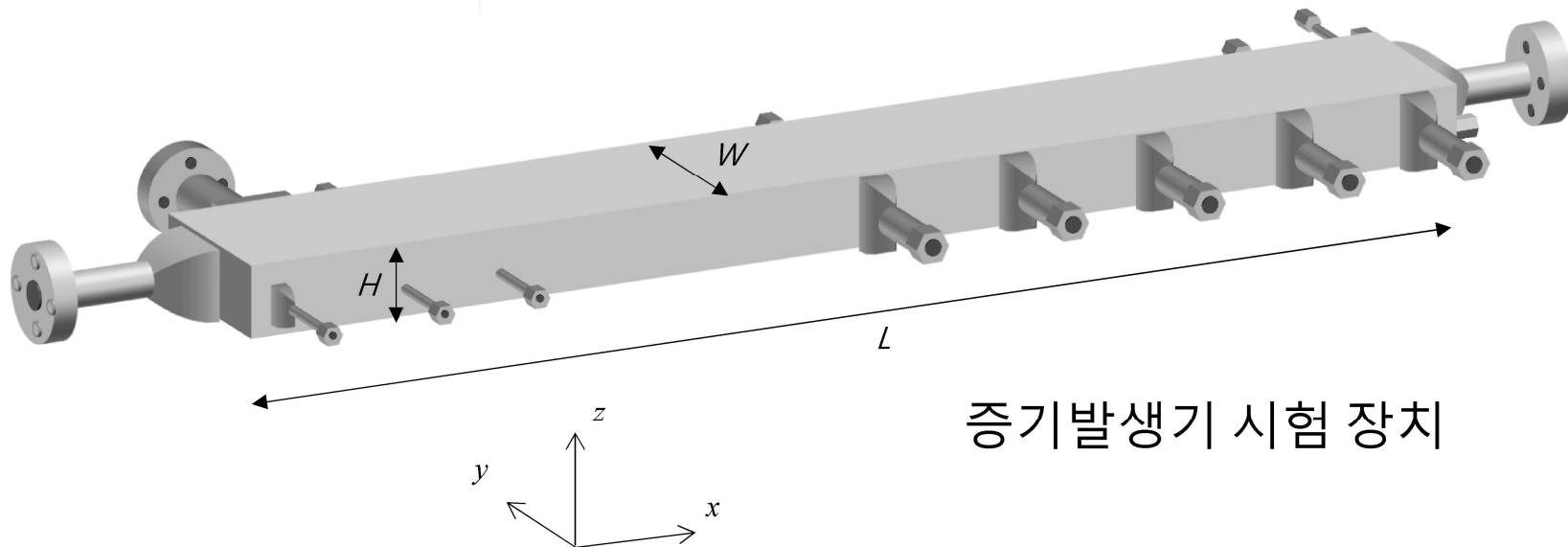
인쇄기판형 증기발생기

» 소형 혁신 증기발생기

- ◆ 개념개발: 원자력(연)
- ◆ 시제품 제작: 에너지



한국원자력연구원 작동 개념
Korea Atomic Energy Research Institute



증기발생기 시험 장치

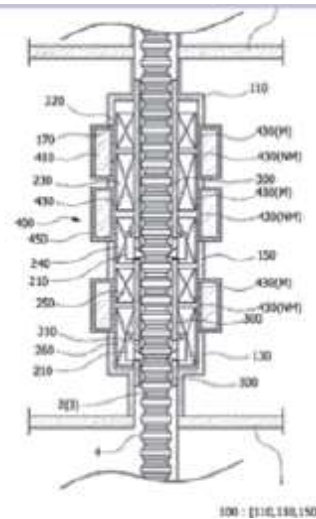
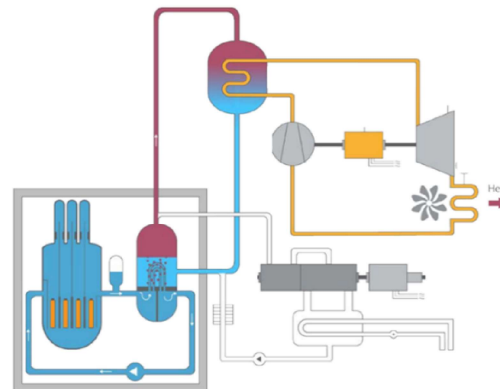
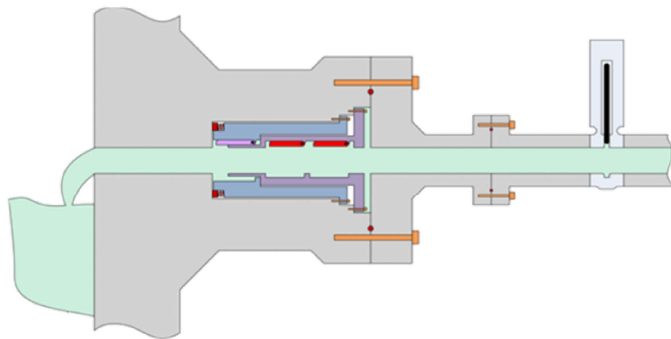
소형모듈원자로 혁신기술 개발

» 안전성 향상 기술

- ◆ 원자로장착형격리밸브 - 삼신밸브
- ◆ 혁신안전등급전력생산기술 - 두산중공업
- ◆ 내장형 제어봉구동장치 - 우진
- ◆ 피동안전계통 최적화



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



혁신형 SMR 혁신기술

» 원자력(연)은 혁신형 SMR 성공을 위한 핵심기술 개발 주도

- ◆ (안전성) 무한냉각 완전피동안전개념, 내장형 제어봉구동장치, 무봉산 노심에 적합한 혁신핵연료 개발
- ◆ (경제성) 계통 단순화 및 모듈화, 최소 유지보수비용을 위한 자율운전 및 디지털 트윈 기술, 통합형 제어실, 건설공기단축을 위한 혁신제조기술
- ◆ (유연성) 부하추종능력 향상을 위한 무봉산 운전, 재생에너지 연계 기술



Small Modular Reactor

01

| 원자력 기술의 특징

02

| SMR이란?

03

| 국내 SMR 개발(경수로)

KAERI

Korea Atomic Energy Research Institute

04

| SMR 혁신기술 개발

05

| 결 론

KAERI

결론



- » 원자력 에너지는 기술에 기반하고 있으며, 기후위기 해결을 위한 대안
 - » SMR은 뛰어난 안전성과 유연성을 가지고 있으며 세계 각국은 SMR 시장을 선점하기 위해 노력 중
 - » SMART 및 BANDI 개발 경험을 바탕으로 혁신형 SMR 개발 추진
- ➡ 새롭게 떠오르고 있는 글로벌 SMR 시장의 주도권 확보 가능

원자력(연)과 기기 전문업체와의 지속적이고 긴밀한 협력을 통해
SMR 혁신기술 완성



우리 손으로 만든
소형모듈원자로(SMR)가
세계 시장을 주도하도록
최선을 다하겠습니다.