

# 소형원자로 개발 현황



2017. 2. 9

김 금 구

SMART 개발사업단  
한국원자력연구원



## 목차



- I** 소형원자로(SMR)
- II** SMART 개발
- III** SMART 안전성
- IV** 한국-사우디 SMART 파트너십
- V** 시장 전망 및 요약



## I 소형원자로

**Small and Medium size Reactor**

**Small Modular Reactor**



3

## SMR 이란 ?

### ☐ SMR : Small and Medium Sized Reactors

- IAEA definition since early 1990s based on Capacity

- < 300 MWe as small
- 300 - 700 MWe as medium
- >700 MWe is large

### ☐ SMR : Small Modular Reactors

- Small Modular Reactors (SMRs) are nuclear power plants that smaller in size (300 MWe or less)
  - Stand Alone or Modular

4

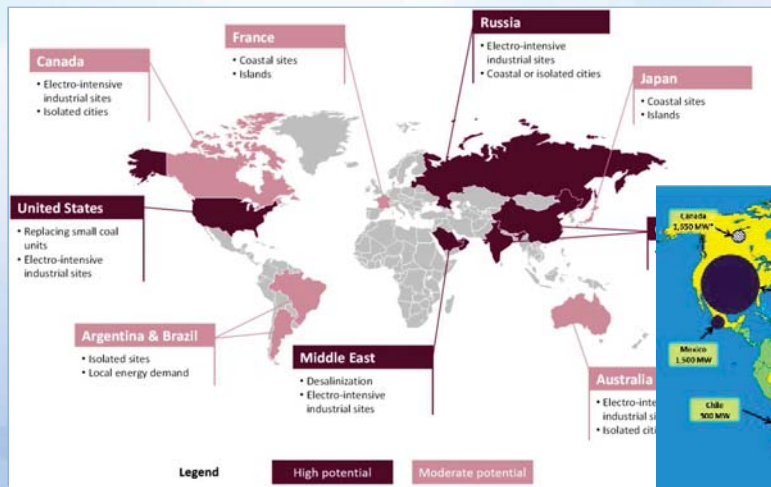
- 소규모 초기투자 : 개도국의 건설자원 조달에 유리
- 보다 높은 안전성 구현 용이
- 사업기간 단축
- 기존 전력 인프라(송배전망) 활용
- 수요증가에 탄력적 대응
- 다목적 활용의 가능성 : 해수담수화, 지역난방
- 매우 큰 잠재 시장
  - 분산 전력수요국 (칠레, 카자흐스탄), 소규모 전력망을 갖춘 국가

- 전세계 운영중인 발전소 : 127,000 기
  - 대형(700MWe 이상) : 0.5 %, 중형 : 3%, 소형(300MWe이하) : **96.5%**
  - 화력발전소의 25% : 30년 이상 노후 발전소 (18,400 기)

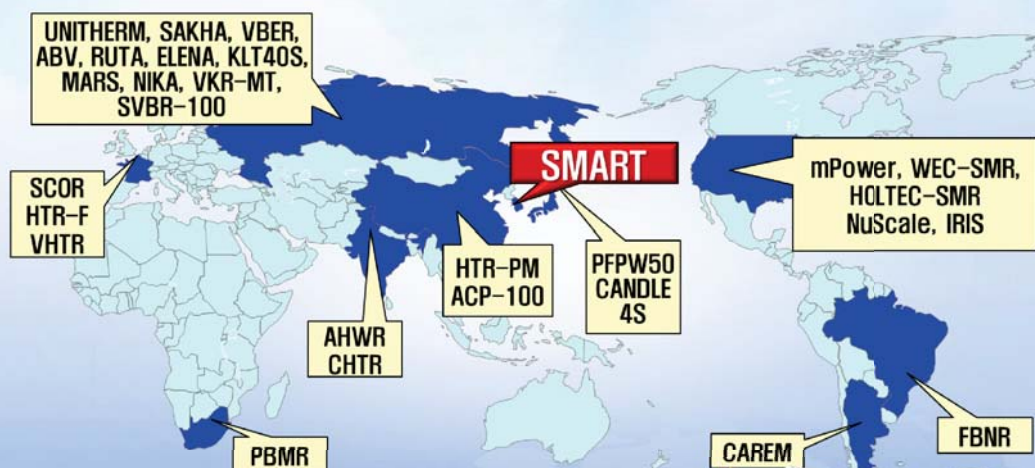
- 신규원전 도입국
  - WNA: 45 개국 신규원전 도입 검토중
  - IAEA: 65 회원국이 원전도입 계획 추진 중
- 소형 노후 화력 대체
  - 환경오염을 방지하면서 노후화력 대체 가능
    - 미국: 약 27GWe 시장 수요 예상
- 원격지
  - 러시아, 캐나다 등 원격지 개발에 필요한 에너지원
- 시장 수요 예측

- US Navigant Report(2013, 6) : 2030년까지 18.2GWe(SMART: 182기)
- 지경부 SMR 기획보고서(2012, 8): 약 56.4GWe(SMART: 564기)
- US DOE(2007, 7) : 2050년까지 500 ~ 1,000기
- Japan CRIEPI (2006,7) : 2050년까지 450~850기





- US Navigant Report(2013, 6) : 2030년까지 18.2GWe(SMART: 182기)
- 지경부 SMR 기획보고서(2012, 8): 약 56.4GWe(SMART: 564기)
- US DOE(2007, 7) : 2050년까지 500 ~ 1,000기
- Japan CRIEPI (2006,7) : 2050년까지 450~850기



## 세계 각국이 개발중인 중소형원자로

- 지난 10여년 경수로, 가스로, 소듐냉각고속로 등 여러 노형으로 개발 중
- 개발 완성의 기대 연도 및 개발의 정도가 상이
- 확정된 건설계획에 따라 개발이 진행중인 원자로는 소수



## Small Modular Reactors

### Position Statement

Small Modular Reactors (SMRs)<sup>1</sup> are considered to be nuclear reactors with power levels less than or equal to 300 MWe. Some of these reactors are designed to stand alone and some can be deployed as “modules”, allowing add-on capacity after the initial module goes into operation. Like larger reactors, they use safe, proliferation-resistant technologies.

## US DOE

Reactor units with a nominal output of 300 MWe or less and ability to have large components or modules **fabricated remotely and transported to the site for assembly of components and operation.**

9

## 모듈화

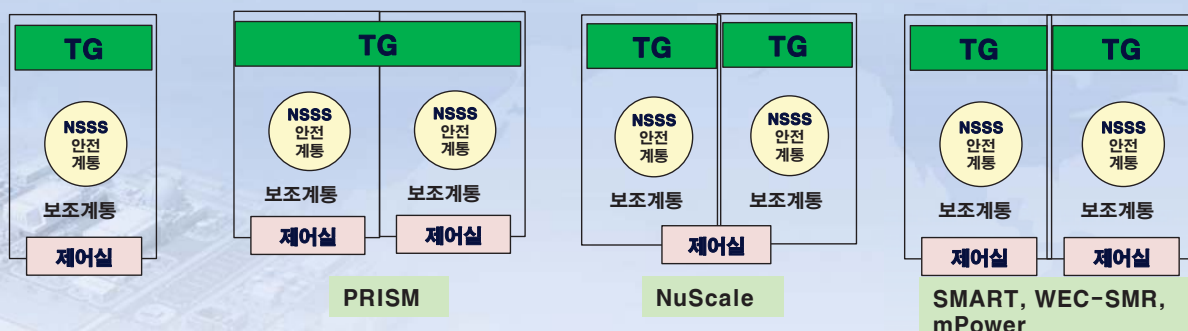
### □ 모듈화[한경 경제용어사전]

- 자동차나 선박 조립 공정에서 개별 단품들을 차체에 직접 장착하지 않고 몇 개의 관련 부품들을 하나의 덩어리로 생산하여 장착하는 기술 방식

### □ SMR의 모듈화

- 모듈화 대상 요소: Component, 건물, 원전 Plant

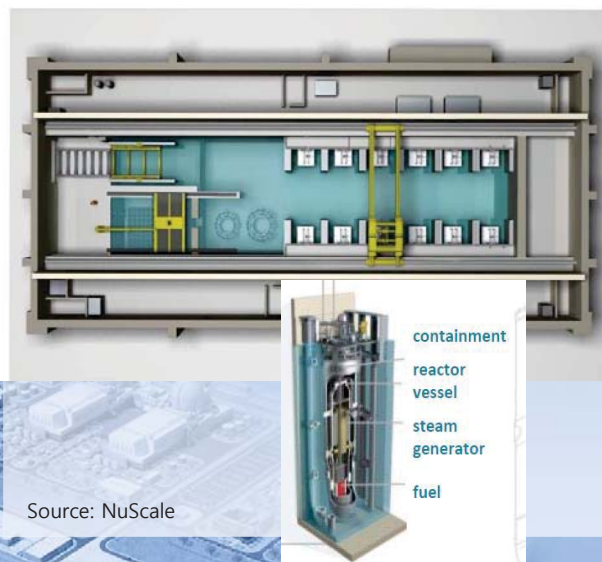
### □ SMR 원전 모듈화 개념 ?



10

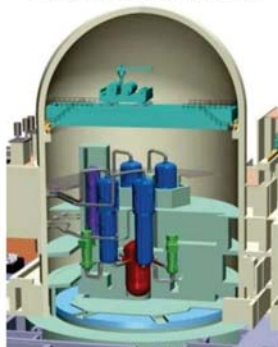


- **Module : Allowing add on capacity after the Initial module go into operation**



11

Typical Pressurized-Water Reactor Containment & Reactor System



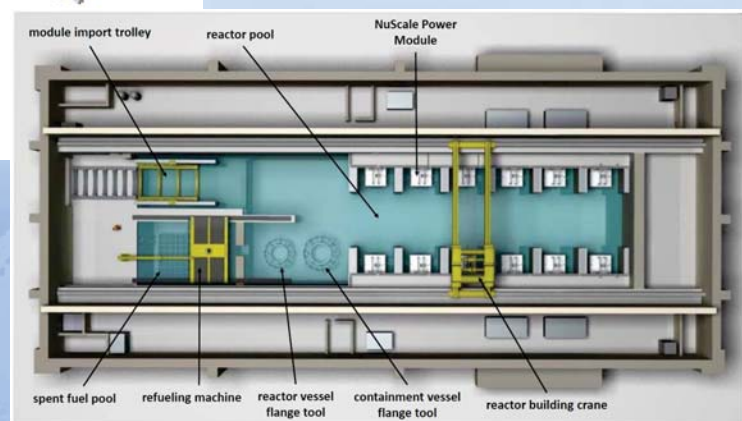
Source: NuScale

NuScale Power Module Combined Containment Vessel and Integral Reactor System



- **안전기능 및 유지보수 공간**

Source: NuScale



12

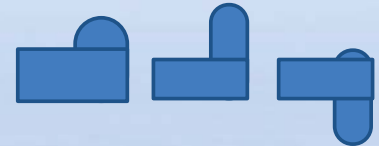
## ❑ Shipped Reactor Vessel by Rail Road?

- 국내 철도 운송의 중량 제한 : 180ton
  - 철로 및 철교의 최대 하중 설계값에 따른 제한
- NuScale 원자로 집합체 및 격납용기 : ~ 700 ton
  - 철도운송이 불가하며 특수차량으로 교량을 우회하여 운송 필요



## ❑ Underground Reactor Building?

- 원자로 상부를 Ground Level 아래로 설치
  - 테러공격 [항공기 충돌] 방호에 유리
  - 건설비 증가 요인



## ❑ 원자로집합체 공장 제작 및 현장 설치

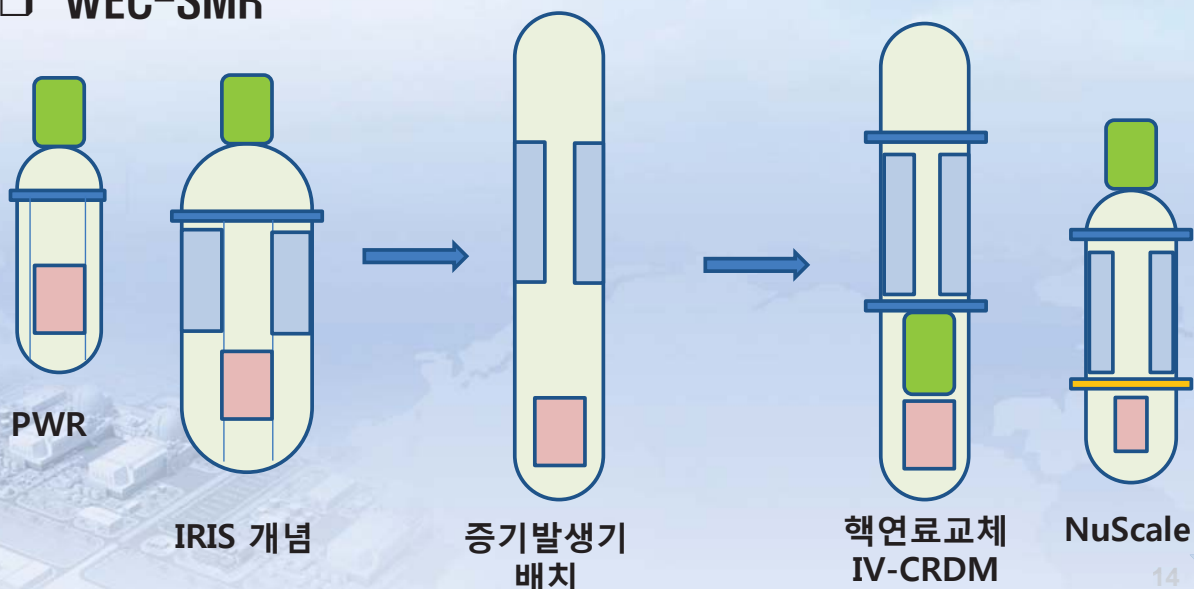
- 공장 제작으로 표준화
  - 모든 SMR이 추구하는 소형 원자로 기본 조건

# 원자로 집합체 개념

## ❑ 미국 SMR

- 자국내 압력용기 제작시설의 용량을 감안하여 슬림한 개념 채택

## ❑ WEC-SMR



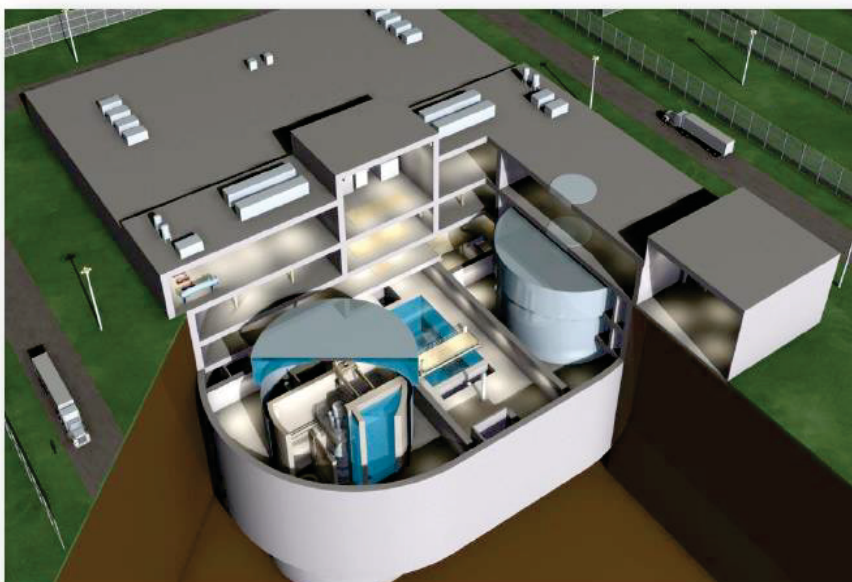
구분	SMART	mPower	WEC-SMR
			
H(m)	18.5	25.3	24.7
D(m)	5.95	3.96	3.5

## mPOWER Nuclear Island

generation  
**mPower**

180 Mwe x 2units

## Nuclear Island



### Key attributes:

- Oval RSB below grade
- Independent safety systems
  - UHS
  - ECCS
  - RCIPS
  - RWST
- Shared non-safety systems where possible
  - Spent fuel pool
  - Main control room
  - Aux boiler
  - Radwaste



## SMR Plant Layout

225 MWe

### Annex Building:

- Security
- Offices
- Restrooms
- RCA entry

### Turbine Building:

- Turbine system
- Auxiliary systems
- Drain systems

### Radwaste Building:

- Hot machine shop
- Low level radwaste storage
- Truck bay

### Nuclear Island:

- Containment and reactor
- Safety related systems
- Defense-in-depth systems
- Radwaste systems
- Control room
- HVAC



14

7

## Challenges to Deploy SMR

### □ Technical Barriers

#### • Proven Technology

- Advanced Materials
- Containments and Aircraft Impact Resistance
- Implementation of Multiple Module Plant

➡ Technical Barriers should be overcome through Technology Validation Test and Experiments

- 미국 NRC : DSRP[Design Specific Review Program] 추진 중

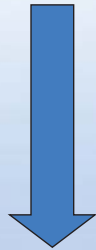
### □ Commercial Hurdles

- Economic justification compare with other energy sources
- Lack of Commercial Experience
  - Business Model

18

## ❑ Academic Reactor

- Fancy and Simple → Hope to Work



- Meet Licensing Requirement and Industry Standards
- Consider Maintenance & Operation
- Assure Manufacturability and Supply
- V&V by Experiments

## ❑ Real Reactor

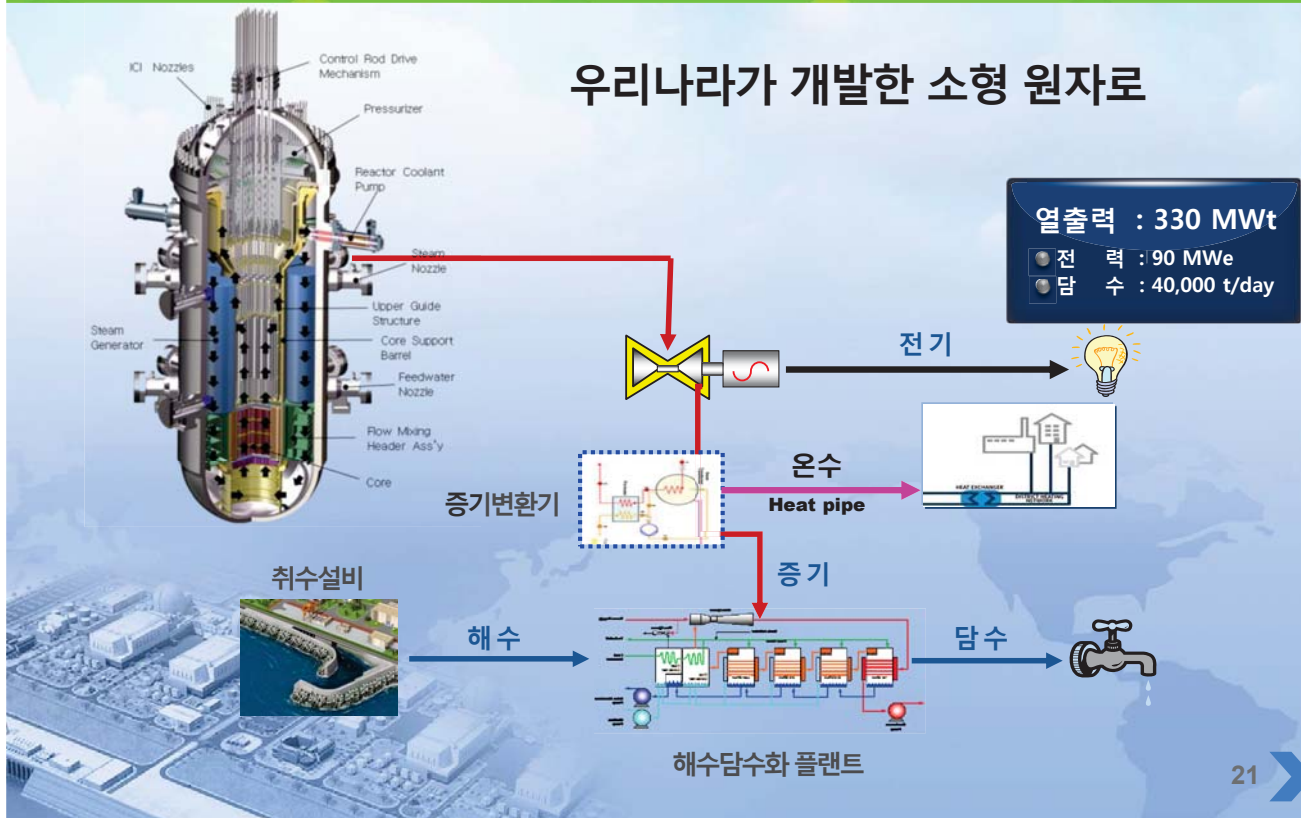
- Technology Proven and Licensed → Ready to Construct

## II SMART 개발

**System integrated Modular Advanced Reactor**



## 우리나라가 개발한 소형 원자로



## SMART 개발 배경

- 목표: 수출을 통한 신성장동력 창출
- 주요 잠재 수출 대상 국가
  - 대형 원전보다 소형원전 건설이 유리한 국가
    - 대형 원전을 건설하기에는 경제력이 약한 국가
    - 전력망의 규모가 작아 대형 발전소를 지을 수 없는 국가
    - 넓은 국토에 인구가 분산되어 송전망 구축에 과도한 비용이 소요되는 국가
  - 비싸고 오래된 화력 발전소를 대체해야 하는 국가
    - 전 세계 127,000기의 발전소 중 96.5%가 300MWe이하 소형발전소
  - 물 부족 국가로 해수담수화가 필요한 국가
    - 대부분의 중동국가
  - 지역난방이 필요한 국가
    - 캐나다, 북 유럽 국가



# SMART 개발 경과



## SMART는 18년 연구개발의 결정체

- 1997년부터 연인원 1,700여 명 투입
- 3,447억 원 연구개발 예산 투입
- 50여 종 이상의 실증시험 수행

## 2012년 7월 4일 표준설계인가 획득

2012년 ~ 현재 : 후쿠시마 Action Plan  
대비 안전성향상 연구 및 국제협력 추진

## SMART는 혁신기술의 검증과 입증기술을 조화하여 인허가성을 확보

- SMART는 인허가 시현성, 제작 구현성, 유지보수 용이성 향상을 고려하여 입증된 기술을 최대한 활용

23

# SMART 기술 개발

## 혁신 설계 개념과 검증된 기술의 융합을 통해 안전성 및 인허가성 확보

### 혁신적인 개념

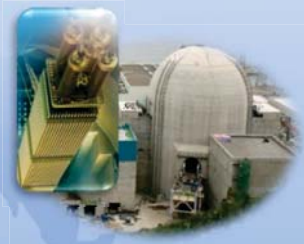
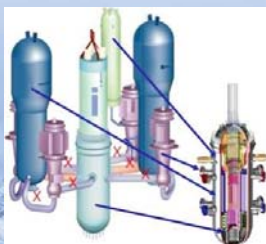
- 모든 주요기기를 원자로용기 내부에 설치
- 현장 설치 및 유지/보수 최소화를 위한 모듈화 공법
- 피동안전계통을 통한 안전성 향상
- 디지털 제어계통

### 검증된 기술

- 상용화된 17x17 저농축 UO<sub>2</sub> 핵연료 기술
- 대형 콘크리트 격납건물
- 상용화된 제어봉구동장치
- 가연성독봉 및 수용성봉소를 활용한 반응도 제어

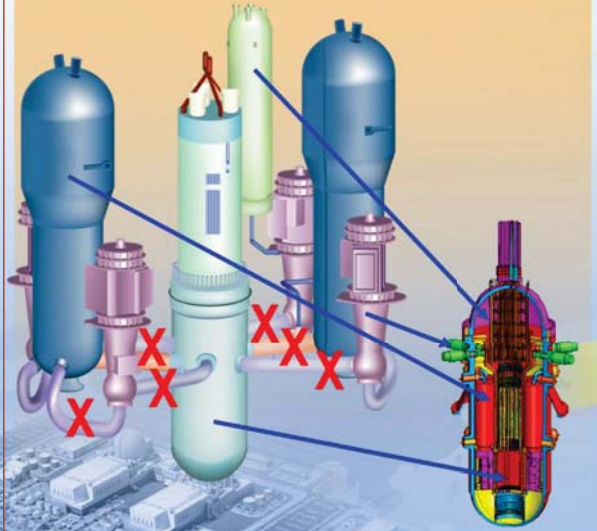
## 철저한 기술검증

Systems, Component, and Design Tools  
have been fully Developed and Licensed

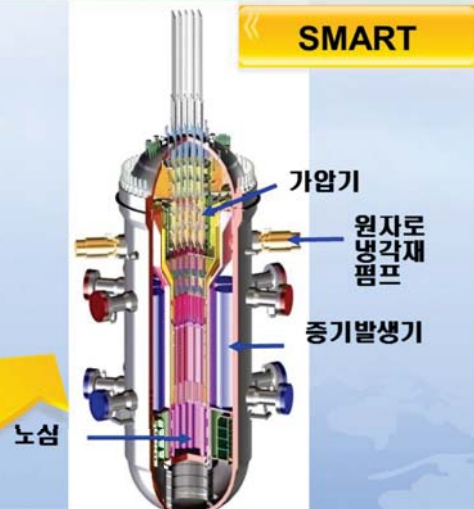


24

## Loop Type PWR



## SMART



- 안전성 향상 : 대형 냉각재상실사고의 배제
- 다용도 원자로 : 해수담수화 및 지역난방
- 입증된 경수로 기술의 사용

25

# SMART 원자로 집합체

- 출력 : 330MWt
- 일체형원자로
  - 내장형 증기발생기 : 8개
  - 캔드모터 원자로냉각재펌프 : 4대
  - 내장형 가압기
  - 원자로 관통부 최소화
- 노심 및 핵연료
  - 가압경수로용 17x17 UO<sub>2</sub> 핵연료집합체
  - 2m 유효노심 높이
  - 57 핵연료집합체
- 설계압력 및 온도 : 17MPa, 360℃

제어봉구동장치 (Control Rod Drive Mechanism)

노내계측기 노즐 (ICI Nozzles)

원자로냉각재펌프 (Reactor Coolant Pump)

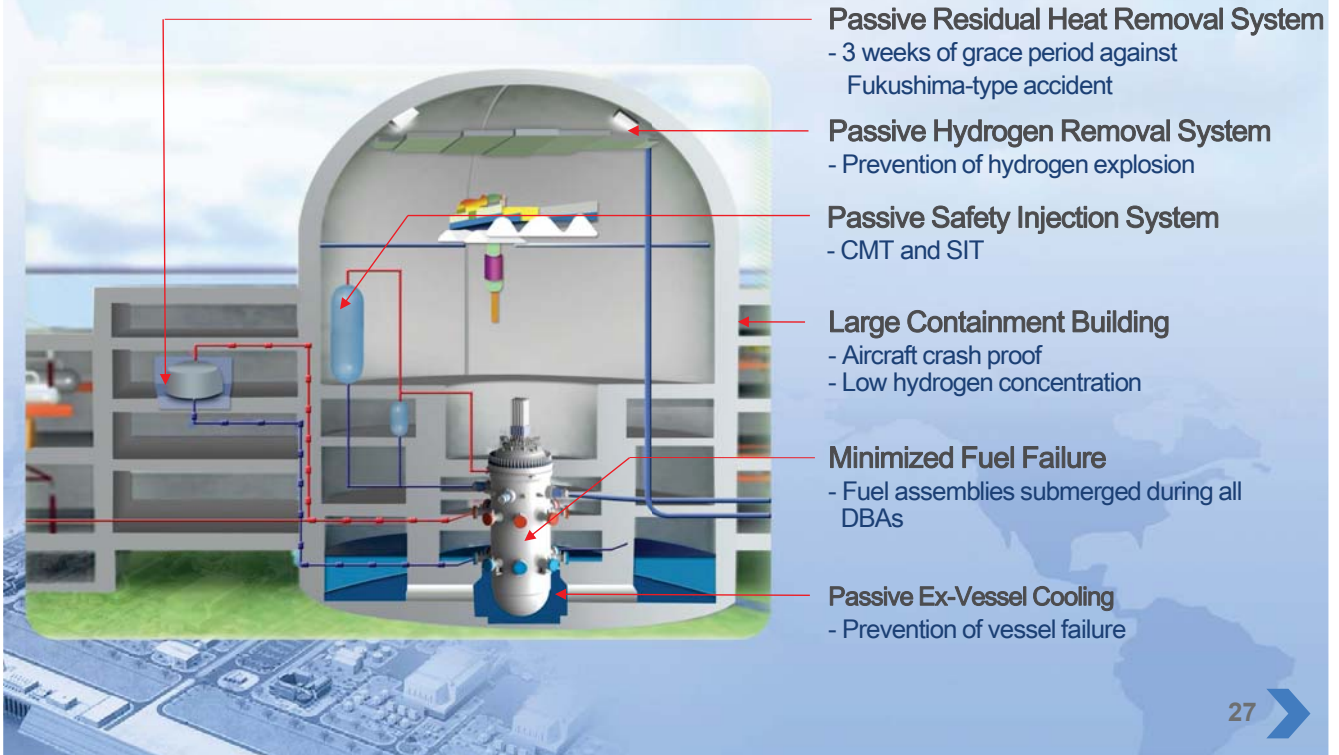
증기 노즐 (Steam Nozzle)

복수 노즐 (Feed Water Nozzle)

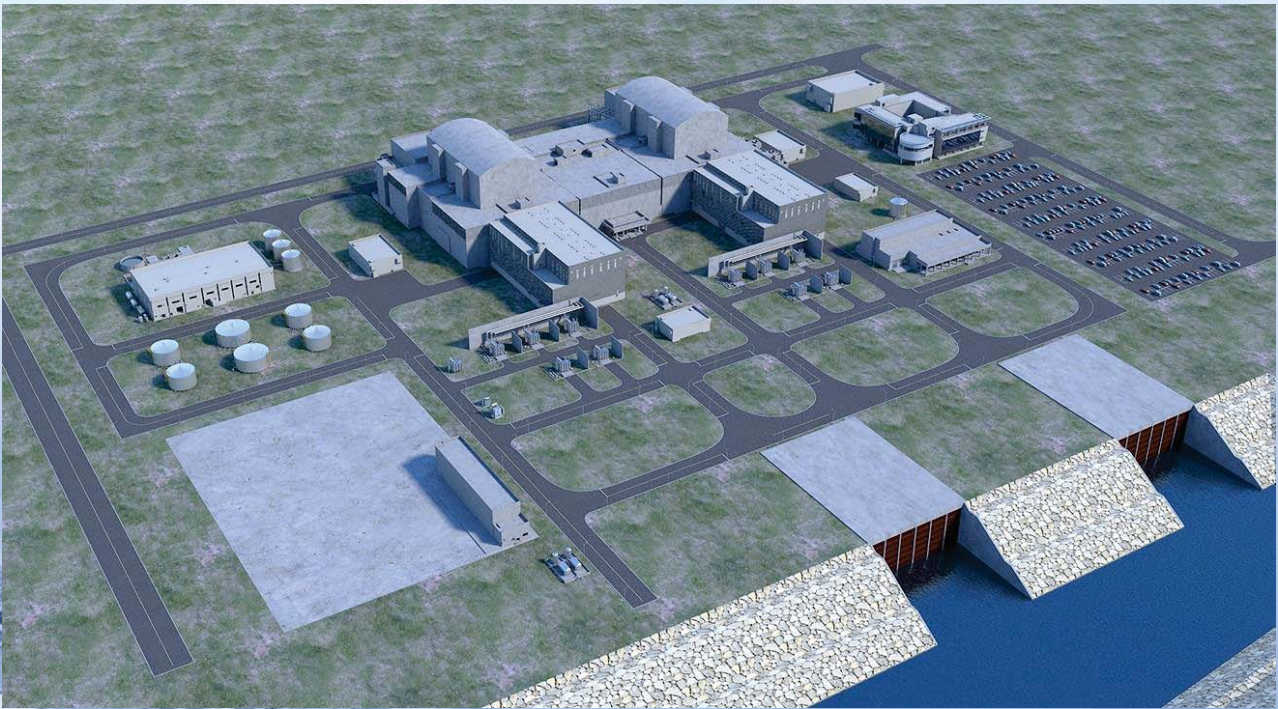


26









### III

## SMART 안전성



제 2 호

## 원자로시설표준설계인가증

법 인 명 : 한국원자력연구원/한국전력공사

소 제 지 : 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111/  
서울특별시 강남구 영동대로 512번지

대 표 자 : 정 현 호/김 중 김

생년월일 : 1951년 10월 28일/1950년 2월 3일

원자로의 명칭 : 스마트 (SMART)

종류 : 일체형가압경수로

용량 : 330 MWt

위와 같이 원자력안전법 제12조·동법시행령 제22조  
제1항 및 동법 시행규칙 제11조의 규정에 의하여 원자로  
및 관계시설의 표준설계를 인가합니다.

2012 년 7 월 4 일

원자력안전위원회

3,447억원 투자

1,700MY 투입

~50 여종의 기술검증 시험 수행

1.5년 동안 인허가 심사

2,000 여 개 이상의 질의 답변

현 한국의 인허가 규정 만족

31

## SMART 안전성

### 표준설계인가와 후쿠시마 후속대책으로 더욱 안전한 SMART

#### 표준설계 인가 획득

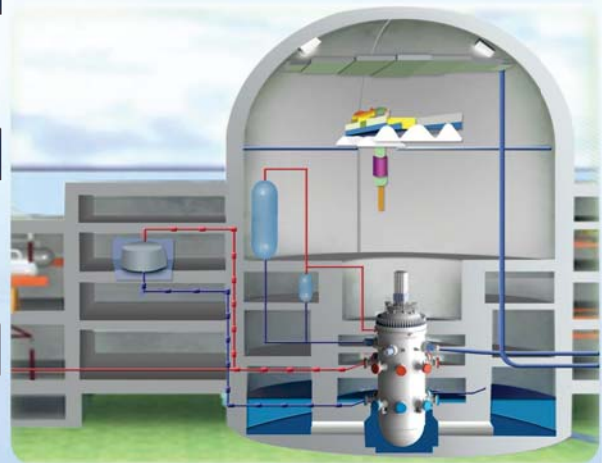
- 현행의 인허가요건 모두 충족
- 20여종의 시험을 통해 기술을 입증, 안전성 확인

#### 일체형 가압경수로와 완전피동안전계통

- 일체형으로서 LBLOCA를 원천 배제한 설계
- 자연의 힘을 이용하여 운전원 조치없이 안전을 보장하는  
피동형 안전계통 채택

#### 중대사고에 대한 안전성 확보

- 0.3g의 내진설계 및 쓰나미 대비 설계
- 지진 자동정지 계통 채택
- 피동 잔열제거 계통과 피동 축매형 수소결합기 채택 등
- 외부전원 상실 시에도 원자로 노심의 냉각 가능



- 후쿠시마 타입 사고: 최대 20일 노심 냉각 유지
- 수소폭발 : 폭발 농도 달성 불가

32



## IV 한국-사우디 SMART 파트너십

33

## 한국-사우디 SMART 파트너십 MOU

SMART = سمارت

### S. Korea to build SR7.5bn nuclear reactors in KSA

BY ADAM GHAZAFAR ALI KHAN  
KSA NEWS 12/07

Riyadh: Saudi Arabia and South Korea signed the first agreement in Riyadh to build the first of a series of nuclear reactors in the kingdom, valued at \$7.5 billion, according to a statement from the Saudi Atomic Energy Commission (SAEC) on Sunday.

The agreement, which is the first of its kind, will see the construction of two 1,000-megawatt reactors in the kingdom, with a third reactor to be built in the future.

The agreement is a landmark for the kingdom, which has been seeking to diversify its energy sources and reduce its dependence on oil.

The agreement is also a landmark for South Korea, which has been seeking to expand its nuclear power market.

The agreement is expected to create thousands of jobs in the kingdom and to boost the kingdom's economy.

The agreement is also expected to boost the kingdom's reputation as a leading power producer in the Middle East.

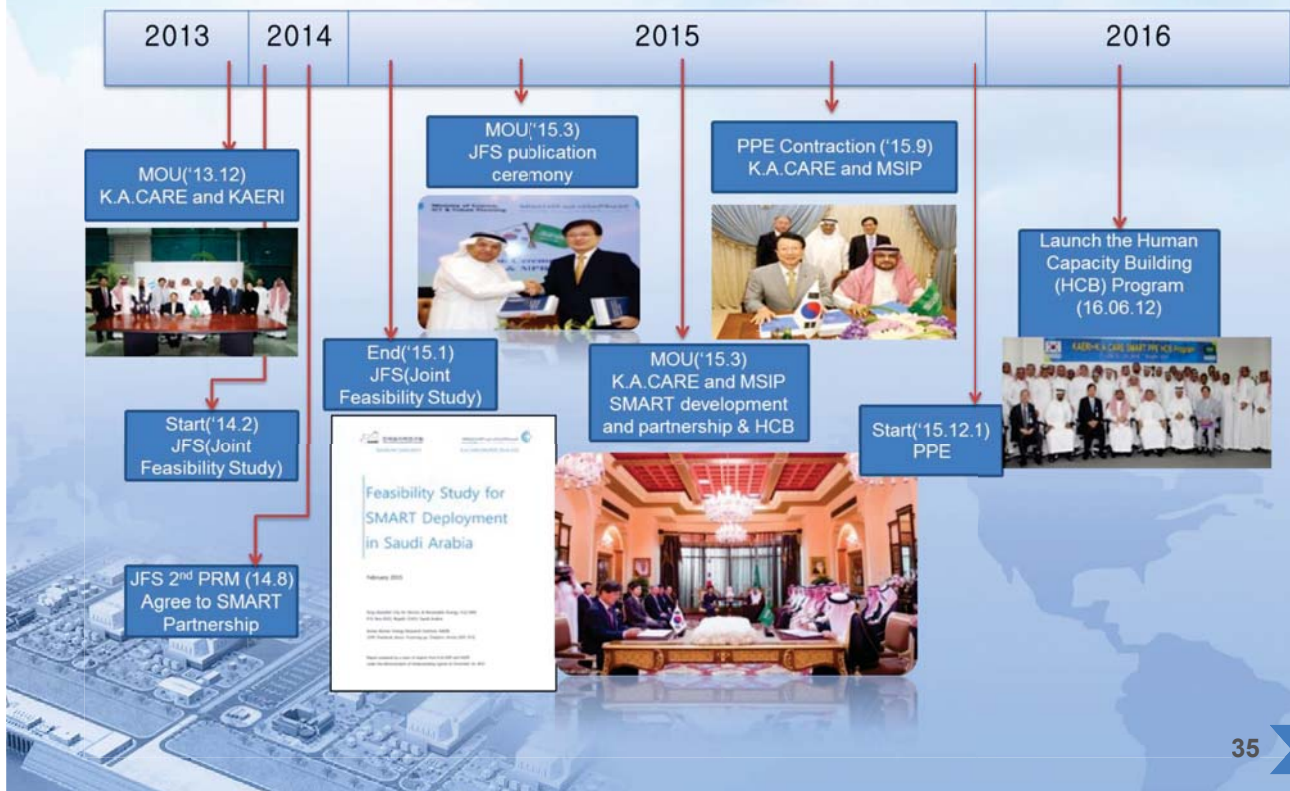
The agreement is also expected to boost the kingdom's reputation as a leading power producer in the Middle East.



2015. 3. 3. 리야드





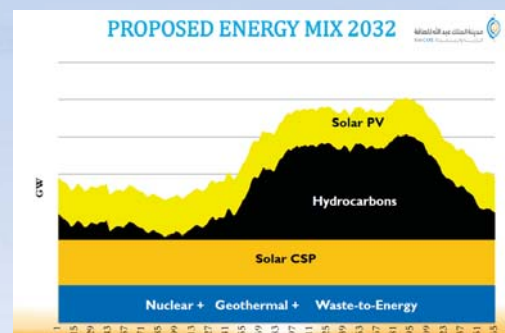


## 사우디 에너지 현황 및 비전

### □ 사우디 발전소 현황

- 운영중인 발전소 : 1,526 기
  - Larger than 300MWe : 31 units
- Oil Power Plant: 60% in Capacity
  - 1/3 of Oil was burned for Electricity
- Gas Power Plant : 40% in Capacity

### □ 사우디아라비아 Vision



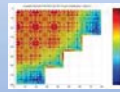
## 기술개발

## 상용화

### Korea

#### SMART Development

- SMART Standard Design
- Technology Validation
- Licensing
- Safety Enhancement for Post Fukushima Action Plan



Design Documents



1997 ~ 2015

### Korea & KSA

#### Pre-Project Engineering

- FOAK Engineering Design
- K.A.CARE HCB
- PSAR



3 Yr

### KSA

#### FOAK Plant Construction

- 2 FOAK Plants Construction
- Licensing (CP, OL)



5~6 Yr

# 한-사우디 파트너십 주요내용

## □ 파트너십 구축

- 공동 설계 및 SMART 1, 2호기 건설을 통해 SMART 상용화 촉진
- SMART 개발 및 상용화에 투자한 지분에 따라 SMART 기술 공유

## □ 주요 내용

- **[PPE: Pre-Project Engineering]** 양국이 3년간 공동 투자하여 SMART 1, 2호기 건설전 설계(PSAR 작성 등 후속 건설 준비)
  - 한국 0.3억 \$, 사우디 1억 \$
- **[SMART 1, 2호기 건설]** 사우디의 재원으로 2기의 SMART를 사우디 현지에서 건설
- **[공동 상용화]** SMART Power Co.[기 설립된 SMART 수출 전담 법인 체에 사우디 투자 참여] 주관으로 사우디 후속 건설 및 제3국 진출

## □ SMART Partnership 구축의 1단계 협약

- 2015년 9월 2일 서명(리야드)



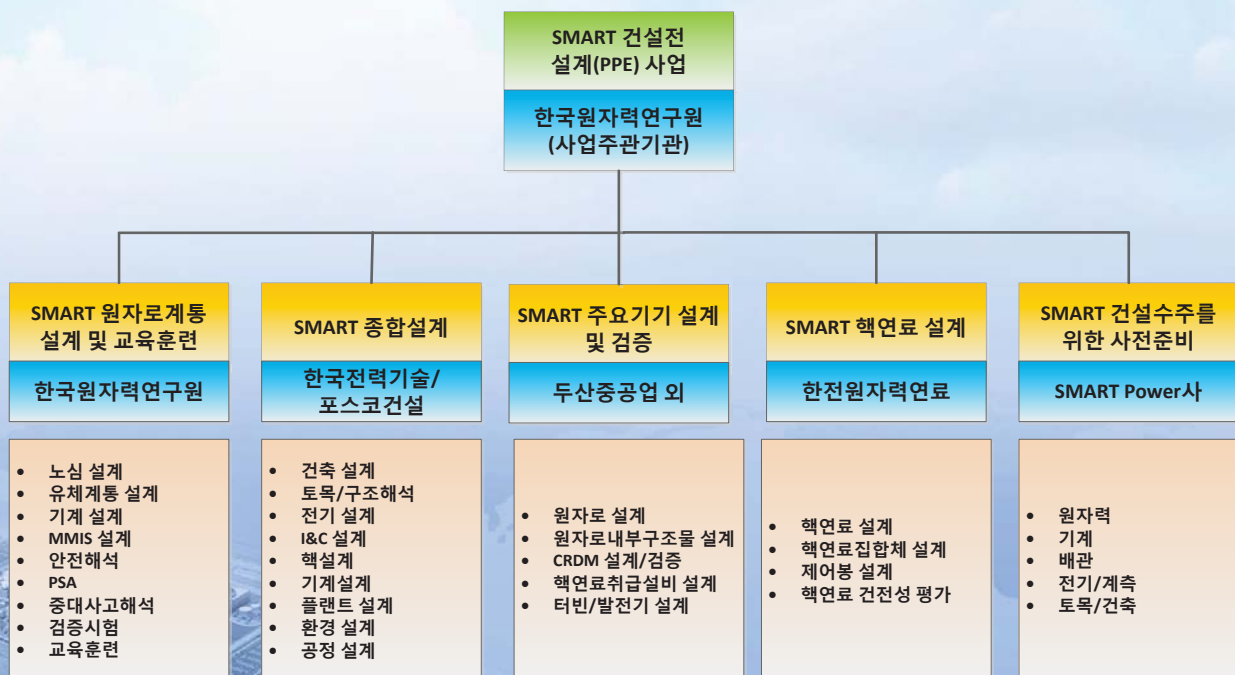
## □ 사업기간

- 2015. 12. 1 ~ 2018. 11. 30

## □ 주요 업무

- SMART 1&2호기 건설전 설계(FOAK Engineering)
- K.A.CARE 전문가 교육훈련(SMART NSSS design Technology)
- SMART 1&2호기 건설 준비

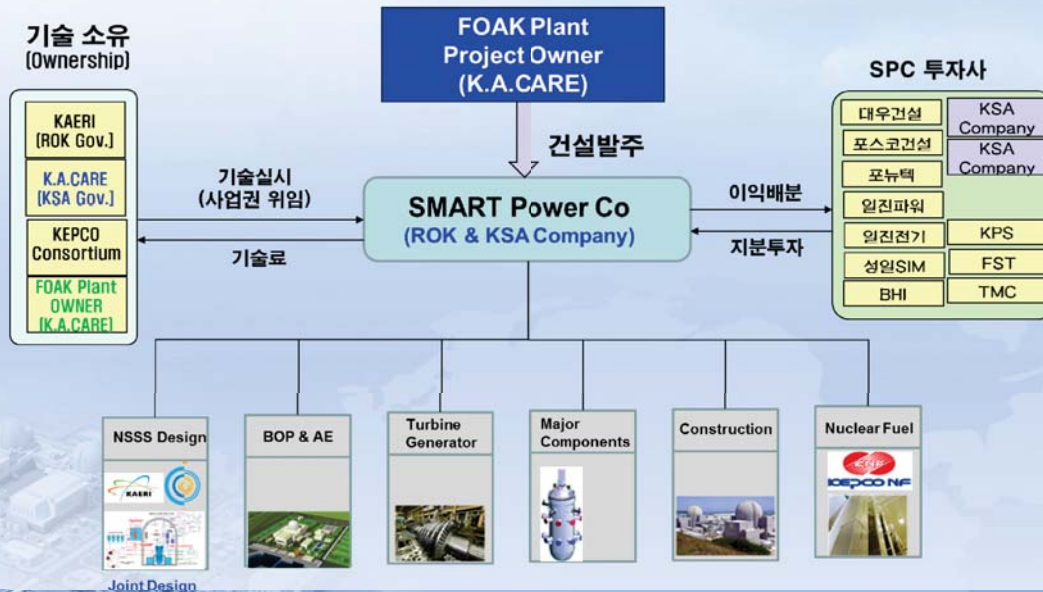
# PPE 사업





## □ 사우디 SMART 건설 및 제3국 수출

- SMART Power 사 주도로 사우디 내 건설 및 제3국 수출



41

## 사우디 동향

## □ 국가 구조조정계획(National Transformation Plan) 수립

- 경제의 다양화와 석유의존도 탈피, 일자리 창출 등이 주요 이슈
- 사우디 24개 정부부처가 Vision 2030 달성을 위한 추진계획 수립

## □ NTP: K.A.CARE 주요 추진 계획(~2020)

King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy		5,172,467
1	The launch of the Custodian of the Two Holy Mosques initiative for renewable energy in the kingdom	-
2	Identify and prepare the construction locations of the first nuclear power plant sites and provide necessary infrastructure	299,950
3	Develop needed qualitative human capabilities for atomic and renewable energy sectors	1,167,000
4	Develop and localize industrial and service opportunities and support private sector partnerships	48,000
5	Localization of small nuclear reactors compact (SMART Technology)	1,556,300
6	Localize needed renewable energy technologies to support the kingdom's power and water desalination sectors	1,120,821



- 부지조사: 0.8억\$
- SMART 사업 : 4.2억\$

- 대형원전 건설 프로그램 없음.
- PPE 뿐만 아니라 후속 SMART 건설 사업의 초반부 예산까지 정부 계획에 명시

## V 시장 전망 및 요약



43

## SMART 관심국가



44



## Partnership with the Kingdom of Saudi Arabia



- Commercialization through Construction of SMART #1 & #2 in KSA
- Human Capacity Building of K.A. CARE Staff Members through OJT & OJP
- Joint Marketing for International Customers



**SMART PPE 사업의 성공은  
SMART FOAK Plant의 건설과  
소형원전 시장에서 산업화의 성공의 발판**

45

## 요약

### □ 소형원자로

- 대형원전 도입에 한계가 있는 국가나 지역이 관심
- 세계 발전소의 대부분(96.4%)이 소형이며, 18,400여기의 30년 이상된 노후 소형발전소 대체 수요 존재
- 다양한 모델이 개발중이나 기술적 및 상업적 장애 극복이 필요

### □ SMART 개발

- 1997년부터 기술개발로 SMR 중 가장 먼저 인허가 획득
- 피동안전계통 접목으로 안전성 향상

### □ 한국-사우디아라비아 SMART 파트너십 구축

- SMART 상용화를 위한 건설전 설계 (PPE) 사업 착수
- 182호기 건설을 바탕으로 중동지역 및 Global Market을 대상으로 사업화 추진

### □ MENA 지역 국가

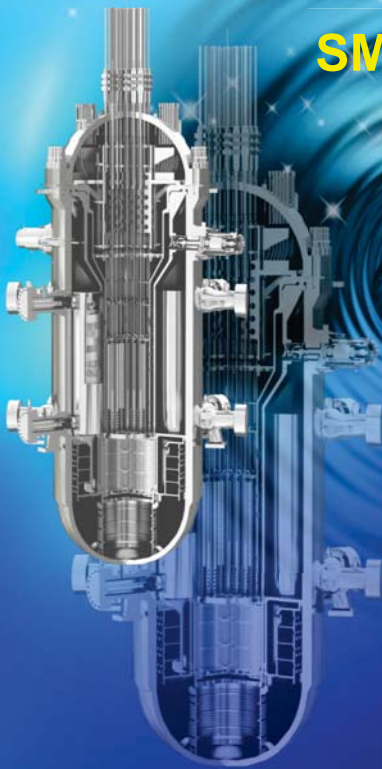
- 대부분 국가가 원자력 도입에 관심
- 한-사우디 협력을 바탕으로 소형원전 시장 석권

46



**SMART will open Small Reactor World**

**감사합니다.**



**Korea Atomic Energy  
Research Institute**