

A 중소형원전 추진현황 및 쟁점

- 일 시 : 2012년 5월 16일(수) 9:30~18:00
- 장 소 : 제주국제컨벤션센터, 3층 삼다홀A
- 주 최 : 한국원자력학회 원자로시스템기술 연구부회

• 일 정

일 정	내 용
09:30~10:00	등 록
10:00~10:20	개회사, 이원재(KAERI)
10:20~10:50	SMART 사업취지, 서경춘(MEST)
10:50~11:20	SMART 개발현황, 김궁구(KAERI)
11:20~11:30	휴 식
11:30~12:00	SMART 안전계통, 정영종(KAERI)
12:00~12:30	SMART 인허가 경험, 조상진(KINS)
12:30~13:30	점심식사
13:30~14:00	소형모듈원전 사업취지, 권병훈(MKE)
14:00~14:30	소형모듈원전 세계현황 및 개발방향, 백세진(KEPCO E&C)
14:30~14:40	휴 식
14:40~15:10	소형모듈원전 상위레벨 안전요건, 노명섭(KINGS)
15:10~15:40	소형모듈원전 인허가 접근방향, 김균태(KINS)
15:40~15:50	휴 식
15:50~18:00	패널토론
18:00~19:00	저녁식사

• 기타사항

등록비 : 5만원(점심,저녁 식사 제공) / 학생 : 등록비(무료)

문의처 : 이정익 / KAIST / 042-350-3829(CP 010-9287-4130) / jeongiklee@kaist.ac.kr

SMART 개발현황

김궁구(KAERI)

SMART 개발 현황

개발 이력 및 특징

KNS Workshop : 중소형원전 추진현황 및 쟁점

2012. 5. 16, 제주

김 공구

SMART PM, 신형원자로개발연구소



Korea Atomic Energy Research Institute

Contents

I. 중소형 원자로 (SMR)

II. 초기 SMART 개발

III. SMART 설계 변경

IV. SMART 설계 특징

V. 맺는말

I. 중소형 원자로 (SMR)

SMR : Small and Medium sized Reactor

□ 중소형 원자로(IAEA 기준)

- 소형원자로: 전기출력 300MWe 이하
- 중형원자로: 전기출력 300MWe ~ 700MWe

□ 중소형원자로 특징

- 안전성을 획기적으로 제고 가능
- 소규모 전력망에 연결이 매우 용이함
- 초기 투자비가 적어 Financial Risk 감소

IAEA 권고

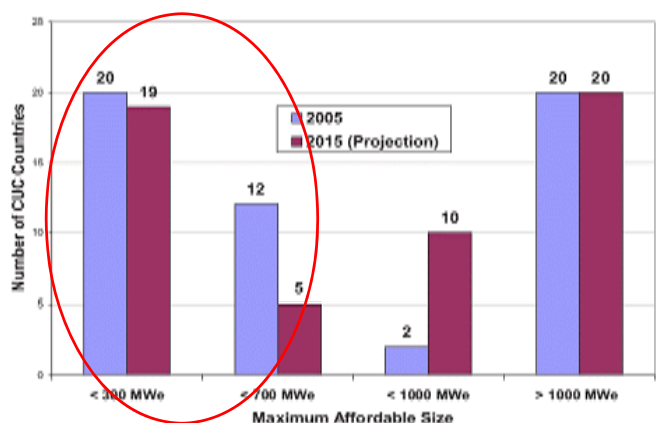
□ 단일 발전소 용량

- 단일 발전소 용량은 전체 그리드 용량의 10% 이내

□ 단일 발전소 건설비

- 국가 GDP의 5% 이내
 - 대용량 원전 : 수십억\$/기

SMR 시장 전망



» 원전도입을 예정 발표한 54개국 중 20개국은 300MWe급 이하만 도입 가능 (IAEA, 2008)

중소형원전 시장 예측

- » 400 ~ 850기 (일본전력중앙연구소, 2006)
- » 2050년까지 500 ~ 1,000기 (US DOE/GNEP, 2007)
- » 3,500억\$ 규모의 세계시장 (STEPI/IAEA, 2005)

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

5



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

SMR 개발 현황

IAEA-TECDOC-1451

UNITHERM, SAKHA, VBER, ABV, RUTA, ELENA, KLT40S, MARS, NIKA, VKR-MT, SVBR

SCOR
HTR-F
VHTR

AHWR
CHTR

PBMR
(취소, 2010)

SMART

HTR-PM

PFPW50
CANDLE
4S

IRIS
mPower
NuScale
WH SMR
HI-SMUR

CAREM

FBMR

SMART는 현재 표준설계인가 심사중

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

6



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

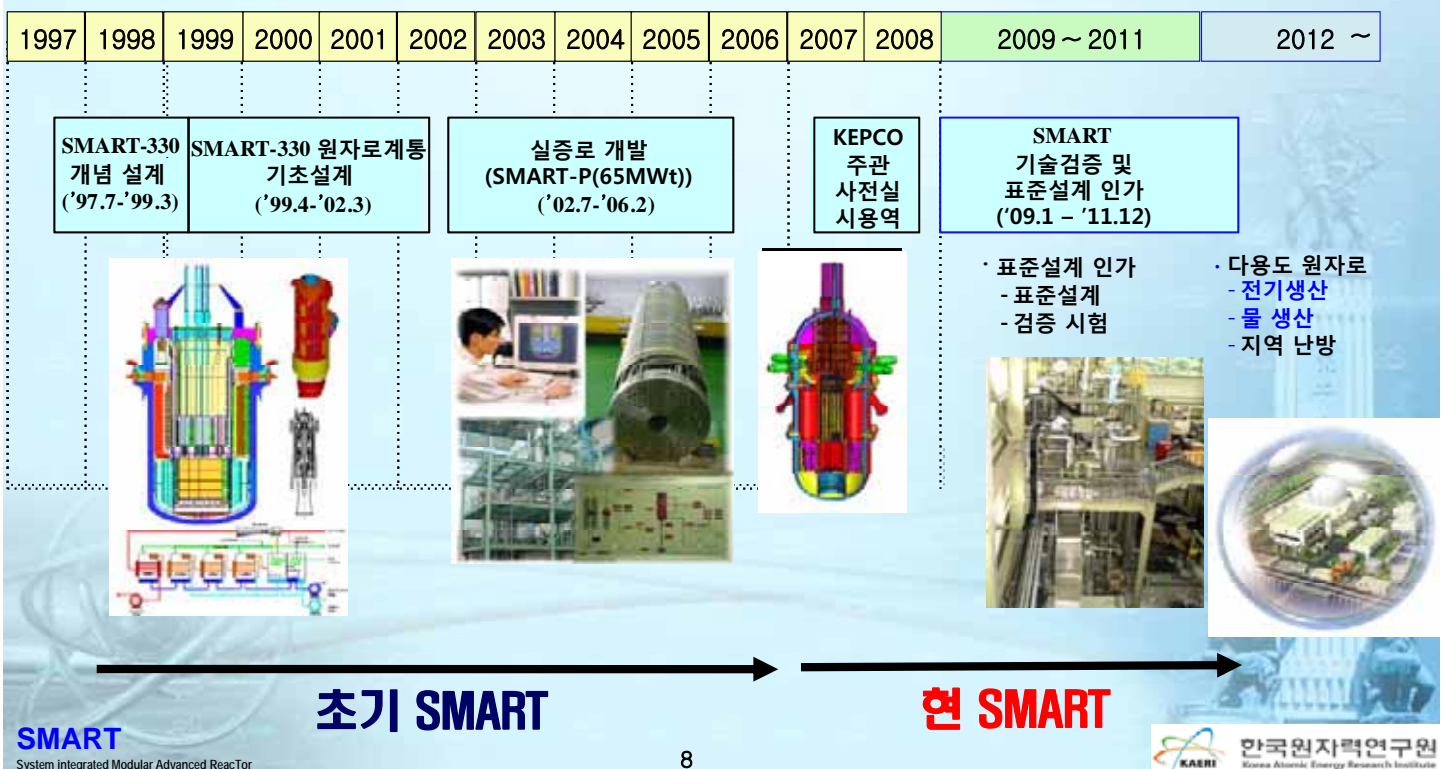
II. 초기 SMART 개발

SMART: System Integrated Modular Advanced Reactor

SMART
System Integrated Modular Advanced Reactor

7

SMART 개발 이력



SMART
System Integrated Modular Advanced Reactor

8

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

SMART 개발 필요성

SMART 개발 필요성

- 준자립 에너지원인 원자력기술의 활용 증대 및 이용 다변화를 위한 다목적 중소형 원자로를 개발 및 활용
 - 국민복지 증대를 위한 비 전력분야 (열병합, 해수담수화, 선박추진, 지역난방 등) 다목적 활용은 중소형 원자로가 적합
- 무한기술 경쟁 대비 고부가 원자력기술의 고유화, 고도화 및 선진화로 에너지 산업기술 국가경쟁력 제고
 - 고유 브랜드 기술로 원자력 기술 선진국 진입과 국가 기술 경쟁력 제고
 - 중소형 원자로 기술분야는 대용량 원자로 분야에 비해 선진화 가능
- 기술 우위성 확보가 가능한 원자로기술의 사전 확보로 개발도상국, 원자력수출 관심국가 등에 기술수출 선점
 - 개도국 등은 자원문제로 인해 원자력 이용 관심이 과거보다 크게 증대
 - 개도국 등은 처음부터 대용량 원자로 이용 어려움 (소규모 전력망, 자원 부족, 산업하부구조 미확보 이유 등)

□ 중소형원자로 개발

- 원자력 활용증대 및 이용 다변화

□ 원자력기술 고유화

- 고유브랜드 SMART 개발

□ 원자력 기술수출 선점

SMART
System Integrated Modular Advanced Reactor

KAERI

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

9



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

SMART 기술 개발

OVERVIEW OF SMART

- SMART is an advanced integral PWR that produces thermal energy of 330MWt to be used as an energy sources for seawater desalination and electricity generation. The integrated plant system with SMART comprises nuclear steam supply system, steam-turbine system, desalination system, and auxiliary systems.
- Most of technology implemented into the SMART designs are already proven through the commercial operation of PWR, and newly implemented advanced technology will be proven throughout tests. SMART is under design in accordance with the requirements of Korean licensing regulations which applied to commercial nuclear power reactors under operation and construction. The SMART and its application systems completely meet international safety requirements for integrated plant of power and water production.

□ SMART 활용

- 전력생산과 해수담수화 에너지
- 출력: 330MWt

□ 기술 개발

- 상용원전에서 입증된 기술과 신기술을 접목
- 신기술은 시험을 통하여 입증
- 한국 인허가 기준에 부합되도록 개발

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

10



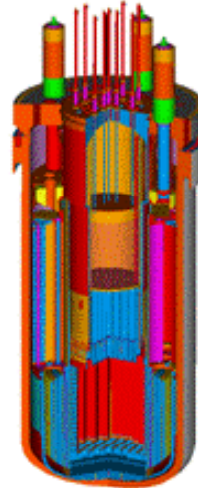
한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

SMART 설계 목표

SMART 설계목표

What do we achieve?

안전성	노심손상률	$10^{-7}/\text{RY}$ 이하
	교각파괴하는 노심빈도	$10^{-6}/\text{RY}$ 이하
경제성	발전효율 (%)	가스터빈 가격 이하
	건설공기	36개월 이하
신뢰성	가동률	95% 이상
	핵심부 수명	60년



□ 경제성

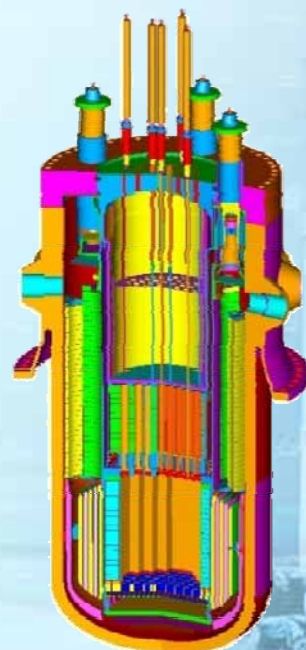
- 가스터빈 가격 이하
- 건설 공기 36개월

SMART는 대형원전과 경쟁이 아닌 동급의 화력발전과 경쟁

초기 SMART 특징-1

- 가압경수로 형 일체형원자로
- 소형원자로: 330 MWt

- Compact 원자로
 - 직경: 4.1m. 높이: 13.5m
- 완전피동안전계통
- 자기제어(Self Control)
 - 자기 출력제어
 - 자기 압력제어

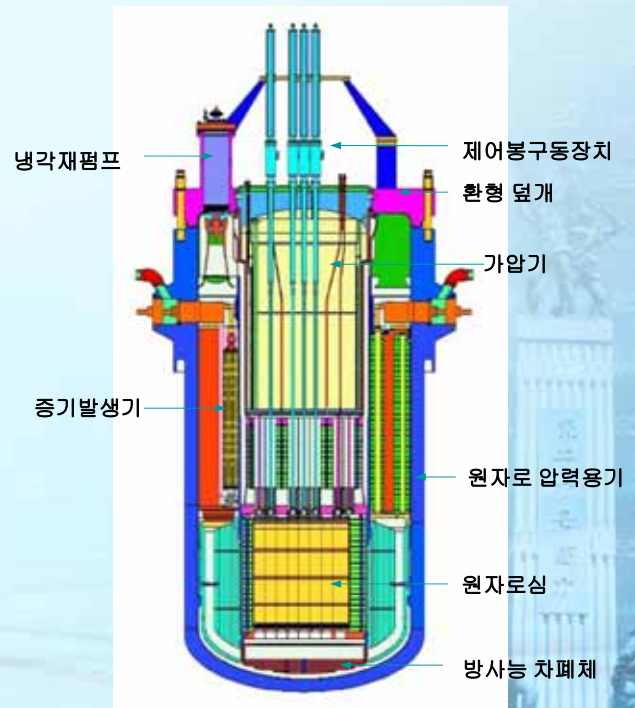


설계개념

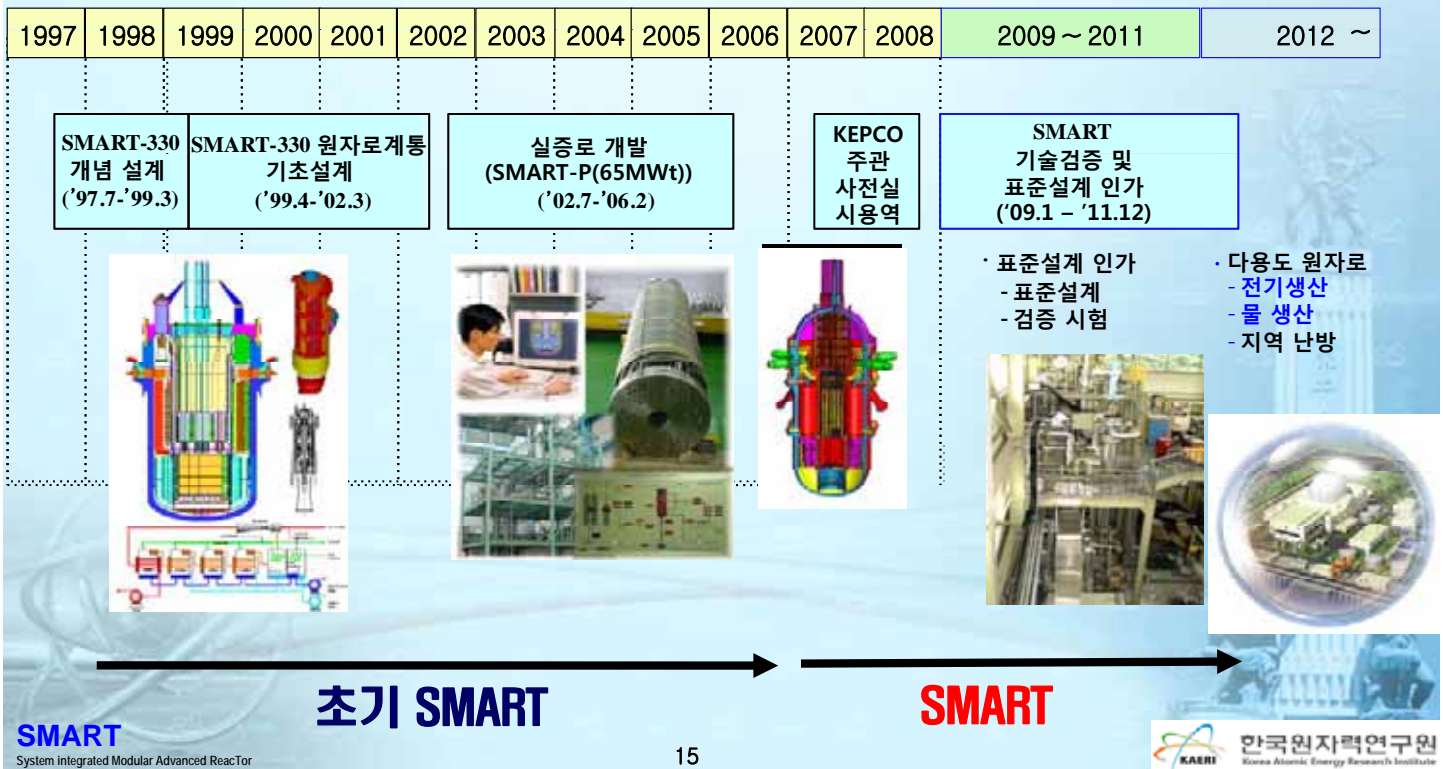
- ❑ 원자로 주기기 단일 압력용기 내장 일체형원자로
- ❑ 저출력밀도, 무봉산 및 장주기 운전 노심
- ❑ 주기기 연결배관 제거로 LBLOCA 근본적 배제
- ❑ 나선형 전열관 once-through 증기발생기
- ❑ 미세반응도 조절가능 제어봉 구동장치
- ❑ 펌프 Seal 제거 캔드모터형 펌프
- ❑ 출력/압력변화 자체 수용능력 기능
- ❑ 피동안전계통(잔열제거, 노심냉각, 과압보호) 등
- ❑ Advanced Digital MMIS
- ❑ 계통/기기 단순화 및 기기 모듈화

특 성

- ❑ 기존 가압경수로 대비 안전성 향상
- ❑ 건설공기 단축으로 경제성 제고
- ❑ 방사성폐기물 생성량 감소로 환경친화성 증대



III. SMART 설계 변경



초기 SMART 기술 평가

□기술성 평가

- 주 관 : 한국원자력학회 주관 일체형원자로 기획위원회
- 기 간 : ’00.08 ~ ’01.04 (9개월)
- 내 용 : SMART 기술 현안 도출

□인허가 심사

- 주 관 : 한국안전기술원
- 기 간 : ’05.07 ~ ’06.05 (11개월)
- 내 용 : SMART-P 인허가 현안 도출

□정책과제 및 사전실시용역

- 주 관 : 한국전력공사
- 기 간 : ’06.07 ~ ’07.06 (12개월)
- 내 용 : SMART 기술 재평가 및 후속 기술 개발 방안 도출

인허가 시현성관련

□ 무봉산 운전

- GDC-26(다른 원자로 반응도 제어계통 확보)를 불만족 무봉산 운전으로 Control Rod 이외에 적절한 독립적 반응도 제어계통이 없음.

□ 증기발생기 전열관 ISI

- 일체형 구조특성 및 제약으로 ASME SECTION XI - ISI 요건 불만족
- RG 1.83 및 과기부 고시 98-15 의 가동중 점검 요건 불만족
- GDC-32 (Inspection of Reactor Coolant Pressure Boundary) 불만족 - RCPB 기기의 중요 부위에 대한 주기적인 검사와 시험 수행 어려움.

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

17



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

유지보수 및 제작성 관련

□ 원자로집합체 덮개 체결 방식

- 중앙덮개와 환형덮개 사이의 Segment Gate 체결방법
- 핵연료 교체시 Torus 용접 반복 수행

□ CEDM 설치 및 유지 보수

- 57개 FA중 49개 CEDM 장착
- 제어봉 구동장치의 유지/보수의 어려움 (CEDM 간격 좁음)

□ 안전보호용기

- 구형안전보호용기 제작 및 검사

□ 안전보호용기내 계측기 센서 EQ

- 계측기 Vendor로부터 안전보호용기의 압력(30bar) 및 온도조건(250℃)에서 Qualified된 계측 장비 확보 여부

Innovative + Proven → 인허가 시현성
제작구현성

→ Early Overseas Market

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

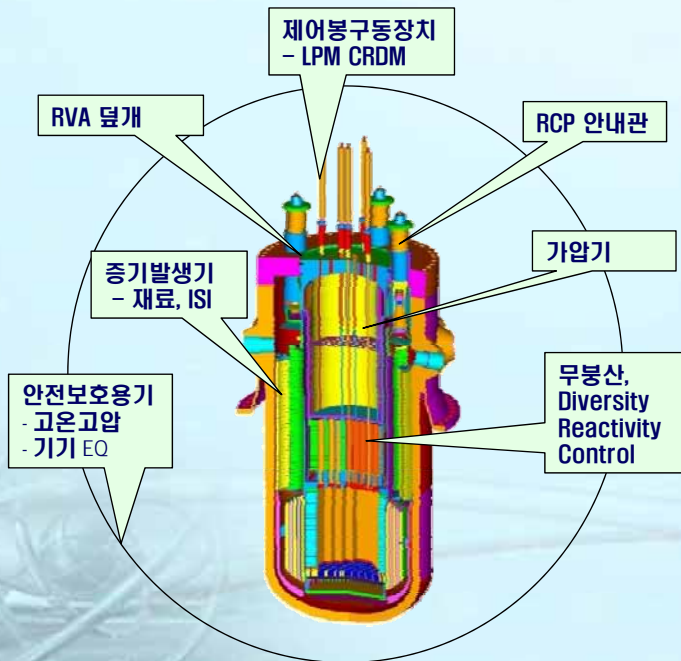
18



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

초기 SMART 관련 현안 Point

Compact, 자기제어, 피동안전계통



□ Compact 설계 개념

- 환형 및 중앙 이중 RVA 덮개
- Compact 증기발생기
- RCP Mounting

□ 자기제어

- 질소충전 가압기
- 무봉산
- 암모니아 수화학
- LPM 제어봉구동장치

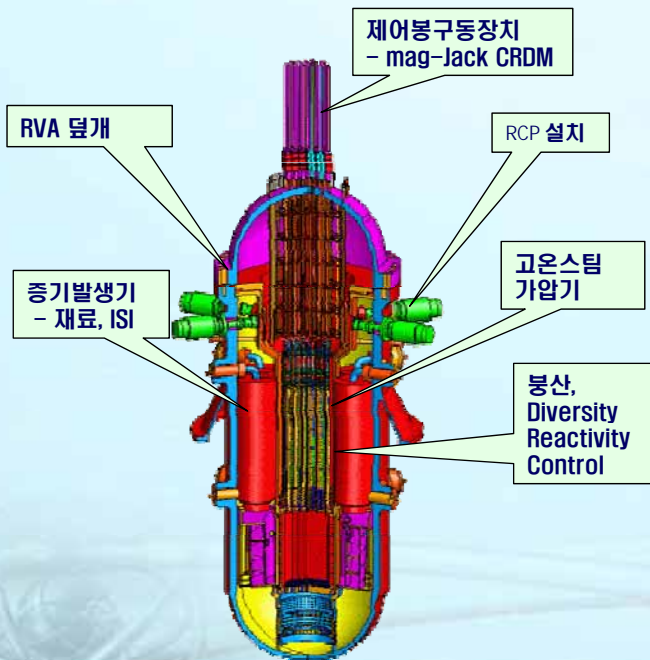
□ 피동안전

- 안전보호용기

SMART 설계 변경(요약)

구 분	초기 SMART	SMART (현재)	인허가 관련	비고
원자로 형태	일체형원자로	←	-	
용량 (열출력 / 전기출력)	330MWt / 100 MWe	←	-	
핵연료	세라믹 핵연료 - 농축도 5% 이하 - 길이 2m	←	-	성능향상 원천기술 확보
안전계통	피동잔열제거계통 SGV+SIT (피동안전계통)	← 능동 안전주입계통	-	인허가 시현성 SGV 제작구현성
반응도조절장치 (봉산 사용여부)	제어봉 무봉산	← 봉산수	다중 반응도 조절 장치	인허가 시현성
제어봉구동장치	Linear Stepping Motor (미세조정)	Magnetic Jack Type (4 채널 위치 지시기)	-	상용원전 기술 개 선후 적용
증기발생기	형식 : 관류식 나선형 전열관 : PT-7M(코드 미등재 재료) - 가동중검사 불가	형식 : 관류식 나선형 전열관 : Inconel 690 - 가동중검사 가능	코드 등재 재료 사용 전열관 가동중 검사	인허가 시현성
가압기	저온가스가압기(질소 충전)	고온증기가압기	-	입증된 기술 채택
원자로 덮개	환형 이중 덮개, 토러스 Seal Stud bolt 및 용접 체결	단일 반구형 덮개, Stud bolt 체결	- 토러스 실 유지보수	유지보수성 증진 인허가 시현성
RCP 설치	안내관을 설치후 덮개 상부에 설치	압력용기 측면에 수평설치	- 안내관 LOCA Point	안내관 제거

SMART 원자로 (현재)



□인허가 시현성 향상

- 봉산수 도입
- 단일 RVA 덮개
- Magnetic-Jack 제어봉구동 장치
- ISI 가능 증기발생기 (전열관 외경 확장)
- RCP 직접 설치
- 입증된 고온증기가압기 채택

□유지보수

- 단일 RVA 덮개

□제작구현성

- SGV 미설치 및 안전주입계통 도입

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

21



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

IV. SMART 설계 특성

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

22

표준설계 완료



표준설계인가 신청을 위한 공식 인허가 문서

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

23



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

기술검증 완료



SMART

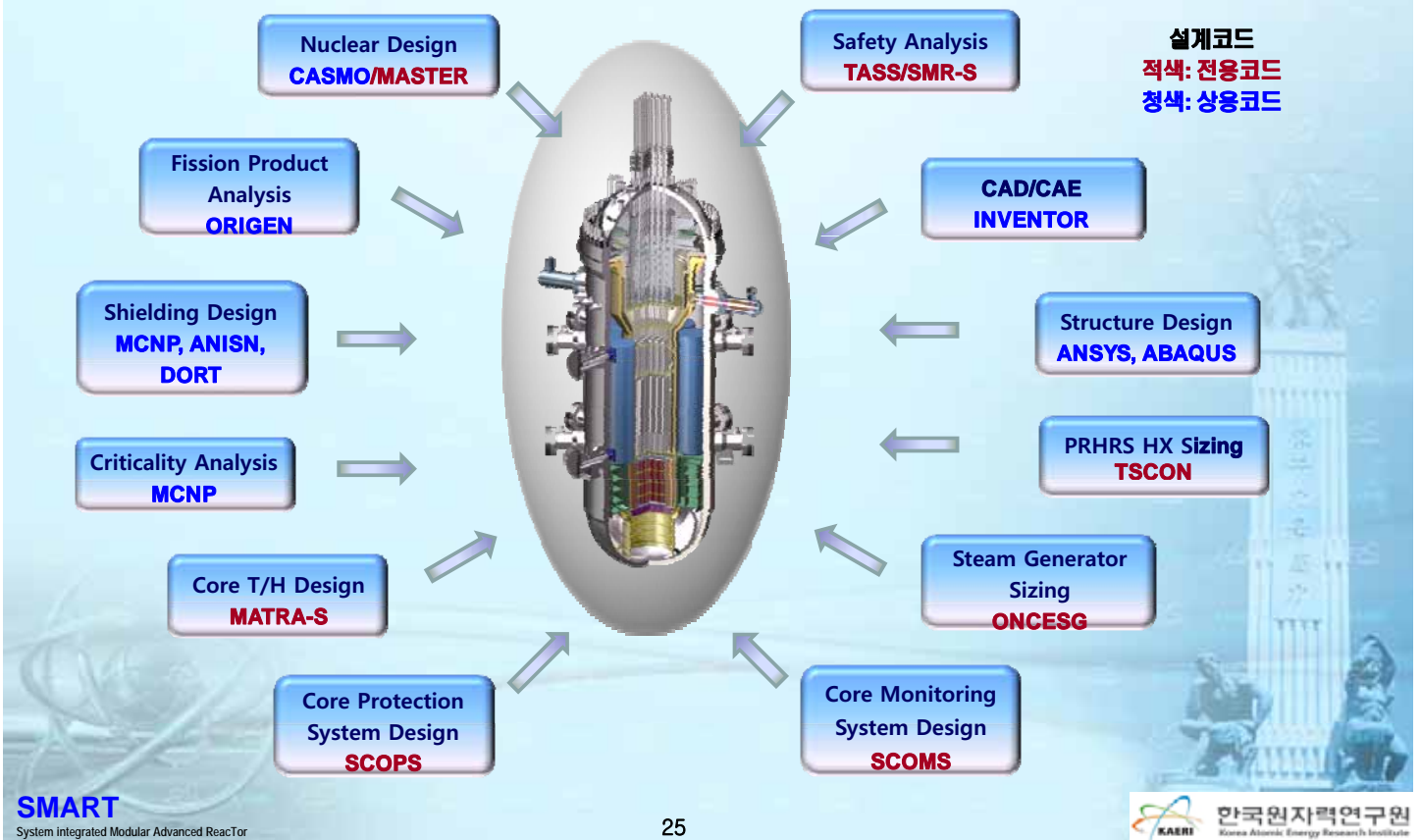
System Integrated Modular Advanced Reactor

24



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

SMART 설계코드 확보



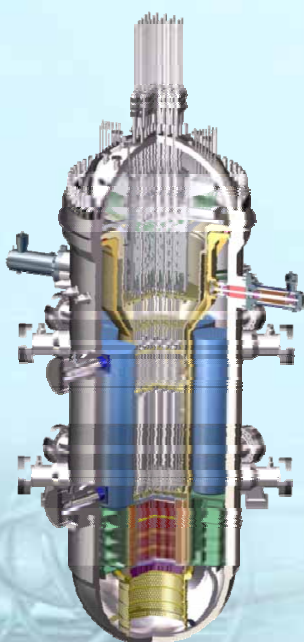
핵연료

□ 특징

- 성능이 입증된 UO_2 세라믹 핵연료
- 17x17 핵연료집합체
- 짧은 가열 길이(2m) 핵연료 집합체
- IFM 그리드 지지격자

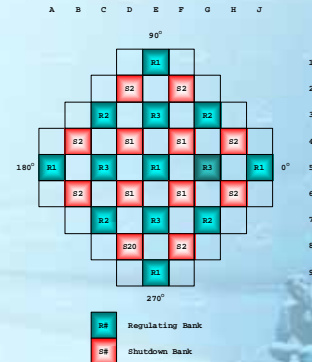
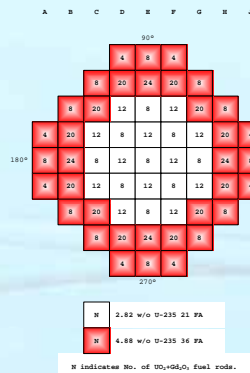
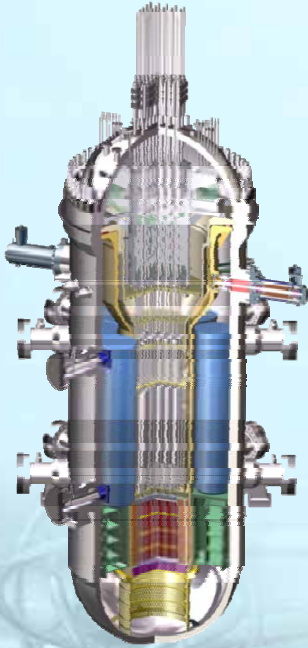
□ 기술검증 완료

- CHF 측정시험
- 5x5 집합체 열혼합 시험
- 노심 유동분포 시험
- 연료집합체 노외성능시험



□ 특징

- 36개월 핵연료 교체 주기
- 낮은 출력 밀도
- 15% 열적 여유도 확보
- AOO시 DNBR 감소 고려한 충분한 정상상태 여유도



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

27



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

안전계통

< Hybrid Safety System >

□ 피동안전계통

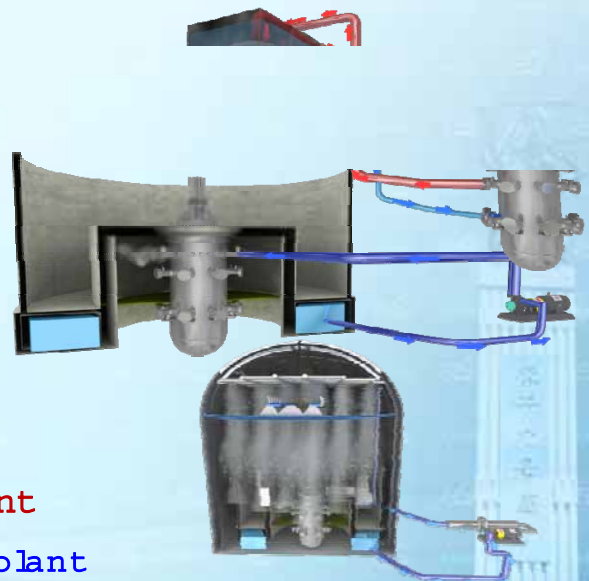
- 피동잔열제거계통
- PAR

□ 능동안전계통

- 안전주입계통
- 정지냉각계통
- 격납건물살수계통

Counter Measure - Severe Accident

- Large inventory of reactor coolant
- Large Sum p-Integrated IRW ST
- Large containment free volume



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

28



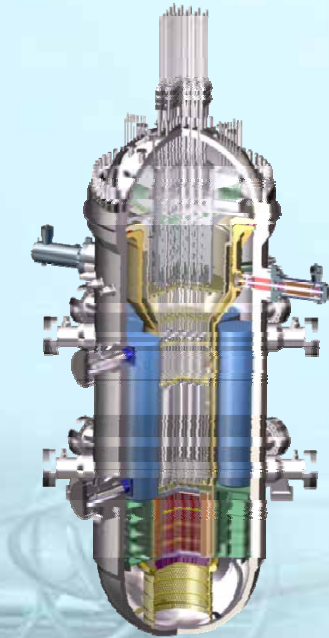
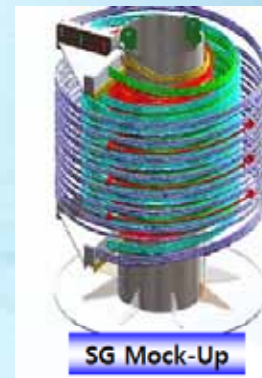
한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

□ 특징

- 관류식 나선형 전열관을 적용하여 추가 설비 없이 과열 증기 생산
- 모듈형식으로 설계하여 개별적으로 증기발생기 교체 가능
- 전열관 및 헤더의 가동중검사를 위한 고유기술 확보

□ 기술검증 완료

- 열전달 시험
- 전열관 중성자조사
- 전열관 가동중 검사
 - 나선형 전열관 ISI 장비특허 획득



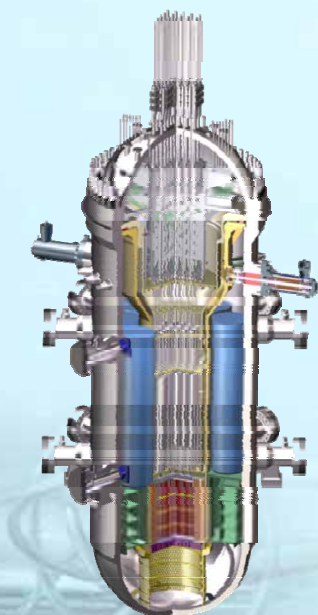
SMART
System Integrated Modular Advanced Reactor

□ 특징

- 회전축과 회전자의 일체로 설계하고 밀봉캔을 적용하여 기계적 밀봉장치 제거
 - 밀봉장치 손상으로 인한 원자로 냉각재상실사고를 원천적으로 배제
- 플랜지형 노즐을 도입하여 설치·제거 및 원자로냉각재 누설 방지 극대화

□ 기술검증 완료

- RCP 수력 성능 시험



SMART
System Integrated Modular Advanced Reactor

제어봉구동장치 (Control Rod Drive Mechanism)

노내계측기 노즐 (ICI Nozzles)

원자로냉각재펌프 (Reactor Coolant Pump)

증기 노즐 (Steam Nozzle)

복수 노즐 (Feed Water Nozzle)



□ 일체형원자로 설계 구현

- 주요기기를 단일 압력용기에 내부에 설치
 - 압력경계 및 지지구조물을 단순화
 - LBLOCA를 원천적으로 배제
- 내장형 가압기 구현
- 원자로용기 하부의 관통부 배제 및 중성자조사 완화 설계
 - 내벽에서의 최대값 : $1.1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$

□ 일체형원자로 고유기술

- 관류식나선형 증기발생기 가동중검사 기술
- 상부설치형 노내계측기 기술
- 유동혼합헤더집합체 개발

□ 검증시험 완료

- 원자로내부구조물 동특성시험
- 노내계측기 유지 보수

SMART

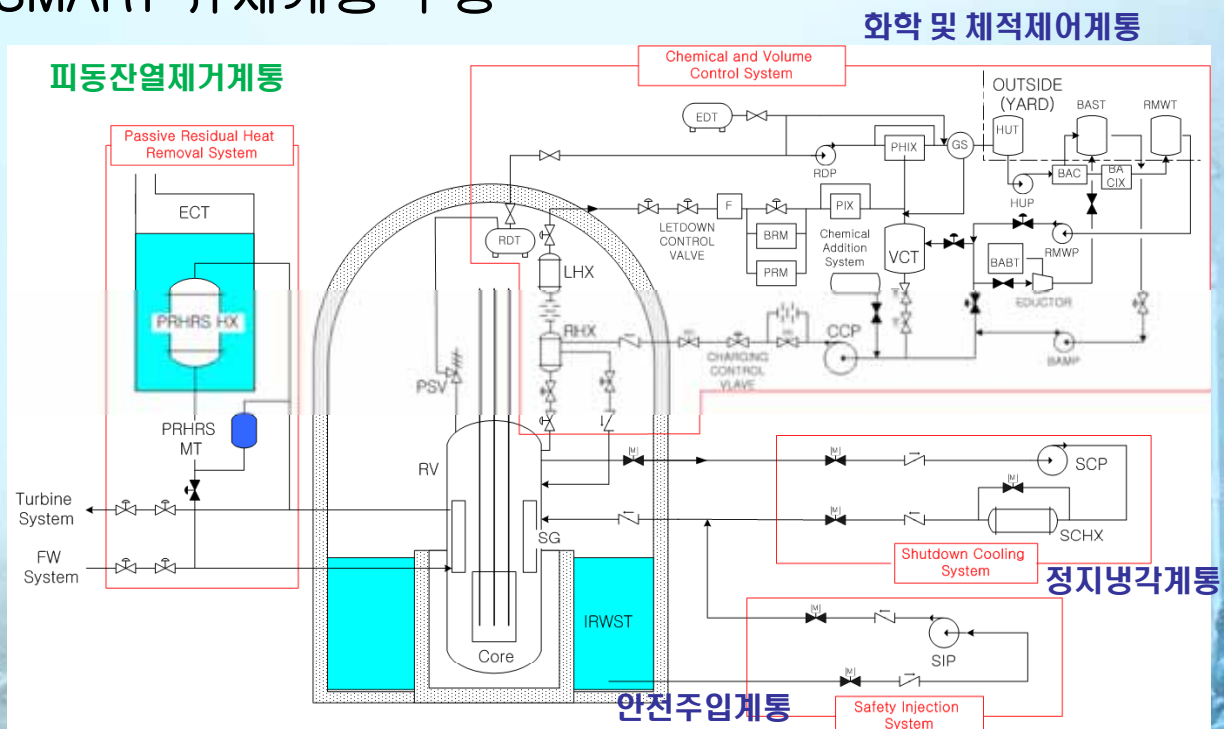
System Integrated Modular Advanced Reactor

31



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

□ SMART 유체계통 구성



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

32



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

□ 디지털 계측제어계통

- Full 디지털 기술기반의 계측제어계통 설계
- 안전계통에 DSP 기반 플랫폼 개발 적용(경성 실시간 특성)
- 플랜트보호계통 각 채널내 이중화 구조 채택

□ 제어실

- 소형 워크스테이션 기반 제어반 구축
- 탄성창형 타일경보표시 방법 채택
- 경보감축처리방안 적용
- 정보처리 기술 적용

□ 인간공학 특징

- 향상된 운전원간 의사소통 구조
- 업무처리 향상 및 동선 감소



□ BOP 설계 특성

- Enhanced seismic resistance
- Quadrant wrap-around GA design
- Fuel Building integrated into Aux. Building
- Aircraft impact proof

□ Foot Print

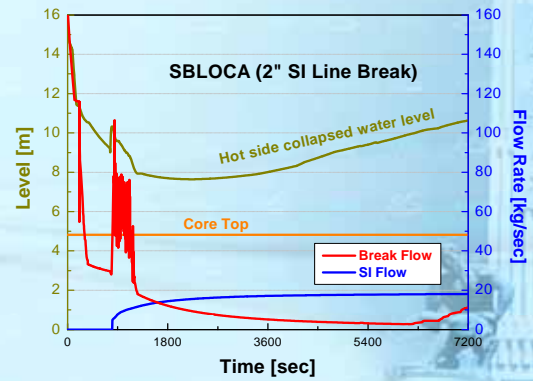
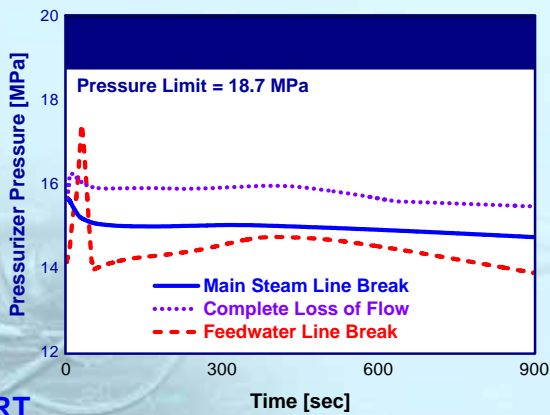
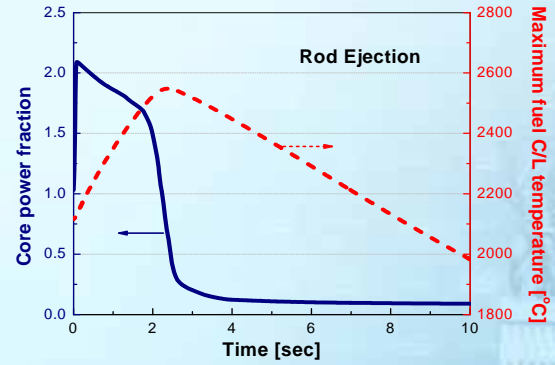
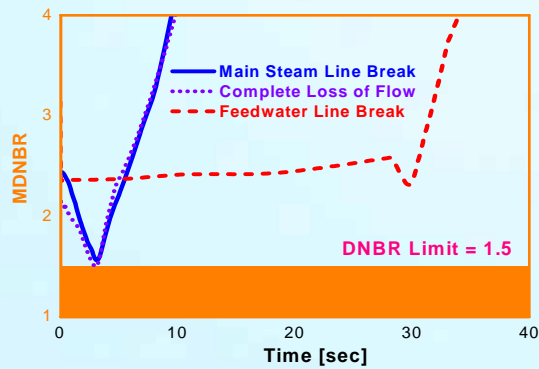
- 300 x 300m (90,000m²)

□ 건설 공기

- 3년



주요 안전해석 결과



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

35



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

중대사고 대처 특징

□ 대형 건식 원자로건물

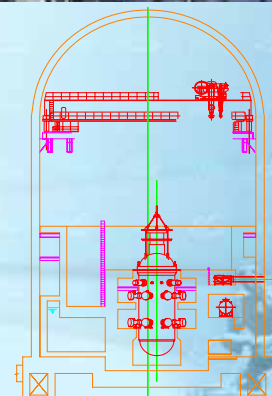
- 100% 피복재-물 반응 수소생성시 균일수소농도 6%



- 항공기 충돌 대비 설계 강화

□ 수소완화설비

- 피동촉매형수소제결합기 설치
- 국부 수소 집적 방지 및 수소폭발 방지



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

36



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

SMART 원자로 배치



Single Unit Construction



Twin Units Construction

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

37



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

V. 맺는말

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

38

□ SMART 개발

- 상용기술과 신기술을 접목하여
 - 인허가 시현성 향상
 - 제작 구현성 및 유지보수성 향상
- 신기술의 검증 완료
- 표준설계인가 인허가 심사중

□ SMART 전망

- 잠재 수요국의 관심 고조
- 중소형원전시장 선점
 - 건설 착수 가능

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

39



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

Academic Rx and Real Rx – Rickover

June 5, 1953

- **An academic reactor** characteristics: (1) It is **simple**. (2) It is **small**. (3) It is **cheap**. (4) It is **light**. (5) It can be **built very quickly**. (6) It is very **flexible in purpose** [“omnibus reactor”]. (7) Very little development is required. It will use mostly “off-the-shelf” components. (8) The reactor is **in the study phases. It is not being built now**.
- **An real reactor** characteristics: (1) It is being built now. (2) It is behind schedule. (3) It is requiring an immense amount of development on apparently trivial items. Corrosion, in particular, is a problem. (4) It is very **expensive**. (5) It takes **a long time to build** because of the engineering development problems. (6) It is **large**. (7) It is **heavy**. (8) It is **complicated**.

SMART는 SDA 획득을 눈앞에 두고 건설이 가능한 **Real Rx**

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

40



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



SMART 안전계통

정영종(KAERI)

$$E=mc^2$$

SMART Safety System

2012. 05. 16.

정영종 (chung@kaeri.re.kr)



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

목차

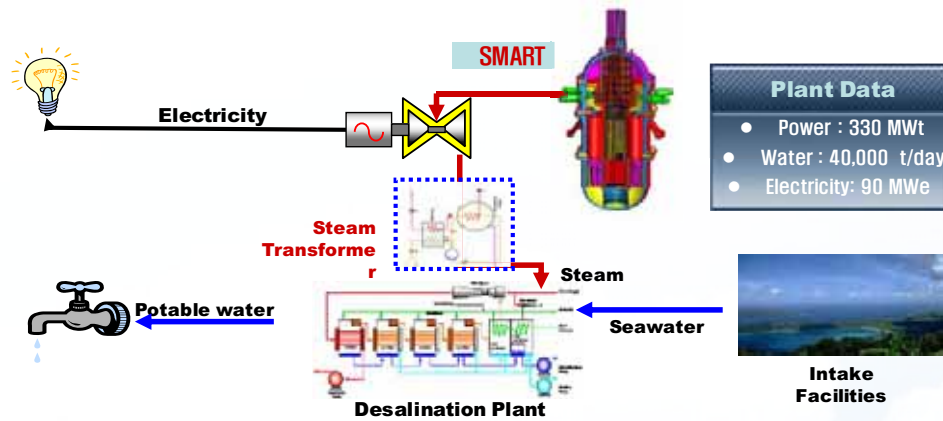
- I. SMART 개요
- II. SMART 설계
- III. SMART 안전계통
- IV. SMART 원자로건물계통
- V. SMART 안전성
- VI. 요약



I. SMART 개요

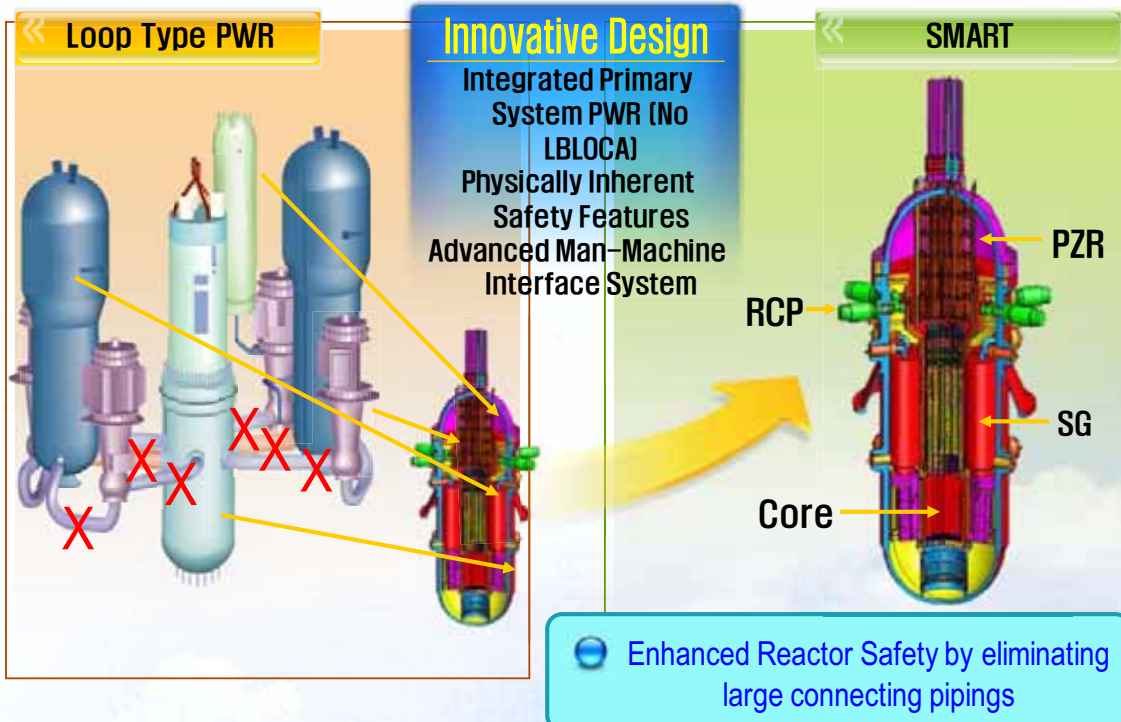
$$E=mc^2$$

SMART is an Integrated Plant (330MWt) for Electricity Generation and Seawater Desalination



System integrated Modular Advanced Reactor

- Sufficient Electricity and Fresh Water for a City of 100,000 Population
- Appropriate for Small Grid Size or Localized Power System



II. SMART 설계

$$E=mc^2$$

□ SMART 설계

- Proven Technology
 - existing PWRs Technologies
- Advanced Technology
 - Integral PWR
 - 내장형 증기가압기
 - 8 내장형 나선형 증기발생기
 - 4 Canned Motor Pumps
 - 유동혼합헤더집합체
 - Reduced Height 17X17 Fuel
 - 피동잔열제거계통
 - Digital Man-Machine Interface I&C



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

4



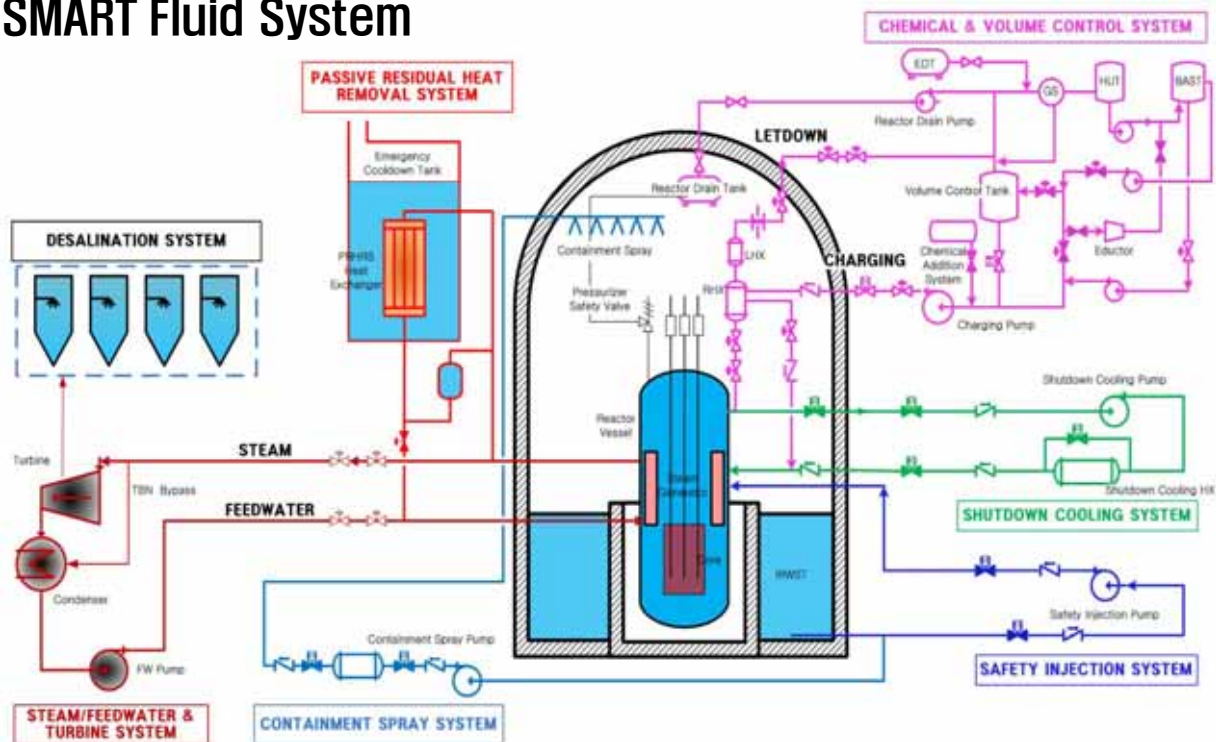
한국원자력연구원

Korea Atomic Energy Research Institute

III. SMART 안전계통

$$E=mc^2$$

□ SMART Fluid System



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

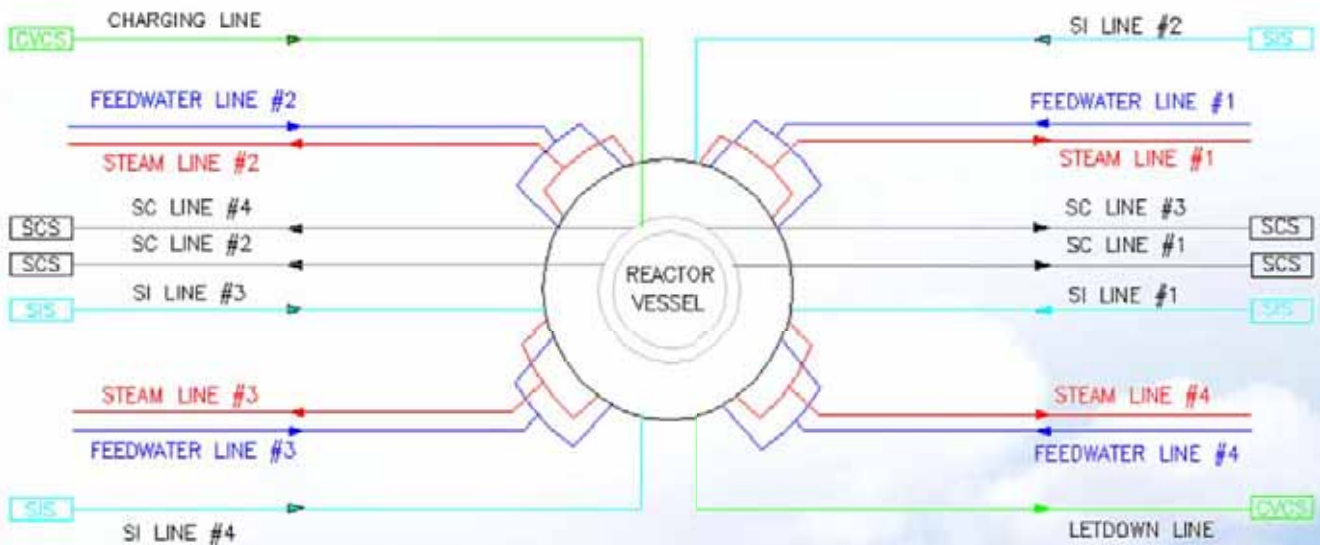
5



한국원자력연구원

Korea Atomic Energy Research Institute

Reactor Coolant System



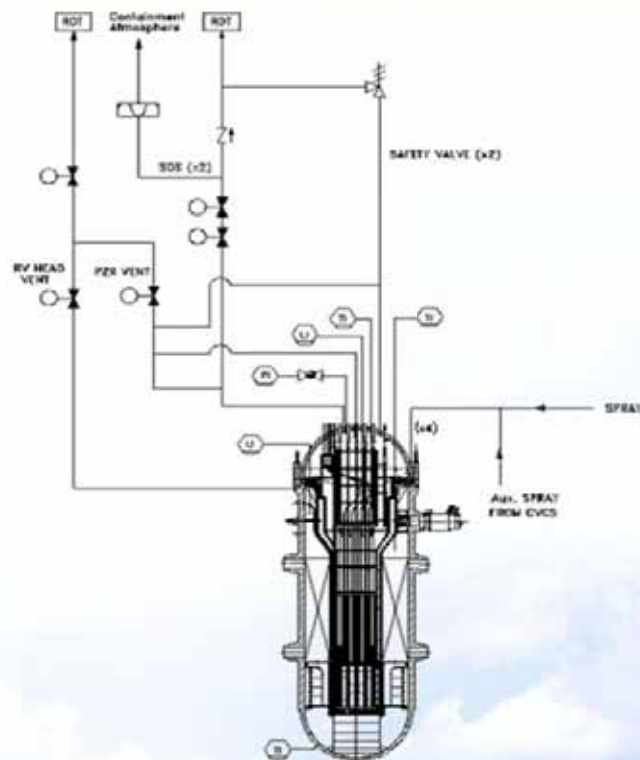
SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

6



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

7



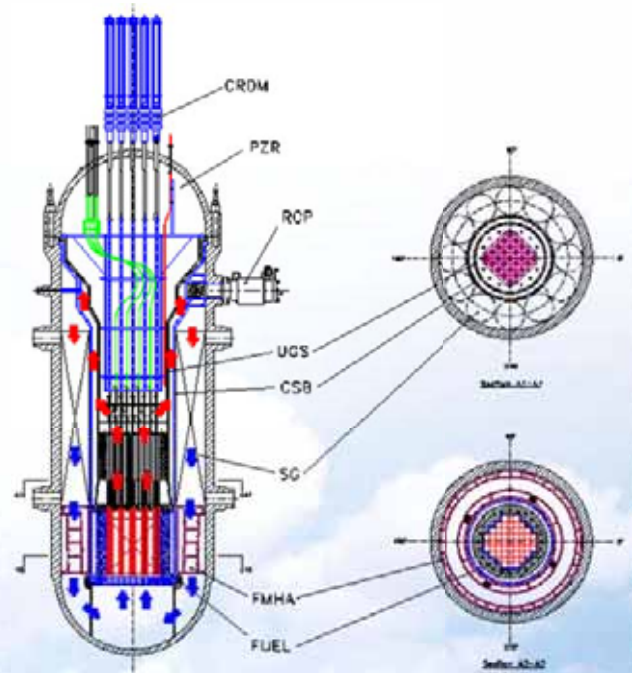
한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

□ RCS 구성

- 주요기기 원자로용기 내 배치
 - PZR, SG, RCP
 - 대형배관파단사고 배제
- 노심에서 생성된 열을 증기발생기를 통해 이차계통으로 전달

□ 주요 설계변수

- 노심출력 : 330 MWt
- 설계압력/온도 : 17 MPa / 360 °C
- 운전압력 : 15 MPa
- 고온측온도 : 323 °C
- 최소설계유량 : 2090 kg/s
- 가압기체적 : ~30 m³



□ 계통기능

- 원자로냉각재계통에 강제순환 제공
- 노심에서 생산된 열을 증기발생기를 통하여 동력변환계통으로 전달
- 원자로냉각재와 방사능물질이 원자로건물 또는 이차계통으로 방출되지 않게 방벽 역할

□ 계통설명

- 원자로용기 관통부
 - 원자로용기 측면
 - Steam and feedwater nozzle of steam generator
 - SIS, SCS, CVCS nozzle
 - Instrument sensing nozzle
 - 원자로용기 덮개
 - Control Rod Drive Mechanism
 - Pressurizer Safety Valve nozzle
 - Instrument sensing nozzle (PZR water level, pressure, temperature)

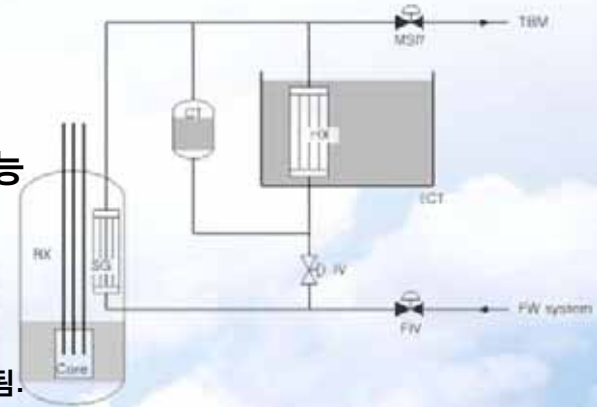
피동잔열제거계통(PRHRS)

□ 설계기준

- 원자로 정지시 노심 잔열과 계통의 현열을 제거하여 RCS를 고온정지 상태로 유지
- 원자로냉각재계통을 36시간 이내에 정지냉각계통(SCS) 진입조건 (200 °C)까지 냉각: 고온정지조건

□ 계통구성도

- 독립된 4 계열로 구성
- 2 계열의 작동만으로 노심냉각 가능
- SG ~ Hx 높이: ~10 m
 - 각 계열은 열교환기, 충전탱크, 밸브와 연결배관 등으로 구성되며, 각각의 열교환기는 비상냉각탱크 내부에 침수
 - PRHRS는 급수관 및 증기관을 통해 정렬됨.



□ 계통기능

- 설계기준사고시 이차계통 사용이 불가능할 경우 노심 잔열과 RCS의 현열 및 구조물에서 발생하는 열을 제거
- 출력운전 조건에서 정지냉각계통 진입조건 (200 °C) 까지 원자로를 냉각 시키는 기능

□ 계통운전

- PRHRS는 급수유량증가, 주증기고압력, 주증기저압력 신호에 의해 자동적으로 작동
- 계통이 작동되면 주급수관과 주증기관은 폐쇄되고, PRHRS 격리밸브는 개방
- 운전원의 판단에 의한 수동동작 가능
- 각 격리밸브는 1E 등급으로 설계
- 노심에서 발생하는 잔열과 원자로냉각재계통 내부의 현열은 증기발생기와 PRHRS를 통해 비상냉각탱크로 전달
 - 원자로냉각재계통 내부와 PRHRS에는 자연대류에 의한 열전달 발생

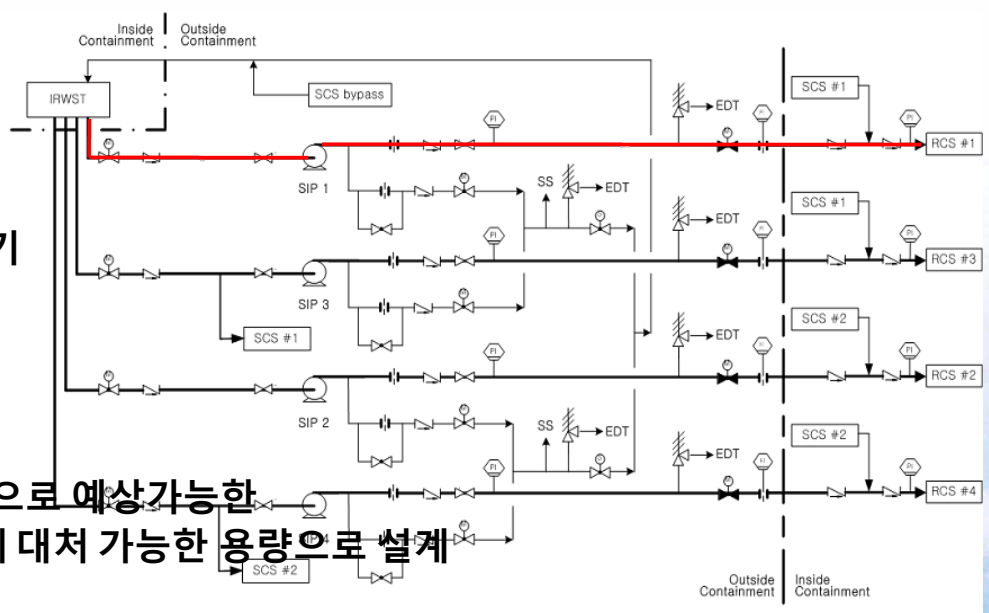
안전주입계통(SIS)

□ 설계기준

- SI 펌프는 예상 가능한 냉각재상실사고에 대하여 노심 냉각 및 노심 노출 방지를 수행할 수 있는 충분한 수두와 유량을 제공
- IRWST는 예상가능한 냉각재상실사고에 대하여 충분한 양의 냉각재를 제공할 수 있도록 용량 설정
- 4계열로 구성된 안전주입계통은 냉각재를 원자로 내부로 직접 주입하며, 각 계열은 독립적으로 구성
- 전력을 사용하는 능동계통으로 단일고장 고려
- 예상 가능한 극한의 환경에서도 동작이 가능하도록 설계

□ 계통구성도

- 독립된 4계열로 구성
- IRWST의 냉각재를 압력용기 내부로 직접 주입
- SCS와 일부 계통 공유
- 한 계열의 작동만으로 예상가능한 냉각재상실사고에 대처 가능한 용량으로 설계
- SCS 계통 중 일부를 SIS 계통과 공유
 - System(SCS) connect with four trains of the SIS



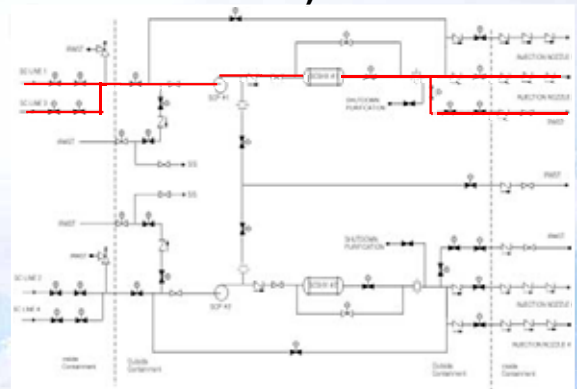
정지냉각계통(SCS)

□ 설계기준

- 독립적인 2 계열
- 단일고장을 고려
- 설계압력/온도
 - 6.4 MPa / 250 °C
- 냉각능력
 - 2계열 냉각: After shutdown, to maintain under 50 °C within 96 hours
 - 1계열 냉각: After shutdown, to maintain under 90 °C within 36 hours

□ 계통구성도

- SCS is used in conjunction with PRHRS to cooling to refueling temperature
- LTOP(Low Temperature Over-pressurization Protection)



SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

14

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

□ 계통기능

- 정지냉각운전
 - 원자로냉각재계통의 온도를 200 °C 에서 핵연료 재장전온도까지 냉각.
 - RCS 온도를 재장전 온도에서 유지.
- 재장전운전
 - IRWST 내부의 봉산수를 재장전운전에 사용.
- LTOP기능
 - 각각의 SCS 흡입배관은 LTOP relief valve 보유.

SMART

System Integrated Modular Advanced Reactor

15

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

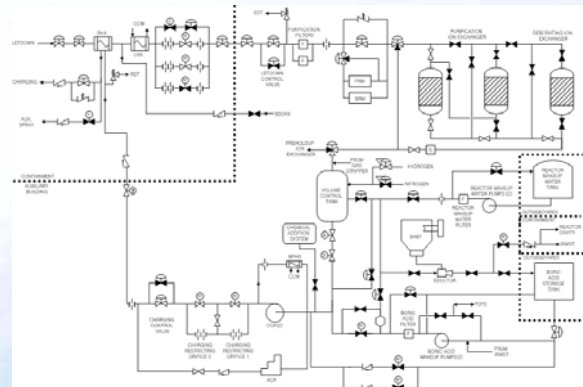
화학 및 체적제어계통(CVCS)

□ 계통 기능

- 냉각재의 화학적 성질 유지
- 원자로의 냉각재 재고량 제어
- 원자로 냉각재계통의 붕산농도 제어
- 붕산의 환원 및 저장, 분리
- 원자로의 냉각재에 대한 지속적인 방사능 감시

□ 계통구성도

- Letdown system
- Charging system
- Makeup water system
- Purification system
- Boron recovery system
- Chemical addition system



IV. 원자로건물계통

□ Reactor Building System

- Reactor Building
- Reactor Building Spray System
- Reactor Building Isolation System
- Reactor Building Hydrogen Control System

□ 설계기준

- 설계기준사고시 방사선량이 10 CFR 50.34에 명시된 요건을 충족
- 설계기준사고의 방사능 영향평가 결과는 15장에 제시
- 원자로건물의 누설율
 - 사고 발생 후 24시간 동안 0.1 %/일
 - 24시간 이후에는 0.05 %/일

□ 계통설계

- 프리스트레스트 콘크리트 원통형 쉘, 반구형 돔 및 철근콘크리트 내부구조물
- 설계조건
 - 내부설계압력: 2.461 kg/cm²
 - 외부 설계압력: 0.28 kg/cm²
 - 설계온도: 115.6℃

원자로건물 살수계통

□ 설계기준

- 설계기준사고시 압력/온도를 낮추기 위하여 원자로건물 대기로부터 열을 제거
- 사고 발생 24시간 후에 원자로건물 압력을 첨두 압력의 1/2 이하로 유지
- 원자로건물 대기로부터 핵분열생성물을 제거 및 외부 환경으로 핵분열생성물이 누출되는 것을 감소

□ 계통설계

- 주요기기: 살수펌프, 살수열교환기, 최소우회유량 열교환기, 살수모관 및 관련 밸브

□ 계통운전

- 정상운전시 많은 관통배관은 개방
- 비상시 필요하지 않은 배관은 격리신호에 의하여 자동적으로 격리

원자로건물 격리계통

□ 설계기준

- 일반설계기준 55 및 56 만족: 관통부 내부 및 외부에 각각 한 개의 격리밸브가 설치
- 일반설계기준 57 만족: 폐회로계통의 경우 원자로건물 외부에 한 개의 밸브 설치 가능
- 원자로건물을 관통하는 모든 배관 및 격리밸브는 안전관련 및 내진범주 I

□ 계통설계

- ANSI/ANS-56.2 요건에 부합하는 작동시간을 갖도록 설계
- 교육과학기술부 고시 제2009-37호 (원자로 격납건물 기밀시험에 관한 기준 고시)

□ 계통운전

- 정상운전: 작동되지 않음
- 사고운전: 안전주입작동신호 또는 원자로건물 살수작동신호

원자로건물 수소제어계통

1. 설계기준사고 대처설비: 피동수소재결합기계통 및 원자로건물 퍼지계통
2. 중대사고 대처설비: 수소완화계통

□ 설계기준

- 피동수소재결합기계통: 규제지침서 1.7에 따라 설계, 원자로건물내 수소농도 4 % 이하로 유지
- 피동촉매형수소재결합기(PAR)는 안전등급 3, 품질그룹 G, 내진범주 I급
- 수소완화계통: 원자로건물내 수소농도 10 % 이하로 유지(수소폭발 배제), 내진범주 I급, 비안전성관련 기기

□ 계통설계

- 피동수소재결합기계통 - 200% 용량의 피동촉매형수소재결합기
- 수소감시계통: 원자로건물내 0-30%의 수소농도를 연속적으로 감시하는 다중채널
- 수소완화계통 - 8대의 피동촉매형수소재결합기로 구성, 설계기준사고용 안전성관련 피동촉매형수소재결합기와 동일한 설계 환경에서 설계

IV SMART 안전성

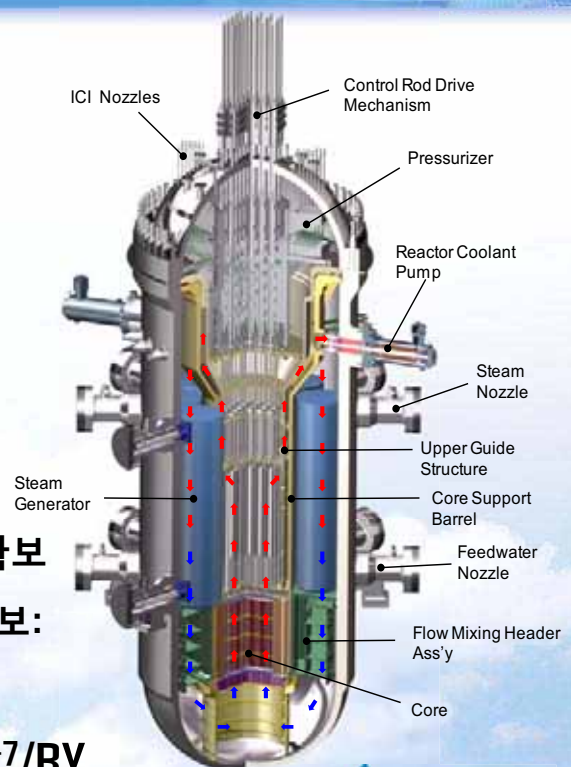


- SMART 안전관련 설계
 - 피동잔열제거계통(PRHRS) – 독립된 4계열
 - 안전주입계통 – 기계적 4 계열, 전기적 2계열
 - Safety of SMART against SBLOCA has been proven through Experiments and Analysis
- Engineered Safety Features
 - PRHRS (4 Train) - SG 2차측 완전 피동자연순환냉각
 - SIS (4 Train) – 격납용기내 재장전수조로부터 강수관직접주입
 - SCS(정지냉각계통) (2 Trains)
 - SDS(안전감압계통) (2 Trains)
 - CSS(원자로건물살수계통) (2 Trains)
- Fully Proven Technologies: based on Commercial PWRs
 - SMART-specific Technologies are experimentally Validated

□ SMART 고유안전성

- 배관 상부에 위치 (노심상부 8m 이상)
- 많은 원자로냉각재재고량으로
- 사고대응시간 확보: $\sim 0.55\text{m}^3/\text{MW}_{\text{th}}$
- SG 2차측 설계압력 17MPa 적용
- SG 튜브측으로 이차계통 유량
- Canned Motor type RCP 채택
- RPV 냉각을 위한 충분한 ECT 냉각수원 확보
- 낮은 RPV 중성자조사량으로 RPV 수명확보:
 $\sim 10^{16} \text{ \#}/\text{m}^2$ (PWR: $\sim 10^{21} \text{ \#}/\text{m}^2$)

□ Core Damage Frequency : $\sim 5.1 \times 10^{-7}/\text{RY}$





□ 노심손상 방지를 위한 설계

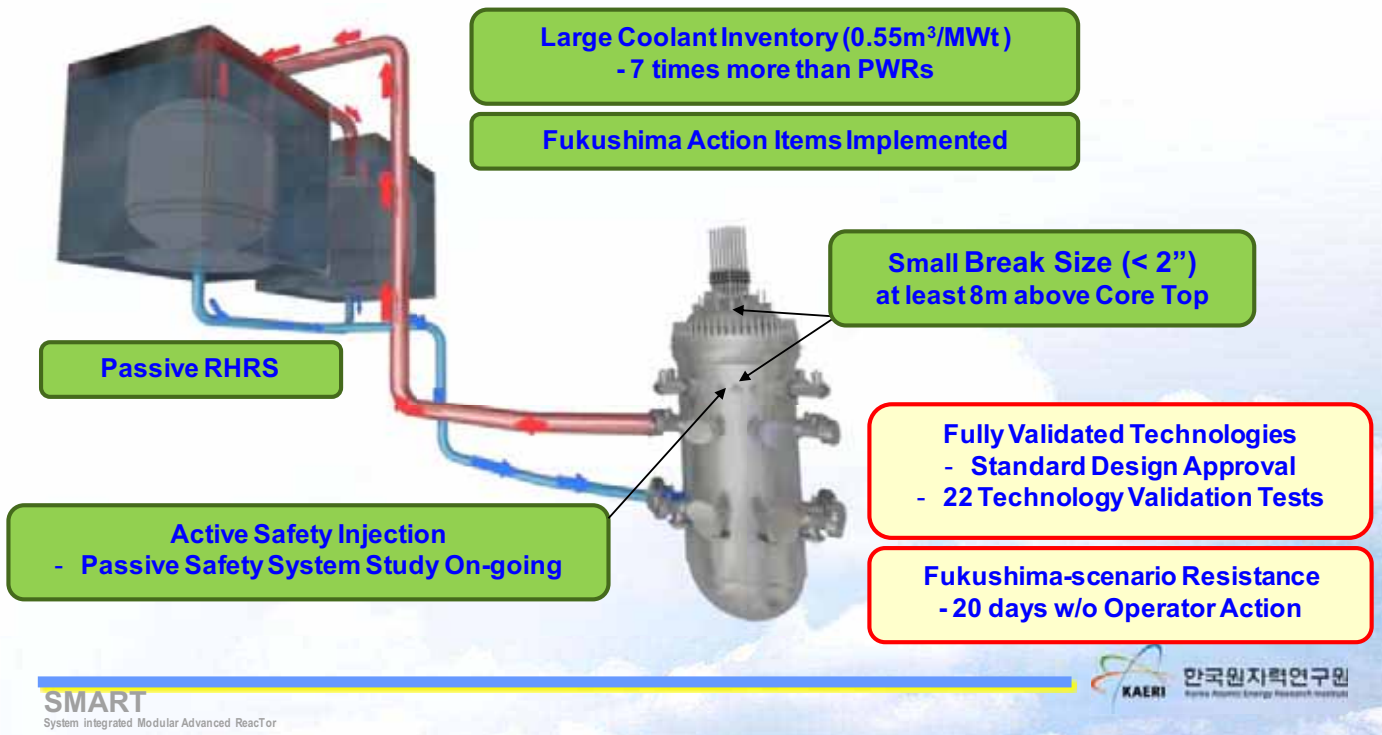
- 다중의 원자로보호계통
 - RPS/DPS/Boron Injection
- 다중의 독립적인 안전계통
 - 4 Train SIS/4 Train PRHRS
- Elimination Large Pipe Penetrating RPV
 - No LBLOCA, Only SBLOCA ($\leq 2"$ I.D)
- 원자로건물내 핵연료재장전수탱크 위치
- Feed & Bleed Operation : 이차측 열제거원 완전상실사고
- 이중 비상전원
 - 2 EDG to Mitigate Loss of Offsite Power
 - 1 AAC to Mitigate Station Blackout



□ 방사능 누출 최소화를 위한 설계

- 큰 원자로건물 자유체적
 - Maintain Structural Integrity in case of LOCA, MSLLB, and Severe Accidents
- Reactor Cavity Flooding System
 - In-Vessel Retention by External Reactor Vessel Cooling
 - Gravity Flooding from IRWST to Reactor Cavity
- 안전감압계통
 - 2 Independent Trains
 - Rapid RCS Depressurization to Prevent High Pressure Molten Material Eruption
- 수소폭발 가능성 제거
 - 피동축매형수소재결합기(PAR) w/o Electrical Power
- 높은 이차계통 & PRHRS 설계압력
 - Elimination of Radioactive Material Release through PRHRS Safety Relief Valve

□ Safety Features of SMART



VI. 요약

□ SMART 고유의 설계특성

- 대형 LOCA 배제 및 노즐 배관 상부에 위치
- 많은 원자로냉각재재고량으로 충분한 사고대응시간 확보
- RPV 냉각을 위한 충분한 ECT 냉각수원 확보

□ SMART 안전계통 구성

- 비냉각재상실사고: 피동안전계통 - PRHRS
- 냉각재상실사고: 능동안전계통 - SIS
- 중대사고: 수소완화계통/원자로용기 외벽냉각

□ SMART 안전성 향상

SMART 표준설계 인허가 경험

조상진(KINS)



SMART 표준설계 인허가 경험

2012. 5. 16

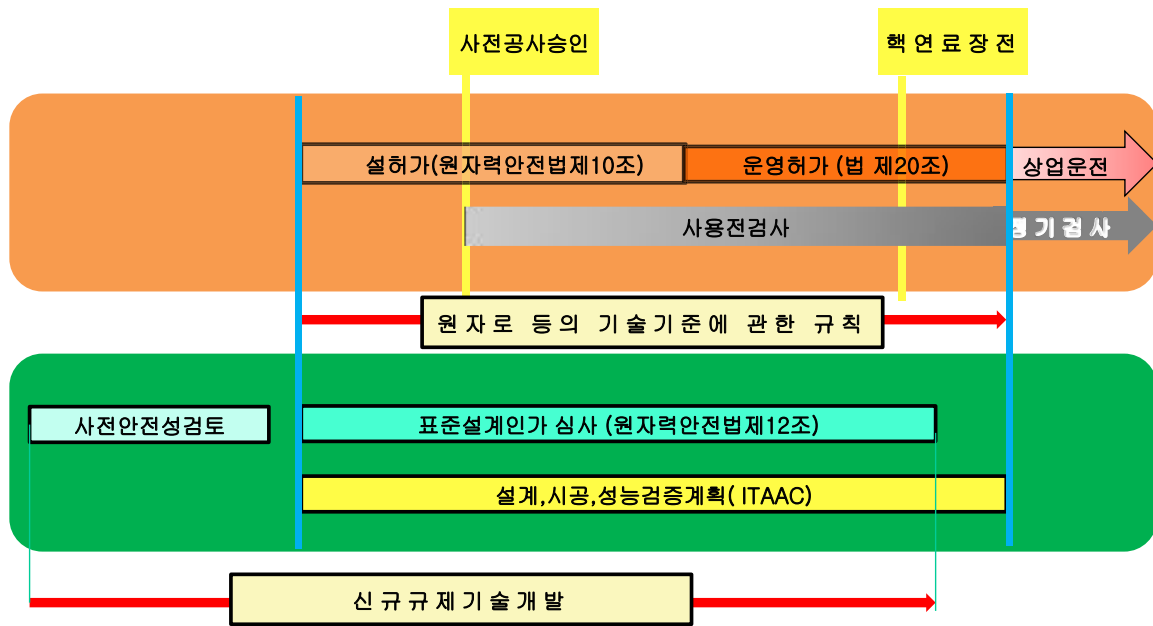
SMART/APR+ PM 조상진

한국원자력안전기술원

발표 순서

- 표준설계 규정
- SMART 표준설계 현황
- 맺음말

국내 인허가



- 표준설계인가 → 건설허가 → 운영허가의 3단계 인허가 절차가 아니며, 표준설계인가는 **신형 원전의 인허가 안정성**을 높이기 위한 것임
- 표준설계는 부지, 건설 또는 운영단계에서 확인할 수 있는 사항을 제외한 **운영허가 단계의 설계 수준**

3

표준설계인가 경험

1999 - 2001

APR-1400

- 사전안전성심사
 - '00.1-'01.7
 - SSAR
- 표준설계인가 법제화
 - '01.7.25
- 표준설계인가
 - '01.8-'02.7

2005-2006

SMART-P

- 사전안전성심사
 - SSAR
- 표준설계인가 취하
 - 17개의 현안
 - I&C 설계 미진

2010 - 2012

SMART

- 사전안전성심사
 - '10.2 - '10.12
 - 에비사고해석 및 코드검증
 - 설계깊이 및 계통설명서 등 5건
- 표준설계인가 심사 중

APR+

- 사전안전성심사
 - '10.8 - '11.11
 - 기술보고서(15)
 - 중점 검토필요사항 54건도출
- 표준설계인가 심사 중
 - '11.12 -

4



표준설계 규정

심사대상 및 유효기간

- 표준설계인가 신청 (원자력안전법 제12조 ①)
 - 동일한 설계의 발전용 원자로 및 관계시설을 반복적으로 설하고자 하는 자
- 제출서류 (원자력안전법 시행규칙 제11조 ③)
 - 원자로의 사용목적에 관한 설명서
 - 원자로의 설계에 관한 기술능력 설명서
 - 표준설계안전성분석보고서 (SSAR)
 - 비상운전절차서 작성계획서 (EOG)
 - 표준설계기술서 (CDM) (원자력법제12조 ②)
 - 원자로시설의 설계기준, 설계내용 및 설계·시공·성능 검증계획
- 표준설계인가 유효기간 (원자력안전법 제12조 ③)
 - 설계의 유효기간 : 10년
 - 유효기간 내 안전성에 중대한 영향이 있다고 인정하면 인가받은 사항에 대한 시정 또는 보완 요구 가능

설계 심도

□ 원자력안전법 제12조 ⑥, 원자력안전법 시행령 제24조(제외대상)

- 안전성 증진을 위하여 새로운 기술의 지속적인 반영이 필요한 사항
- 구매·설치 및 준공이 완료되기 전에는 안전성 확인이 불가능한 사항
 - 설계기준 및 프로세스, 설계 방법론 등
 - 배관, 방사성 차폐, 주제어실 및 계측제어 등

□ 설계수준 (원자력안전법 시행규칙 제12조 ③)

- 안전성을 확인할 수 있는 수준의 상세한 기술정보를 요구
- APR 1400 표준설계인가 의 규제경험
 - NSSS 주기기 및 안전관련계통 설계 : 상세 수준 (≥ 상세설계)
 - BOP 계통 : 예비 정도 수준

APR 1400 설계 수준

계 통	결과물 목록	설계 수준
일차 계통 주기기	원자로, 증기발생기, 가압기, 배관 설계요건서	최종
원자로냉각재계통	설계요 서	상세
화학 및 체적제어계통	설계요 서	상세
원자로보호계통	설계요 서	상세
공학적인안전계통	설계요 서	상세
급수 및 주증기공급계통	설계요 서	상세
격납건물/보조/터빈건물	내진해석결과, 격납건물살수 및 퍼지계통 설계요 서	상세
배관설계	각 증별 Isometric Drawing, 응력/ 피로해석	상세

주요 심사 문서

□ 설계요건서(Design Requirement)

- 계통 설계를 위한 **구성기기의 설계요건**.
- 열적 특성과 하중, 지진, 그리고 재질 등 관한 자료 및 요구사항들이 제공, **분야별 설계 및 기기 시방서(Design & Equipment Specification) 작성에 사용**
- 주요 내용
 - Safety Related Design Requirements
 - Performance Requirement
 - Configuration Requirement
 - Load Requirement
 - Material Requirement
 - Operational Requirement
 - Internal Interface Requirement

심사 기준

□ 원자력안전법 제12조 (표준설계인가)

- 발전용 원자로 및 관계시설의 위치, **구조, 설비 및 성능**이 원자력안전위원회 규칙이 정하는 **기술기준에 적합**하여 방사성물질 등에 의한 인체, 물체 및 공공의 재해방지에 지장이 없을 것
- 발전용 원자로 및 관계시설의 **건설 및 운영으로 인하여** 발생하는 방사성물질 등으로부터 **국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지**하기 위하여 대통령령이 정하는 기준에 적합할 것

□ 원자력안전위원회 규칙 제3호(원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙)

- 제2장 제1절(제3조 내지 제10조) : 원자로시설의 위치
- 제2장 제2절(제11조 내지 제49조) : 원자로시설의 구조, 설비 및 성능
- 제2장 제3절(제50조 내지 제66조) : 원자로시설의 운영

□ 원자력안전위원회 고시

심사 기준

- 경수로형 원자력발전소 안전심사지침서 (KINS/GE-N001, 2009판)
- 참조기준
 - 10 CFR Part 20, 50, 100 등 원자력 관련 Code of Federal Regulation
 - USNRC의 Regulatory Guide, Standard Review Plan, Generic Letter, Bulletin, TMI 요건, Generic Safety Issue 등
 - 기타 ASME, ASTM, AWS, IEEE, ACI, AISC, ASCE, ANSI/ANS 등 관련 Codes & Standards
- 법령에 구체적으로 명시되어 있지 않은 세부 기술기준
 - 사업자 약속사항, 규제조치 사항 등

First in Regulation and Safety Technology, KINS



KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY

SMART 표준설계 심사 현황

개 요

- 정부에서는 제256차 원자력위원회(2009.3.30)에서 보고된
“SMART 조기개발 추진방안(안)”에 따라 2011년까지 SMART 표준
설계인가 획득 추진.
- 한국원자력연구원(KAERI)은 원자력안전 제12조(표준설계인가)에 따
라 2010년 12월 30일에 SMART 표준설계인가를 신청.
- 한국원자력안전기술원(KINS)은 원자력안전법 제12조의(표준설계인
가) 및 동법 제111조(권한의 위탁) 1항에 근거
 - 제출된 SMART 표준설계안전성분석보고서 및 기타 법령에서 요구하는 문서
에 대한 심사를 수행 중.

심사 경위

- 2011.2.1 : 표준설계인가 신청서류 적합성검토
 - 법 시행령 제24조 제2항 : 서류적합성검토 제출시한이 60일 이내 요구
 - 심사일정의 시급성을 고려하여 30일 내에 완료하여 결과 제출
 - “발생빈도에 따른 사고등급 분류체계”, “터빈/발전기 설계깊이” 등 175건 보완요구
- 2011.4.22 : 서류적합성검토 보완자료 검토결과 제출
 - 6차례에 걸쳐 제출된 보완자료 검토를 통해 심사 착수에 적합한 서류 수준 확
보 [보완자료 최종 제출일 :2011.4.15]
- 심사계획에 따른 2차례 질의/답변
 - [1차 질의/답변] 932개 질의 송부(‘11.4.29) → 1차 답변 접수(‘11.5.31)
 - 답변 70건 중 27개 질의를 제외한 나머지에 대해 10차례(‘11.6.30~8.31)에 걸쳐 답변 제출
 - [2차 질의/답변] 490개 질의 송부(‘11.7.29) → 2차 답변 접수(‘11.9.1)

심사 경위

- 2011.10.20 - 12.29 : 추가질의 발생
 - 중대사고해석 재수행
 - 2차 답변 불만족
- 2012.2.2 : 현안 위주의 해결방안에 대한 타당성 검토
 - 2011. 12.23 일자 로 최종 제시된 17개의 현안
 - 중대사고 해석결과 재질의 등
 - 후쿠시마원전사고 후속이행조치

주요 현안

- 안전해석코드(TASS/SMR-S) 검증 미완료
- 단일제어봉인출 사건 등급 분류
- **사고선량평가시 적용한 선량환산인자 적합성**
- 출력준위별 열적여유도 가정에 의한 사고해석 미수행
- MSRB 사고해석시 비보수적 가정 사용
- 노심감시계통 운전불능시 조치사항에 대한 기술지침서 내용 부적절

- 장주기 고려한 LRS 방사선원향 재평가
- ALARA 개념의 설계 적용, 원자로해체를 고려한 설계 미수행
- 액체방사성폐기물 수집탱크 설계 용량
- 방사성폐기물 계통에 대한 안전등급 미분류
- 방사성폐차폐설계 부적합
- CV 공기중 방사선감시기 검출능력 미입증
- 방사성 유출물 자동차단을 위한 멤퍼 미설치

- 터빈건물 설계내용 미제시
- 비상운전절차서 작성계획서 미흡
- 중대사고 대처설계 자료 미흡

- **적기에 사용 전산코드 적용성 입증**
- **안전성관련 요건 인가 신청 6개월이전**
- **현행 규제요건 이해**
- **신규원전에 기존 설계방법론에 대한 적용성**
- **표준설계의 설계 범위 및 깊이**

심사 현황(3/3)

□ 후쿠시마 사고관련 국내점검결과에 대한 SMART 적용(안) 검토

○ 기술적인 부분은 대부분은 해결된 사항으로 검토 (심사보고서에 반영예정)

▪ **지진** : 자동지진정지계통 도입, 주제어실의 내진성능 개선

▪ 필수기기 생존 : **이동형 발전차량 및 축전지**

방수문 및 방수형 배수펌프 설치 등 확보

▪ **냉각 능력 확보** : 사용후핵연료저장조 냉각기능 상실시 대책 확보

원자로 비상냉각수 외부 주입 유로 설치

▪ 격납건물 건전성 : 피동형 수소제거 설비 설치,

격납건물 배기 또는 감압설비 설치

SMART -P 주요현안(1/3)

□ 가동중검사(ISI) 방안에 대한 설계 미흡

○ 안전관련 기기/부품들 중 원자로용기 용접부, 가압기 상부 환형밀봉체, 제어봉구동장치 노즐, SG 나선형 전열관 등은 접근성이 확보되지 않아 ISI 이행 방안 미비

□ 증기발생기 재료 특성 및 건전성 입증 자료 불충분

○ 증기발생기(SG) 전열관, 증기 및 급수 헤더 등에 사용되는 PT7M 및 PT3V의 기계적 물성치, 부식특성 등 재료특성 spec.이 미확인

□ 비상노심냉각계통(ECCS)의 성능기준 만족여부

○ 사각형 금속연료 채택에 따른 기존 PWR의 ECCS 성능기준(최대 피복재 온도, 최대 산화율 및 최대 수소 생성율)대체적용기준(노심 비노출)의 보수성검증 미흡

□ 사고해석 코드 및 핵설계코드 검증

○ 냉각재상실사고의 평가모델 및 TASS/SMR 해석 코드 적합성 제시 미흡

○ 노물리변수 실측자료 미확보, HELIOS/MASTER 코드 계산결과의 정확도 미확인

SMART -P 주요현안(2/3)

- 냉각재상실사고 파단 스펙트럼
 - 원자로 압력용기 상부에 SI 배관 및 계측배관 등 60여 개의 배관이 조밀배치
 - 비산물 및 배관 파단시 동적효과 등에 의하여 인접배관의 다중파손 가능성
 - 이를 예방할 수 있도록 배관을 설계하거나, 다중파단 스펙트럼 분석을 통해 안전성을 입증함.
- 봉산수를 대체할 반응도 제어계통의 미비
 - 다수의 제어봉이 고착되는 설계기준초과사건에서 봉산수주입으로 미임계를 유지할 수 있도록 설계되어 있으나, 기기만 안전등급이고 봉산수주입계통 자체는 비안전등급으로 설계
- 방사선원향과 방사선결말분석

SMART -P 주요현안(3/3)

- 계측제어계통의 입증 기술에 관한 요건 만족 여부
 - 원자로 계측제어계통의 소프트웨어, 하드웨어 Platform, 통신망 설계 등에 적용되는 새로운 기술들의 사전 입증 필요
- 핵연료 결함률 등 차폐선원향 계산에 적용된 가정과 방법
 - 차폐선원향 계산에 적용되는 핵연료손상을 0.25% [상용원전 적용] 적용성 제시 및 차폐선원향 계산방법 제시 필요
 - 방사선원향으로서 별도 계산되어 반영되어야 하는 부식생성핵종, 삼중 수소, C-14의 방사능 농도값에 대한 평가내용 미흡
- 중대사고완화 설비배제근거
 - 수소제어설비를 제외한 중대사고 완화설비에 대한 설계 배제 근거



맺음말

맺음말

- 원자로 개발자의 경우를 고려한 표준설계인가 범위
 - 현행 규정은 터빈/발전기를 포함한 발전소 전반적인 설계 포함
 - 표준설계안전성분석보고서의 경우 FSAR에 기재하여야 하는 사항과 동일
- SSAR 14장 초기시험과 설계,시공,성능 검증계획(ITAAC)간의 상관관계 재정립 필요
 - 통합인허가 고려
- 안전성에 중요한 항목에 대해서는 신청일 기준 6개월전 시점의 기준을 적용하도록 명시
 - 산업기술기준 등은 코드적용일(code cutoff date) 적용

□ 설계의 완성도 확보 필요

- 신 개념의 설계도입의 경우 전산코드 및 기기 성능 검증 인허가 신청 전에 입증 완료 제출
- 인허가 제출서류 완성도 확보

□ 규제기술개발 결과에 대한 적기에 후속조치 필요

- 법제화 필요사항, 기술기준 및 지침의 개발

□ 소형원자로의 2차 계통 설계에 대한 기술기준 정립

- 기존 상용원전의 설계 적용성 고려 등

소형모듈원전 개발취지

권병훈(MKE)



2012.05.16

권 병 훈



- 발표 순서 -



I

원자력 기술 현실과 선택

II

SMR 정의 및 개발현황

III

SMR 시장 및 기업현황

IV

SMR 개발목표 및 전략



에너지산업의 현재와 미래

환경위기와 자원위기 동시 직면으로 비 화석 에너지 수요 확대 전망

- 에너지 다소비체제 지속 시 기후변화에 따른 경제손실 : 매년 세계 GDP의 5~20%
- 화석연료 중심의 현 에너지 소비구조는 자원고갈을 가속화하고 기후변화 위기 초래
- 비 화석연료인 원자력 발전 중요성 부각 : '30년 490기 신규 건설 (약 2,900조원 추정)
- * 원자력에너지는 IEA Blue Map Scenario상 CO2 감축 기여도 6%

원전분야 범 국가적 경쟁 치열

- 기후변화 대응의 현실적 대안으로 원자력 산업에 대한 정부정책지원 강화

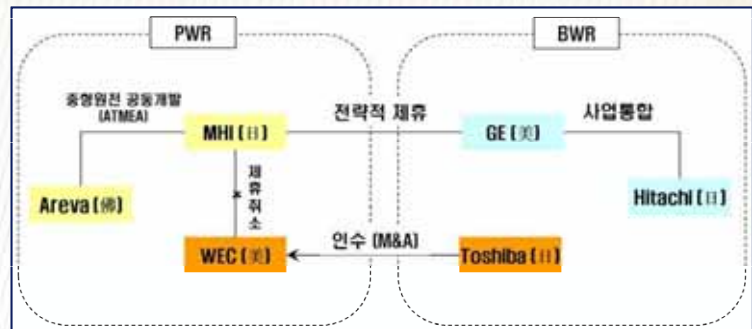
* (일본) 원자력 국제협력추진실 신설 ('09. 4)

(미국) 원전수출 전담조직 신설 ('09. 10)

원자력산업구조 개편 ('10. 4)

(한국) 원자력수출진흥과 신설 ('10. 3)

- 원전 선진기업간 제휴·통합으로 시장장악력 확대 경쟁중



1



원전산업 트렌드 및 비즈니스 환경

SMR이 원자력 이슈로 부각

- 기후변화의 유력한 대응으로 원자력산업에 대한 기대 및 다목적 SMR 최대 이슈로 부각

메가 트렌드	메가 트렌드	사회·문화 트렌드	소비자 트렌드	제품 트렌드
지속 가능한 발전을 위한 원자력의 역할 필요	지구 온난화/물부족 인식 확산	후쿠시마사고 이후 원자력에 대한 안전 요구 강화	발전사/민간 부문은 초기투자비용 절감, 비발전원자력 기술 요구	사용후 연료처리, SMR이 원자력계 최대 이슈로 대두
지속가능 발전 강조	탄소세 대두	재해방어 /피동냉각 기술 부각	초기투자비가 적은 원전 고려	다목적 SMR

대형 원전 Plant

- KEPCO(한), WEC/GE(미), Areva(프), MHI/Hitachi/Toshiba(일), AtomStroyExport(러) 등 전통적 강자들만의 공급자 시장 형성
- 일본, 독일, 스위스, 이탈리아 등 원전축소 정책 국가 등장

중소형 원전 Plant

- 시장 조기진입 통한 시장 지배력 강화를 위한 Time-to-Market 전략 필요
- Most promising areas is SMR. Develop these technologies or import them tomorrow. – Steven Chu
- 안전확보측면에서 대형 원전보다 유리할 수 있어 시장 확대 예상

2



우리의 현실

정부의 노력이 계속되고 있는바 시장 추가진입에 대한 준비 필요

국가 계획

- 제1차 국가에너지기본계획(2008~2030)
원전비중(설비기준) 확대 : ('06) 26% → ('30) 41%
- '원전기술 국가로드맵(Nu-Tech 2012, 2015, 2030)'
비전 : 세계 3대 원전 수출국 달성
* (교육과학기술부) 제4차 원자력진흥종합계획('12~'16) 수립 중

- 그러나, 다양한 시장수요에 대비한 'Customized Design 능력' 확보 필요
* 수출형 원전은 APR-1400, APR-1000 등 발전용 대용량에 편중
- 전 주기적 원전 공급능력 중 폐로 등 후행 분야 역량 및 인프라 부족
* 선행핵주기 - 설계 - 건설 - 운영 - 폐로 - 후행핵주기

3



우리의 선택

원전수출의 선순환 고리를 유지하기 위해 다목적 소형원전 개발 및 수출 상품화 필요

- 대형 원전으로는 중소형 그리드 보유 수요국 요구 및 원자력에너지 신규 수요 대응 한계
- 원자력발전의 고유 문제인 사용후핵연료 처리 및 핵비확산 저항성 확보 방안 마련 필요
- 시장 경쟁력 확보를 위해서는 비교적 경제성 확보에 유리한 Modular 형태 소형 원전 개발 필요

SMR (Small Modular Reactor) 시장 (WNA, IAEA)

- 2030년까지 SMR 시장 수십~수백조원
- 핵비확산/사용후핵연료 대책 등 원자력 에너지의 근본 문제 해결 필요

우리의 강점

- 우수한 인력자원
- 기반기술 확보
- 핵비확산 고유기술

SMR

패러다임 변화

- 대형원전 → SMR
- 장주기 원자로 대두
- 신규 원전 시장 약진
- 공정열 수요 증가

4



SMR(Small Modular Reactor)

→ SMR(소형모듈형원자로)의 정의 및 특징

300 MWe 미만 용량의 모듈 형태로 건설이 가능한 소형 원자력시스템 개발
 [안전성, 경제성을 혁신한 소형모듈형 원전으로 전력 및 열에너지 수요에 대응]

- 안전성을 혁신하여 소비지 인근 설치 가능 (도시인접형)
- 공장제작 및 설치(공사기간 2년 이내)로 건설기간 및 금융비용 부담 해소

소형 모듈형 원자로 (Small Modular Reactor)

완전피동기능 채택으로 안정성 향상 (도시인접형 원전)

공장제작 및 설치로 건설기간의 획기적 단축으로 금융 비용 감소

모듈 형태 건설로 초기투자비용 절감 및 수요 확대에 대응 가능

다목적 활용의 계통 설계 (전기, 공정열, 담수화, 지역난방 등 활용)

화력발전소 교체 수요 대응 및 선박 동력원 적용 가능

개발도상국의 경제 규모에 적합 개도국 신규원전 수요 70% 이상이 중소형 원전



공장제작 설치로 공기 단축



모듈 형태 건설로 금융부담 경감

5

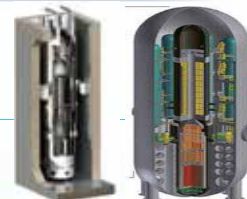


SMR(Small Modular Reactor)

→ 해외 국가별 경수형 SMR 개발 현황

> 미국

- DOE 에서 중소형 원자로를 통해 원자력 산업의 부흥을 위해 활발히 추진 중
 - 향후 5년간 총 25억 달러 투자예정
- 민간 주도의 중소형 신형 원자로 개발로 경수로형에 집중투자
 - mPower, NuScale, 웨스팅하우스 신형 SMR등



> 일본

- 산업계를 중심으로 다양한 용량의 신 개념 중소형경수로 기술개발 추진 중(IMR, MRX, DRX)
- 일본 원자력연구소에서는 최근 도심 지하에 건설하여 냉난방, 온수공급 등을 목적으로 피동형 일체형경수로인 PSRD를 연구 중
 - ※ PSRD(Passively Safe small Reactor for Distributed energy system)



> 러시아

- 지형적 특성으로 인해 중소규모 지역난방 및 전력생산용 원자로 개발에 주목하고 있음
- 반일체형경수로인 KLT-40S(35MWe)를 개발하여 전력생산,해수담수,지역난방에 사용 열병합용 분리형경수로인 VBER - 300을 개발 중임



> 중국

- 건설, 운영 등 일부 분야를 제외하고는 상당히 높은 기술수준에 있음
- 독일과 협력하여 지역난방용 일체형 경수로 NHR-5(5MWt) 및 NHR-200개발, 건설 및 실증 완료
- 국가적 원자력 기술 자립화의 범위에 중소형원자로 기술 개발 포함

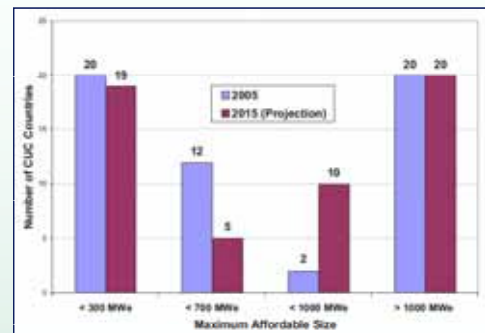
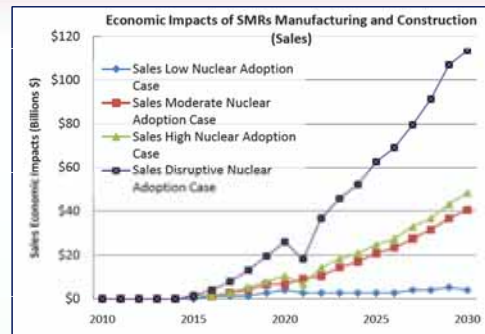
6



SMR 시장

시장 형성 및 성장 예측

- 중소형원전 시장 예측 규모
 - (CREPI) : 400~850 호기
 - (US DOE) : 500~1,000 호기
 - (STEPI/IAEA) : 700 호기 (\$3,500억)
- 미국 내 SMR 시장만도 최대(Disruptive Scenario) '30년 초대 550 호기 (\$1,200억)
 - 고용효과 : 20만 명 예상 (Energy Policy Ins. 10)
- 54개 원전도입 예정인 개도국 중 20개국은 Grid 용량 사정으로 300MW_e 이하만 도입 가능 (2008, IAEA)



7



SMR 경쟁성

원자력 기술의 미래 패러다임 변화

- 대형 GEN-IV 원전은 단기간 내에 가시적 성과 달성 어려움
- 초기투자 비용이 적은 SMR 중심으로 사업자 관심 이동 중
- 선진국도 SMR 개발 및 설계인증 노력 중이나 아직 시장이 형성되지 않음

원자로	공급자	특 성
mPOWER	B&W (미)	400MWt(120MW _e) LWR
NuScale	OSU (미)	150MWt (45MW _e) LWR
4S	Toshiba (일)	30MWt (12MW _e) Underground SFR

우리의 역량 : 세계적 원전운영 경험과 기술인력 보유

- GEN-III 원전의 설계, 기기제작, 운영기술은 Global Top 수준
 - 피동형 설비설계기술은 보유했으나 Global 수준의 개량 및 원전기술 개발은 필요
- 지속적인 소형원전 연구(SMART)를 통한 고급인력과 주요 기술 인프라 보유
- 최근 APR-1400 원전의 미국 NRC 인증 추진으로 글로벌 경쟁력 확대

8



원전 경쟁기업 현황 (대형 원전 Plant)

대형 원전 Plant 공급자 경쟁 심화

- 한국의 UAE 수출로 진출로 경쟁 가속
 - '70~'80년대 : 미국, 러시아, 캐나다가 원전 공급시장 장악
 - '90~년대 : 프랑스, 일본이 주류 공급자 역할 수행
- 현재 시장은 미국과 프랑스가 가장 강자로 평가되나 미국 시장에서 Toshiba, MHI가 약진 중
- 한국은 후발주자이나 원전 산업 Supply Chain은 유리 (과제 : 원전기술/인력부족, 민간 참여 부족)

국내외
대형원전
주요기업
현황

원자로형	공급사	최신 원자로형 (수준)	(MWe)
가압경수로 (PWR)	KEPCO(한)	APR1400(GEN-Ⅲ)	1,400
	WEC(미)	AP1000(GEN-Ⅲ+)	1,100
	Areva(프)	EPR(GEN-Ⅲ)	1,600
	MHI(일)	APWR(GEN-Ⅲ)	1,540/1,700
비등경수로 (BWR)	AtomStroyExport(러)	VVER1000(GEN-Ⅲ)	1,000
	GE(미), Hitachi/Toshiba(일)	ABWR(GEN-Ⅲ)	1,350
	GE(미)	ESBWR(GEN-Ⅲ+)	1,500
가압중수로 (PHWR)	AECL(캐)	CANDU-6(GEN-Ⅱ)	700
		ACR-1000(GEN-Ⅲ)	1,100

9



원전 경쟁기업 현황 (SMR)

아직 시장 형성 안됨

- 학계나 벤처기업 위주로 개발 진행 중이며 아직 시장지배력은 없음
- 가장 앞선 SMART를 위시하여 다양한 노형 개발중

국내외 주요 SMR 개발사 현황

제품	용량 (Mwe)	원자로형	개발사
mPower	125	PWR	Babcock & Wilcox (미국)
NuScale	45	PWR	NuScale Power (미국)
4S	12	SFR	Toshiba (일본)
Hyperion Power Module	25	Liquid-metal Cooled FR	Hyperion Power Generation (미국)
TWR	500~1,200	SFR	TerraPower(미국)
SVBR	75~100	LFR	Gidropress(러)
SMART	100	PWR	한원연

10



국내 SMR 경쟁력

선후행핵주기 기술을 제외한 원전 전분야 공급체계를 보유

- 산업 역량
 - 기기 재료분야에 대한 민간의 참여 의지 확대
 - 수요국 요구에 따른 Customized Design이 요구되며, 용량별 Portfolio 제품 구성 필요
- 기술 역량 : 일부 분야는 국제 경쟁력 보유

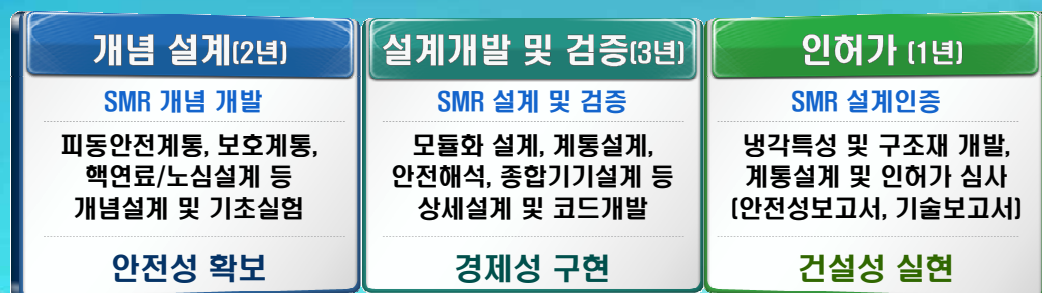
관련기술		최고 국가	기술성숙도
SMR 시스템 설계		한국/미국/일본	기본설계 단계
노심 설계	초장주기 원자로	미국	개념설계 단계
	가스냉각로	미국/독일	기본설계 단계
	경수로	한국/미국/일본/프랑스	기술성숙 단계
피동 안전성 설계		미국/프랑스	기술성숙 단계
핵비확산 재순환 기술		미국	개념설계 단계
고온/장수명 재료		일본	-

· 전문가 의견

11



SMR 개발 목표



원자로 설계기술

핵연료 설계기술

종합플랜트설계기술

인허가

12



기술개발전략

- **국내 강점을 결합해 국제 경쟁력 조기 확보 추진**
 - 산업체 실용화 능력과 연구기관 원전기술개발 능력을 초기단계부터 결합 Time-to-Market 단축
 - 고유 안전성 실현을 최우선 하는 기술개발 추진
(일본 원전사고 원인 분석 후 기획 및 연구단계에 추가 요구 사항 반영)
- **해외 Open Innovation**
 - 원전기기 제작 능력, 우수한 Supply Chain 등의 국내 우위분야와
 - 해외 기관 선도 분야 결합 ▶ 해외 진출 장벽 사전 제거

사업화전략

- **대형 원전과 동반 수출 ▶ 원전 수출 선순환 고리**
 - 기반 취약 국가의 경우, 소형 모듈 원전 선행 진출하여 대형 원전의 교두보 확보
 - 대형원전 해외 진출 시, 소형 모듈원전과 함께 Package Deal (열 공급 등 다목적)
- **에너지원의 Green화를 위한 신시장 창출**
 - 소형화, 안전성 혁신으로 열수요, 노후 화력발전 대체 등 신수요 창출

감사합니다!

소형모듈원전 세계현황 및 개발방향

백세진(KEPCO E&C)

소형모듈원전 세계현황 및 개발방향

중소형원전 추진현황 및 쟁점 워크숍
한국원자력학회 2012. 5. 16.

백 세 진

(sjbaik@kepco-enc.com)

한국전력기술



- 발표 순서 -

- ➔ 1. SMR 요
- ➔ 2. SMR 발 동향
- ➔ 3. SMR 기술 특징
- ➔ 4. 미국 SMR 발 현황
- ➔ 5. 국내 SMR 발
- ➔ 6. 결론

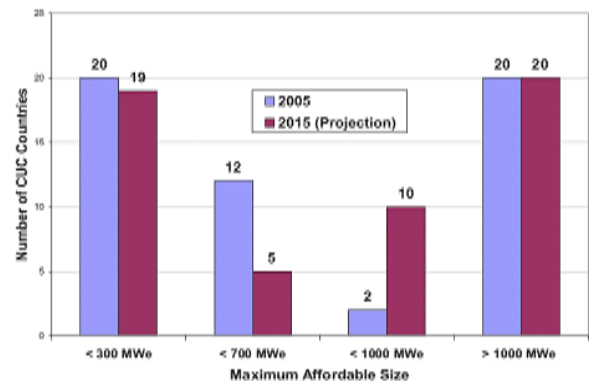


1. Small Modular Reactor(SMR) 개요

→ **SMR : 300 MWe 미만 용량의 모듈 형태로 건설이 가능한 소형 원자로**

> 경제성/시장

- 초기투자비 경감 : 금융비용/건설비 최소화
 - 설비 단순화/소형화/모듈화, 건설공기 단축
- 소규모 전력생산
 - 내륙/도서 독립전원, 소규모 전력망
 - 개발도상국 원전도입에 적합
- 다양한 용도
 - 발전, 공정열, 지역난방, 해양활용 등
 - 노후 화력발전소 대체
- 중소형원전 시장
 - 2050년까지 최대 500-1000기 예상



> 안전성/기타

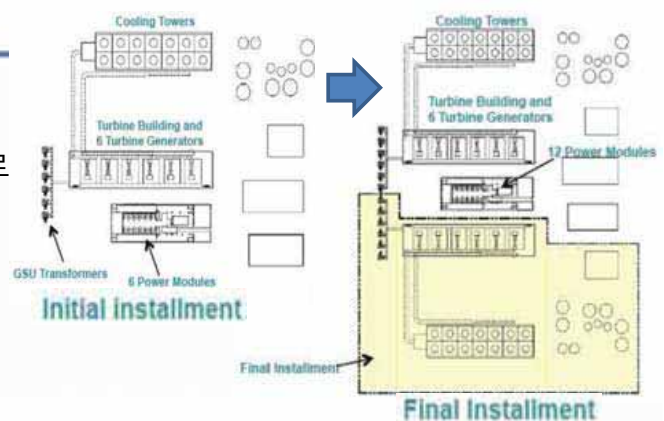
- 완전피동 안전성 : 완전전원상실 대비 설계
- 핵비확산성 증진
- GEN-IV 원전의 단기간 내 상용화 어려움

1. SMR 개요

→ **SMR 주요 특성**

> 모듈화 설계개념

- 모듈형 단위 원자로의 조합 배치로 용량 결정
- 건설공기 단축, 표준화 기기 공급/조립/정비로 투자비용과 유지비용 절감



> 격납 건물 지하화

- 중대사고 시 입자 방사성물질 포집 유리
- 외부위협 대비 방어설계 유리
- 격납건물 최소화 및 설비단순화로 경제성 확보



1. SMR 개요

→ SMR 주요 특성

> 안전성 강화

- 완전피동 안전개념 도입
- 중력, 자연순환 등 피동력에 의한 안전성/신뢰성 증진



> 기기제작성 및 운송성 향상

- 기기 내장화로 일체화 설계 및 제작
- 트레일러나 기차 등으로 이송 가능

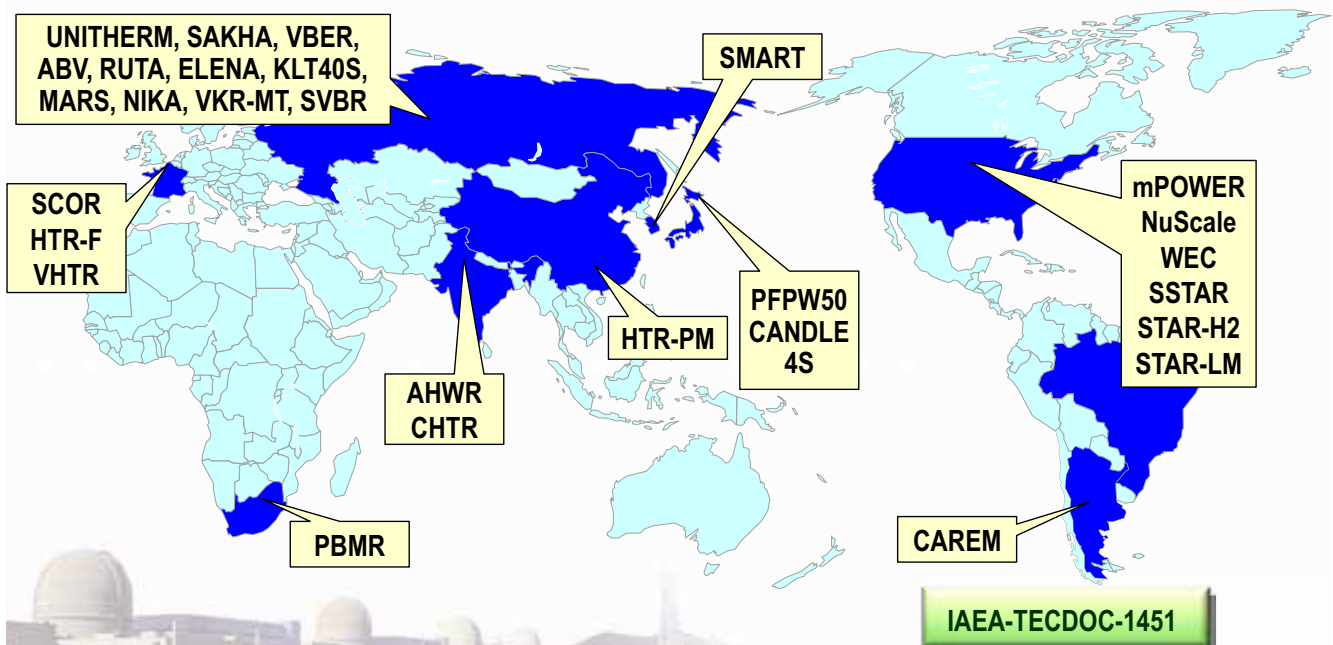


2012.5.16 원자력학회 워크숍

5

2. SMR 개발 동향

→ SMR 개발 경쟁



2012.5.16 원자력학회 워크숍

6

2. SMR 개발 동향

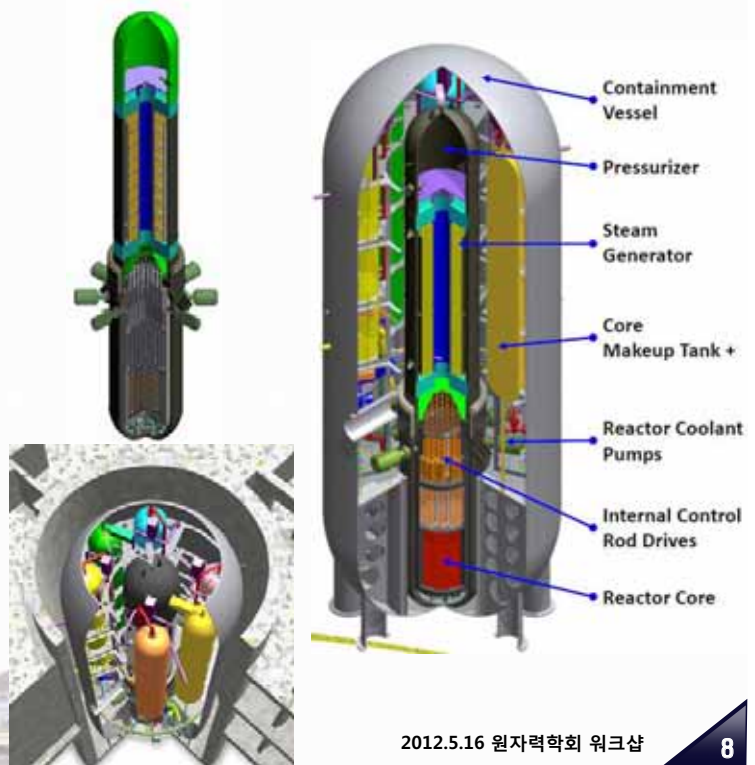
→ 주요 SMR 제원

Type	LWR				HTGCR	LMR	
	WEC-200	mPower	NuScale	SMART	GT-MHR S+MHR	4S L-4S	TWR
Design							
Company	Westinghouse	Babcock & Wilcox	NuScale Power Inc.	KAERI	General Atomics	Toshiba	TerraPower
MWe	225	180	45	100	285 (GT) 56 (SC)	10	a few hundred ~ 1000
Coolant	LW	LW	LW	LW	He	Sodium (4S) Pb-Bi (L-4S)	sodium
Fuel	Westinghouse Standard Fuel	standard 5% fuel	17x17 4.95% UO ₂	UO ₂	102 hexagonal column of graphite block	19.9% U-10%Zr or U-24%Pu-Zr	NU or DU with hexagonal pillars
Refueling term	2	5	2	3	1.5	10 ~ 30	> 50
Neutron Spectrum	thermal	thermal	thermal	thermal	thermal	fast	fast
Modular	integral	integral	modular	integral	modular	modular	
Safety	passive safety system	passive safety system	natural circulation	partially passive	passive safety	passive safety & EM pump	
Purposes	전력	전력, 담수, 지역난방	전력	전력, 담수, 지역난방	공정열, 수소생산	담수, 수소생산	전력
Status	AP1000 기술 응용 개 발 착수	Pre-Application stage for DCD	Pre-Application stage for DCD	Under licensing review for DC	GT-MHR: 예비설계 완료 및 2001 이후 진 척없음 SC-MHR: 2010 부터 NGNP로 개발 중	pre-application NRC review is under way. Galena(AK) supports	도시배에 500MWe (대 로 개발계획(2010)
WHEN	near-term	near-term	near-term	near-term	longer-term	longer-term	longer-term +
Others		replace entire core as a single cartridge			1/2 core replace every 18M for GT- MHR.		candle reactor, relatively large(low- density core)

2. SMR 개발 동향

→ WEC SMR (1/2)

- ◆ AP1000 기술 활용
- ◆ 800 MWt / 225 MWe
- ◆ 재장전주기 : 2 년
 - <5% enriched
 - Soluble boron
- ◆ RCPs : 총 8개
 - External, horizontal, **sealless**
 - Variable speed
- ◆ Integral pressurizer
 - Steam
 - Spray line : from CMT connection
- ◆ In-vessel CEDMs
- ◆ Containment vessel
 - Inside: Vacuum
 - Outside: Annulus **flooded**

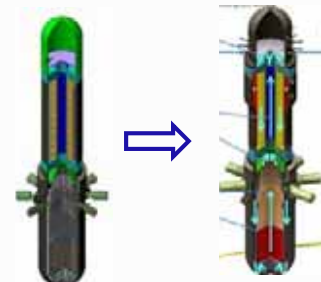
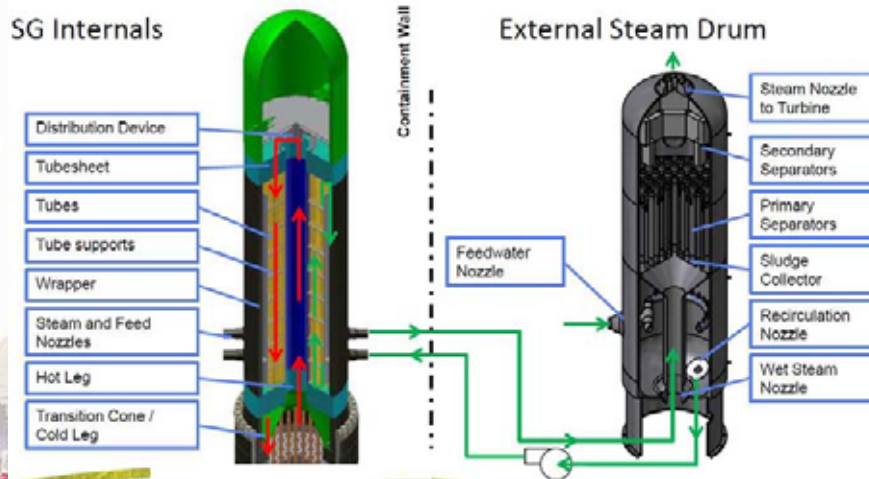


2. SMR 개발 동향

→ WEC SMR (2/2)

◆ Steam Generator

- Recirculation / Straight tubes
- Saturated steam
- External steam drum
 - ✓ Recirculation pump required



~2011

2012

<설계변경>

2012.5.16 원자력학회 워크샵

9

2. SMR 개발 동향

→ mPower - B&W (1/2)

◆ Generation mPower, LLC (B&W+Bechtel)

◆ 530 MWt

- 155 MWe (Air-cooled condenser)
- 180 MWe (Water-cooled condenser)

◆ 4 yr refueling

- 4.95% enriched
- No soluble boron

◆ RCPs : 8 in total

- External, vertical, sealless

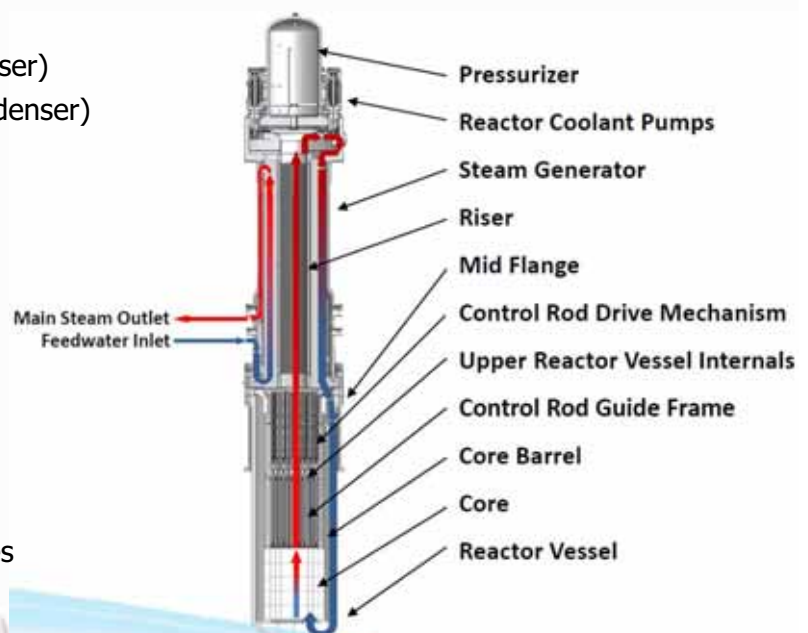
◆ Integral pressurizer

- Steam

◆ In-vessel CEDMs

◆ SG

- Once-through / Straight tubes
- Super heated steam



2012.5.16 원자력학회 워크샵

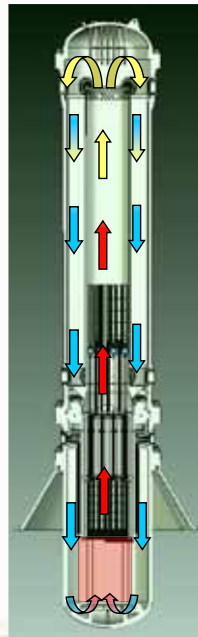
10

2. SMR 개발 동향

→ mPower -B&W (2/2)

~2010

- 500 MWt / 125 MWe
- 5-yr refueling @ <5% en.
 - ✓ 10 yrs @ <10% en.
- RCPs
 - ✓ Internal motor
 - ✓ in the downcomer



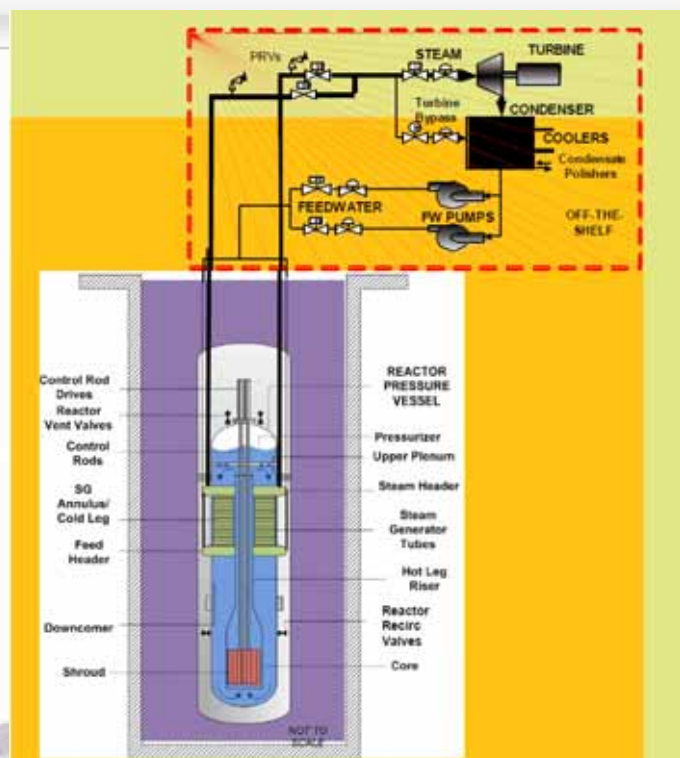
2011 ~

- 530 MWt / 155 or 180 MWe
- 4-yr refueling @ 4.95% en.
- RCPs
 - ✓ External motor
 - ✓ on the head
- Pressurizer, SG, etc.

2. SMR 개발 동향

→ NuScale Power (1/2)

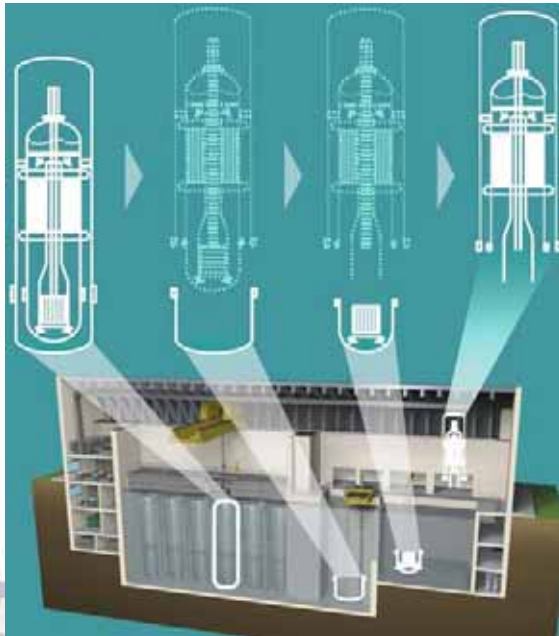
- ◆ 160 MWt / 45 MWe
- ◆ 2 yr refueling
 - 4.95% enriched
 - Soluble boron
- ◆ No RCP
 - Natural circulation
- ◆ Integral pressurizer
 - Steam
- ◆ SG
 - Helical tubes / Once-through
 - Super heated steam
- ◆ Containment vessel
 - Inside: Vacuum
 - Outside: Water-filled pool



2. SMR 개발 동향

→ NuScale Power (2/2)

◆ Refueling process



KEPCO E&C



2012.5.16 원자력학회 워크숍

13

2. SMR 개발 동향

→ 기타 SMR



KLT-40 (35MWe), 러시아



FLEXBLUE (50-250MWe), 프랑스

KEPCO E&C

2012.5.16 원자력학회 워크숍

14

3. SMR 기술 특징

→ 원자로 차별화 기술

●출력 및 RCP

- 자연순환 출력운전 : RCP 제거 및 설계단순화, 열적 관성증대(냉각재용량비 증대)
✓제약: 저장정, 출력제한, 출력/유량변동에 따른 불안전성

●잔열 및 격납용기대기 냉각

- 피동안전계통, 다양성확보
- 최종열침원 : 해수/ 대기

●가압기

- 증기 : 살수, 가열기 필요
- 질소 : 질소 온도 제어, 냉각재와의 단열/냉각 필요
- 질소/증기 : 질소 분압 제어

●CEDM

- 내장형 : 모듈화/최적배치설계 가능. 내환경 검증 필요

●핵연료/노심

- 3-5년 장주기, 무봉산운전(설계단순화 가능, 운전성/인허가성 검토필요)

3. SMR 기술 특징

→ 원자로 차별화 기술

●증기발생기

▪일관 (once-through) 형 SG

- 과열 증기 : 단상대류-핵비등-막비등-과열증기
- 습분분리기/건조기 불필요
- 열효율 향상

▪재순환 (recirculation) 형 SG

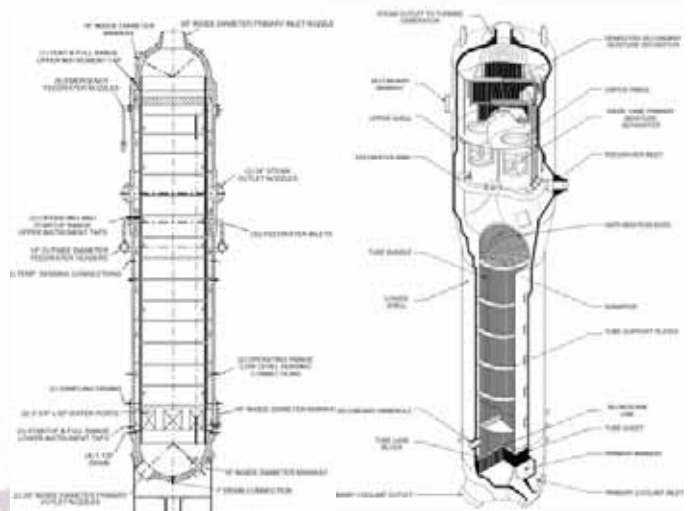
- 포화 증기 : 단상대류-핵비등
- 과도 상태 흡수 유리
- 전열관 재질 건전성 유리

▪직관(Straight) 형 전열관

- 낮은 압력 손실
- 정비 용이

▪나선 (Helical) 형 전열관

- 열응력 흡수 유리

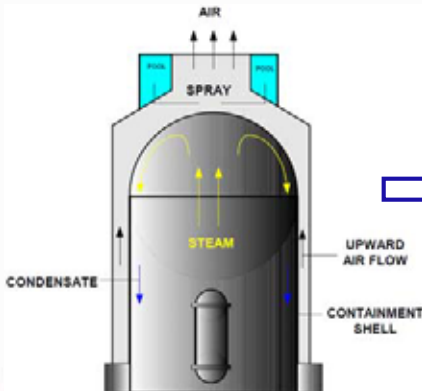


3. SMR 기술 특징

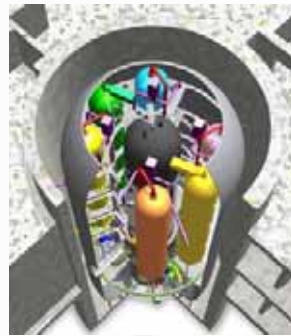
→ 원자로 차별화 기술

● Safe Guard Vessel / Containment Vessel

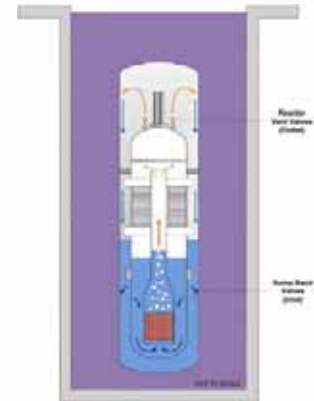
- 고압 용기 : 3.1 MPa (NuScale) vs. 0.4MPa (대형 PWR)
- 진공 단열 : 증기응축 열전달 향상, 단열재 불필요
 - 외벽냉각 시 방사능외부누출 가능성 논란



AP1000



WEC-SMR



NuScale

4. 미국 SMR 개발 현황

→ US DOE SMR 지원 프로그램

● SMR 프로그램

- 설계인증/인허가 지원 (건설지원 아님)
- M\$452 / 5년 : 50% 사기업 부담. 총 9억\$/5년
- 2개 SMR 선정/지원 예정
 - ✓ WEC-Ameren Missouri 사 공동대처: Callaway 부지 건설 추진
 - ✓ NuScale-NuHub사 공동협력 : SC주 Savannah River 부지 건설 추진
 - ✓ mPower 신청 예정
- 후쿠시마 사고를 반영한 안전성 강화 설계

● 평가항목

- 상용화까지의 투자금액
- 전력생산자에게 충분한 시장성 제공여부
- 건설비용



4. 미국 SMR 개발 현황

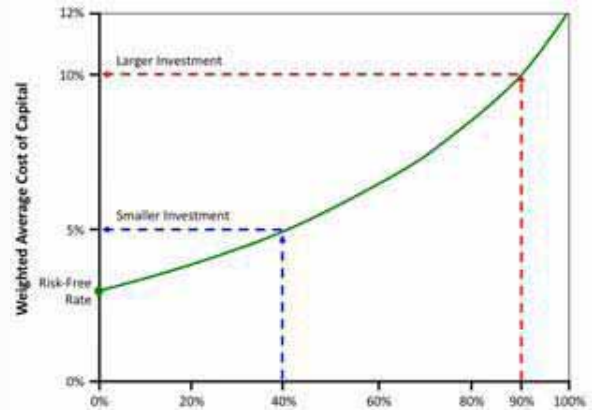
→ 미국 시장 현황

● 원자력 발전회사 현황(평균)

- 연간예산 : B\$ 13 /년
- 부채 : B\$ 14
- 자산 : B\$ 41
- 시장자본 : B\$ 19

- 약 B\$ 10 규모의 대형원전 건설은 현실적으로 어려움
- 첫호기는 화력발전보다 비싸지만, 다수호기 건설에 따라 **학습효과** 및 **공장 제작/조립**으로 화력보다 저렴 예상

- SMR 시장을 낙관적으로 전망
- **DOD 관심 증대** : 전력, 담수, 공정열, 합성제트연료



Cost of Project, Divided by Size of Firm (\$13 Billion)

Rosner and Goldberg, "Small Modular Reactors – key to Future Nuclear Power Generation in the U.S." Nov. 2011

4. 미국 SMR 개발 현황

→ 일체형원자로(iPWR) 관련 US-NRC 수행 업무

- 현 규제요건/지침 변경 필요성 검토
- 중요 정책 및 기술 현안 도출
- 인허가계획 개발
 - NRC 평가도구/기술 R&D
 - 규제, 정책 및 지침의 변경
 - 신기술에 대한 전문성 확보

4. 미국 SMR 개발 현황

→ US-NRC 정책 및 기술 현안

• License

- 개별설비/ 주설비 및 모듈개별원자로/ 개별원자로모듈

• Source Term

- 공용설비를 포함한 다모듈 SMR

• Emergency Planning

- EPZ 크기, 소내/외 EP 범위, 직원수, 경고/통지요건 등

• Control Room Staffing

- 한 개의 제어실에서 다 모듈 운전가능성/다모듈설계 계획
- 운전원수 관련 현재 규정 개정 필요 : 10CFR50.54(m) (면제지침: NUREG-1791)

• Physical Security :보안요원수, 보호구역크기 등

• Operational Program : 장주기 ISI/IST

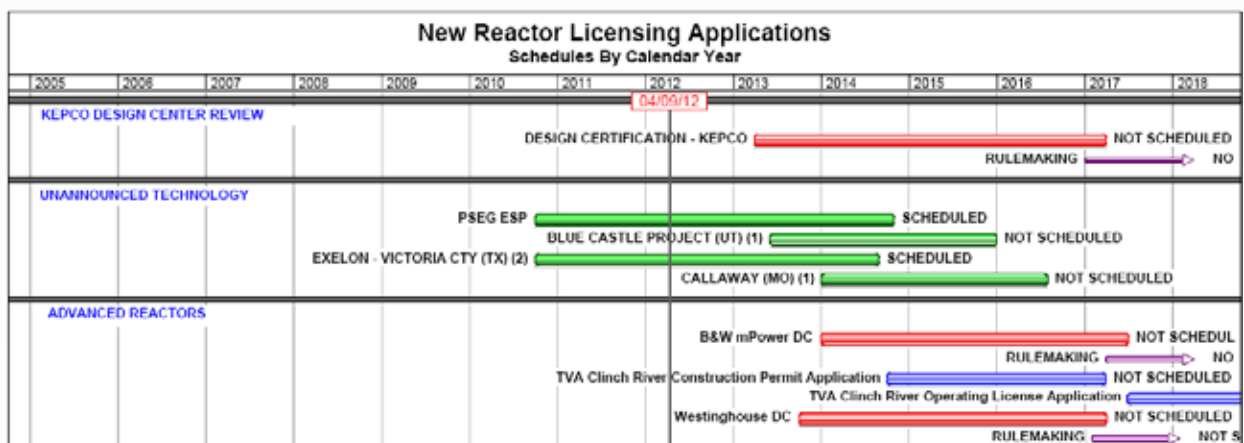
• Process Heat Applications/Nearby Facilities

• Containment Functional Requirements

• Modular Units/Expandable Site

4. 미국 SMR 개발 현황

→ 미국 NRC-DC 계획



5. 국내 SMR 개발

→ 상위 요건(안)

- **일체형/모듈형** : 일체형 원자로, 모듈 조합으로 출력 증대
- **설계 개념** : 모듈화, 설계 단순화, 충분한 설계여유도, 입증된 기술, 인간공학 기반
- **면진/내진설계 및 지하격납건물**
- **고유/피동 안전성 확보**
 - 완전 피동 설계 : 운전원 개입없이 원자로정지 및 안전정지 유지
 - 완전전원상실사고 : 장기간 안전정지 유지 가능
 - 피동 잔열제거(비상시): 일차측/이차측 피동 냉각
- **핵연료재장전 장-초장주기**
 - 재장전 주기 5년, 핵연료 농축도 5% 이하
- **완전 자동제어운전** : 운전원 개입 최소화
- **부하추종운전**
- **정비/검사/진단 용이성**
- **공장 제작/조립 및 육상 운송** : 건설기간 2년 이내

5. 국내 SMR 개발

→ 국내 원전기술 현황

- **원전기술도입 및 자립**
 - 원자로계통설계, 핵연료, 기기제작/공급, 종합설계, (실험/시험검증/연구) 등 기관별 역할 분리
 - 원전건설기술 확보를 위한 효율적 전략
 - 기술도입에 의한 원전설계/건설 기술 확보
- **역설계(reverse engineering)에 의한 기술 습득**
 - 원전건설 복제기술 및 개선기술 확보
 - ✓ 영광34호기 이후 OPR1000 건설
 - ✓ SYS80+ 기반의 APR1400 개발/건설
- **Nu-Tech 2012 프로그램**
 - 설계/안전해석 전산코드, MMIS, RCP 국산화
 - APR+ 고유노형 개발 : 2-loop, 1500MWe, 다수 설계 개선 적용



5. 국내 SMR 개발

→ 국내 원자로 개발 여건

● 개발 조직 및 인력

- NSSS설계/핵연료설계/A/E설계/기기개발/제작/검증/시공/운전/정비 등의 긴밀한 기술연계 및 통합개발 어려움
- 원전운영자 : 원자로모델 개발 주도 및 소유권 보유
- 설계사 : 건설사업 및 가동원전지원 업무 증대/ 설계인력 부족, 신노형 개발 여건/의지 부족
- 신노형개발 경험/인력/기술 부족

● 설계를 지원하는 연구/개발 체계 미흡

● 신기술/신노형 개발 제약

- 신노형개발 통합조직 구성 및 인력확보 어려움
- 기초/기반기술 부족으로 선도적 독자개발 어려움
- 신규제기술 선도적 개발 어려움

5. 국내 SMR 개발

→ SMR 개발 전략(1/3)

● 개발조직 : 모든 기술분야 통합관리 필요

● SMR 개발 신규 업무 도출

- 원자로모듈화 및 모듈건설설계, Nuclear/Turbine Island 설계
- 기기개발 : 원자로 용기 및 내부구조물, RCP, 내장형 CEDM, SG 등
- 시험 :
 - ✓ 기기시험 : RCP, CEDM, Fuel(열적/기계적건전성) 등
 - ✓ 종합시험 : 원자로냉각특성, 증기발생기특성, LOCA, 가압기 성능, 원자로제어성능등

● 목표시장 설정 : 단위모듈/설비 용량 결정/유연성 확보

● 미보유기술 확보대책 조기마련 :국내개발/해외기술도입

● 국제공동개발 : 수출시장 확보

● 미국 SMR 기술/규제 개발현황 참조 : 시장진입 시차 최소화

5. 국내 SMR 개발

→ SMR 개발 전략(2/3)

● 모듈화 기기 설계/제작 및 건설

- 모듈화와 점유면적 간의 긴밀한 연계협력 필요
- 많은 연계에 대한 통합관리 필요 : 설계여유도 최적화
- 기기/배치 공간 최소화와 정비 공간 간의 최적화
- 기기/모듈/계통 현장시험 최소화

● NI/TI 설계 및 건설

- Island 별 관리 : 공장제작/조립, 모듈건설성 최대구현, 현장제작 최소화
- 건설공기 단축 : 종합관리 팀구성 (시공, 설계, 구매, 계약, 사업관리 등)



2012.5.16 원자력학회 워크샵

27

5. 국내 SMR 개발

→ SMR 개발 전략(3/3)

● 기술개발전략

- 인허가 불확실성 최소화 : 현 규제요건 최대한 만족, 신규제기술 조기개발
- 기입증기술 최대한 활용 : 기기, 핵연료 등
- 입증시험 최소화 : 기기, 계통, 구조물
- 안전성 향상 : 완전피동안전계통, 다양성/다중성 확보
- 모듈원자로 및 공간최적화 구현 : 동시공학, 설계정보 database 유지/활용
- 요건관리 및 단계별 검증 : 체계공학 적용
- 기기 제작성 /건설성 확보
- 건설기간 단축 : NI/TI의 모듈화 건설
- 경제성 확보 : 건설비, 운영비, 폐로 등 수명주기비용 최소화



2012.5.16 원자력학회 워크샵

28

5. 국내 SMR 개발

→ 경수로 SMR 개발계획

● 추진현황 및 계획

- 미래산업선도기술 개발사업 신시장창출 6개 과제에 소형원자로 선정 : 지식경제 R&D 전략기획단, 2011/3
- 소형원자로 기획 추진, 2011년 하반기 R&D 예타 진행사업 탈락: 2011.7
- 노형별 경쟁기획
 - 경수로, 고온가스냉각로, 납냉각로 경쟁
 - 기획평가 결과 경수로 SMR 선정 : 2011년 11월15일
- 기술성 평가 (국과위) : 2011년 12월 - 2012년 2월
- 2012년 상반기 R&D 예타 진행대상사업 선정 탈락 : 2012년 3월
- 2012년 하반기 R&D 예타 재신청 예정 : 2012/7
- 개발계획(안) 순연
 - 2014-15 : 개념설계(2년)
 - 2016-18 : 상세설계(3년)
 - 2019- : 인허가

6. 결론

- SMR 세계시장 2020년경부터 활성화 예상
- SMR 개발 전담 통합조직 구성 필요
- 2020년 시장 진입을 위한 총력 개발 필요
- 정부/관련기관의 적극적인 지원/협력 필요

소형모듈원전 상위레벨
안전요건

노명섭(KINGS)

소형모듈원전(SMR) 상위레벨 안전요건

KNS 2012 춘계학술 발표회

2012. 5.16

노명섭



1

- 발표 순서 -

- ➔ 1. 소형 모듈형 원자로 정의 및 특징
- ➔ 2. 소형 모듈형 원자로 핵심 기술
- ➔ 3. 국내외 개발 동향
- ➔ 4. 소형 모듈형 원자로 주요 설계 특성
- ➔ 5. 소형 모듈형 원자로 상위레벨 설계 요건
- ➔ 6. 결 론

2

1. SMR(소형모듈형원자로)의 정의 및 특징

> SMR의 정의(IAEA TECTOC)

- 300 MWe 미만 용량으로 경제성 확보를 위해 Modular 형태로 건설 가능한 소형원전
(노형은 경수로, 가스냉각로, 액체 금속로 등 포함)

> SMR 특징

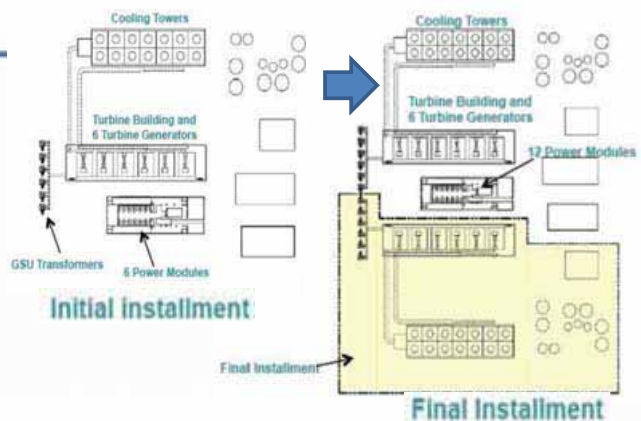
- 완전피동기능 채택으로 안전성 향상(도시 친화형 원전)
- 공장제작 및 설치로 건설기간이 획기적으로 단축되어 금융비용 감소
- 모듈의 반복, 대량생산으로 비용절감가능
- 개발도상국의 경제규모에 적합
- 인구분산국가를 위한 분산전원

3

2. SMR 핵심 기술

> 모듈화 설계개념

- 원하는 용량이 되도록 모듈형 단위 원자로를 배치하는 방식
- 건설공기 단축, 표준화된 기기 공급, 조립 및 유지보수로 투자비용과 유지비용 절감



> 격납 건물 지하화

- 중대사고 시 입자형태의 방사성물질 포집에 유리한 지하 격납건물 방식 추진
- 외부위험 대비 방어설계 가능
- 격납건물최소화 및 설비단순화로 경제성 확보

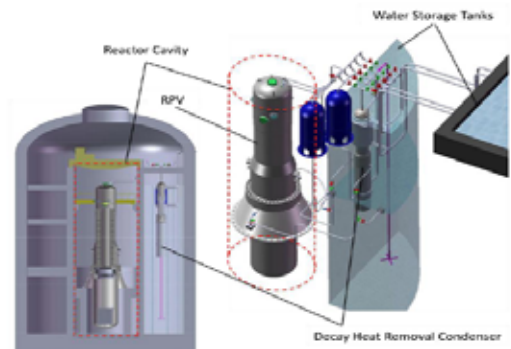


4

2. SMR 핵심 기술

> 안전성 강화 기술(완전피동)

- 완전피동 안전개념을 도입
- 중력, 자연순환 등 피동력에 의해 계통을 작동시켜 안전성 및 신뢰성을 증진



> 기기제작성 및 운송성 향상

- 기기 내장화에 따른 일체화 설계 및 제작
- 공장에서 제작 설비들을 각종 트레일러나 기차 등으로 이송 가능하게 제작



2. SMR 핵심 기술

→ 기술개발 목표

> 50 MWe 용량의 소형 모듈형 경수로 설계 개발

- 완전 피동안전 적용, 면진설계 등 안전성을 대폭 혁신한 원자로
- 공장제작 및 설치(공사기간 2년 이내)로 건설기간 단축 및 금융비용 경감
- 건설공기 단축을 위해 공장제작/이송 후 "plug and play" 형태 건설이 가능한 원자로
- 모듈 증설방식의 다중 호기 건설로 경제성 제고
- 연료재장전/보수를 위해 한 원자로 모듈을 정지해도 전체 시스템 운영에 지장이 없는 형태



3. 국내외 개발동향

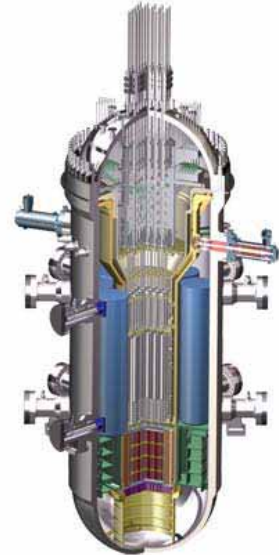
→ 국내 경수형 SMR 기술개발 현황

> SMART 기술개발 개요

- 일체형 소형 경수로
 - 한국원자력연구원 개발(1997-), 열출력 330 MWt 급
 - 표준설계인가 신청, 현재 최종 심사 단계

> SMART 기술개발 현황

- 원자로계통 표준설계: 노심손상 방지 신뢰성 향상
- 플랜트 종합설계: 일반기기 배치, BOP 설계기준 수립 등
- 핵연료 개발: 시험용 부품 제조, 각종 노외 성능시험 수행
- 기기제작 및 기술검증: 축소규모 주기기 시제품 성능검증
- 향후 코드검증실험, 경쟁력향상을 위한 연구 계속 예정



SMART 원자로

7

3. 국내외 기술개발동향

→ 국내 경수형 SMR 기술개발 현황(계속)

> REX-10 원자로 개요

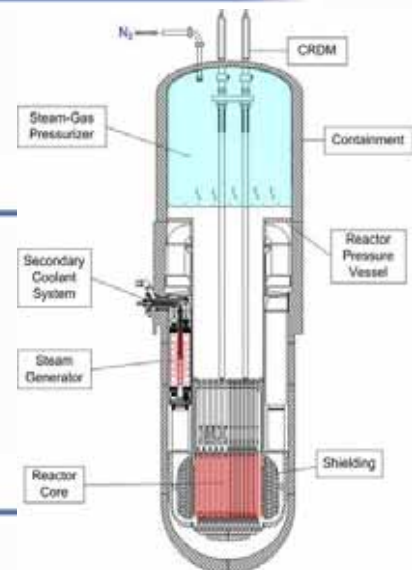
- 서울대를 중심 차세대지역에너지연구소(RERI)에서 개발
- 지역난방과 소규모의 전력 생산을 목적, 열출력 10 MW급

> REX-10의 설계 특징

- [고유 안전성 확보] LBLOCA 배제, 자연순환 냉각 등
- [핵비확산 및 핵확산 저항성 확보] 초장주기 노심 구성
- [경제성 확보] 무인원격운전
- [인허가] 신개념 규제방침 적극 유도

> REX-10 기술개발 현황

- 기초적인 개념설계 완료
- 토륨노심 설계, REX-10 Test Facility 구축 및 실험 수행



REX-10 원자로

8

3. 국내외 기술개발 동향

→ 해외 주요 국가별 경수형 SMR 개발 현황

> 미국

- DOE 에서 중소형 원자로를 통해 원자력 산업의 부흥을 위해 활발히 추진 중
 - 향후 5년간 총 25억 달러 투자예정
- 민간 주도의 중소형 신형 원자로 개발로 경수로형에 집중투자
 - mPower, NuScale, 웨스팅하우스 신형 SMR등

> 일본

- 산업계를 중심으로 다양한 용량의 신 개념 중소형경수로 기술개발 추진 중(IMR, MRX, DRX)
- 일본 원자력연구소에서는 최근 도심 지하에 건설하여 냉난방, 온수공급 등을 목적으로 피동형 일체형경수로인 PSRD를 연구 중
 - ※ PSRD(Passively Safe small Reactor for Distributed energy system)

> 러시아

- 지형적 특성으로 인해 중소규모 지역난방 및 전력생산용 원자로 개발에 주목하고 있음
- 반일체형경수로인 KLT-40S(35MWe)을 개발하여 전력생산, 해수담수, 지역난방에 사용
- 열병합용 분리형경수로인 VBER - 300을 개발 중임

> 중국

- 건설, 운영 등 일부 분야를 제외하고는 상당히 높은 기술수준에 있음
- 독일과 협력하여 지역난방용 일체형 경수로 NHR-5(5MWt) 및 NHR-200개발, 건설 및 실증 완료
- 국가적 원자력 기술 자립화의 범위에 중소형원자로 기술 개발 포함

9

3. 국내외 개발동향

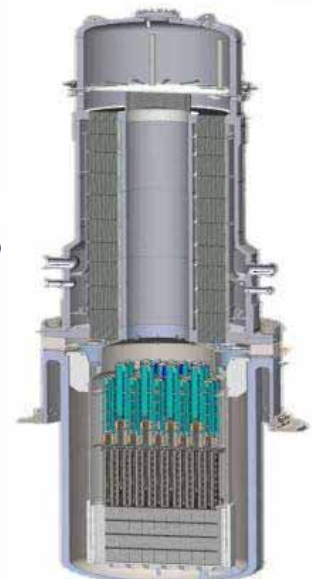
→ 미국의 경수형 SMR 기술개발 현황

> mPower 기술개발 개요

- 일체형 소형 경수로
 - 미국 B&W사 개발, 출력 : 500MWt/125MWe급
 - 표준설계인가 사전협의, 2012년 말 DC신청예정

> mPower 기술개발 현황

- 원자로계통 표준설계: 노심손상 방지 신뢰성 향상
- 플랜트 종합설계: 일반기기 배치, BOP 설계기준 수립 등
- 기기제작 및 기술검증: 축소규모 주기기 시제품 성능검증
- 설계특성
 - 핵연료 주기 48개월 이상, 압력용기내부 CRDM,
 - 피동안전설비(비상D/G불요),
 - 핵반응 중성자영역 : 열중성자



mPower 원자로

3. 국내외 개발동향

→ 미국의 경수형 SMR 기술개발 현황

> NuScale 기술개발 개요

- 일체형 소형 경수로
 - 미국 NuScale사 개발, 출력 165 MWt/45MWe 급
 - 2012년 초 표준설계인가 신청 예정이었으나 지연

> NuScale 기술개발 현황

- 원자로계통 표준설계: 노심손상 방지 신뢰성 향상
- 플랜트 종합설계: 일반기기 배치, BOP 설계기준 수립 등
- 기기제작 및 기술검증: 축소규모 주기기 시제품 성능검증
- 설계특성
 - 핵연료 주기 24개월 이상, 압력용기내부 자연순환으로 잔열 제거, 피동안전설비, 지하건설설계, 핵반응 중성자영역 : 열중성자



NuScale 원자로

11

3. 국내외 개발동향

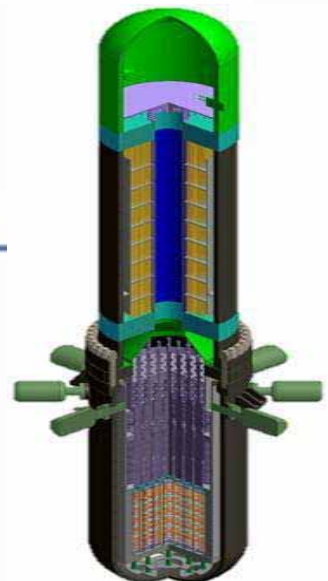
→ 미국의 경수형 SMR 기술개발 현황

> WH 신형 SMR 기술개발 개요

- 일체형 경수로
 - 미국 WH사 개발, 출력 800MWt/225MWe 급
 - 개념설계단계

> SMR200 기술개발 현황

- 원자로계통 표준설계: 노심손상 방지 신뢰성 향상
- 플랜트 종합설계: 개념설계 단계
- 기기제작 및 기술검증: 축소규모 주기기 시제품 성능검증
- 설계특성
 - 핵연료 주기 24개월 이상, 압력용기 내부CRDM, 수직 내장 RCP, IRIS 독자 설계개념에서 AP1000 개념으로 전환, 피동안전설비, 핵반응 중성자영역 : 열중성자



SMR200원자로

12

3. 국내외 개발동향

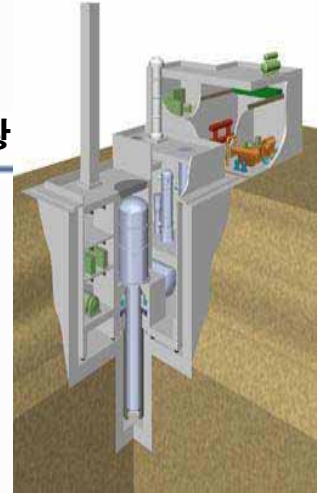
→ 일본의 액체금속형 SMR(4S) 기술개발 현황

> 도시바 액체금속 냉각 SMR 기술개발 개요

- 일체형 액체 소듐 소형 고속로
 - 일본 도시바사 개발, 출력 30MWt/10MWe 급
 - 개념설계단계

> 4S(Super-Safe, Small and Simple) 기술개발 현황

- 원자로계통 표준설계: 노심손상 방지 신뢰성 향상
- 플랜트 종합설계: 개념설계 단계
- 기기제작 및 기술검증: 축소규모 주기기 시제품 성능검증
- 설계특성
 - 핵연료 주기 30년 이상, 출력이 물/증기 계통에 의해 자동 조절됨, 피동안전설비, 이동성 반사체 채용
 - 핵반응 중성자영역 : 고속중성자



4S 원자로

4. SMR 주요 설계특성

→ 소형 모듈형 경수로 주요 설계 특성

> 노심

- 저출력 밀도: 약 100W/cm
 - 상용 원자로는 180W/cm 수준, 노심의 안전여유도 향상
- 노심안전성
 - 소형 노심 고유의 제논 제어 용이성, 안정성 및 안전성 향상
 - 무봉산 운전에 따른 감속재온도계수(MTC)의 음(negative)의 값 증가

> 원자로계통

- 출력
 - 단위 모듈 출력 50MWe급, 필요에 따라 단위 모듈 조합으로 출력 증대
 - 원자로수송성, 핵연료크기, 공기냉각가능성, 인허가시현성 등 고려하여 결정
- 피동 잔열제거(비상시)
 - 일차측 피동 냉각
 - 이차측 피동 냉각
 - 원자로 외벽 공기 냉각

4. SMR 주요 설계특성

→ 소형 모듈형 경수로 주요설계특성(계속)

> 원자로 용기

● 일체형 설계

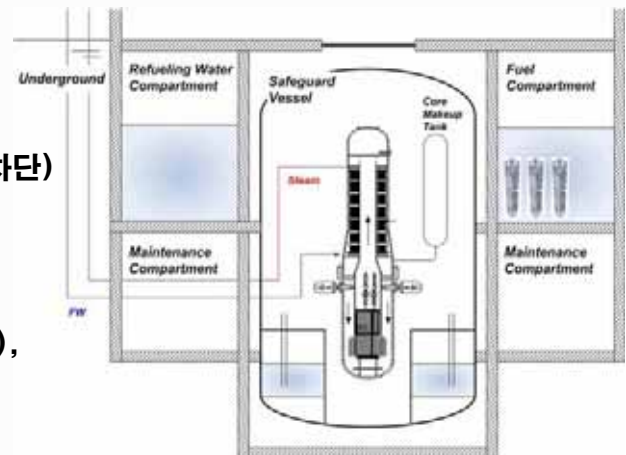
- 노심, 가압기, 증기발생기, RCP, 제어봉구동장치를 모두 압력용기에 내장
- 압력용기 하부 관통부 제거

● 지하 배치

- 안전보호용기 도입검토
(압력용기 파단시 방사성물질 외부 누출 차단)

● 크기

- 공장 제작/조립하여 도로, 철도 운송
- 단위 모듈 크기 제한 ($\phi 3.5\text{m} \times \sim 15.2\text{m}$),



15

4. SMR 주요 설계특성

→ 소형 모듈형 경수로 주요설계특성(계속)

> 기타 주요 기기

● 증기발생기

- 일체형 압력용기 상부 위치
- 일관유로형(once-through type) 과열증기형
- 직관형으로 유지 보수 용이

● 가압기

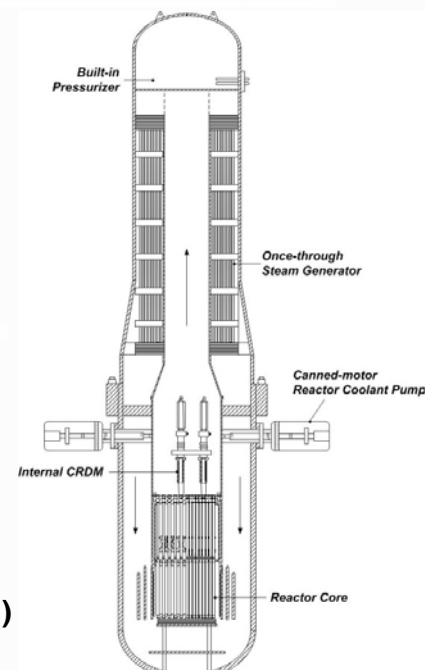
- 원자로압력용기 상부헤드 위치
- 질소 또는 증기 가압

● 원자로냉각재펌프

- 밀폐형 전동기(canned motor)
- 펌프 축밀봉 설계 단순화

● 제어봉구동장치

- 원자로 압력용기 내장
- 노심/원자로 상부 공간 단순화
- 구동장치 개발 및 성능 검증 필요 (고온/고압 냉각재 환경)



16

4. SMR 주요 설계특성

→ 소형 모듈형 경수로 핵연료 개발

> 추진전략

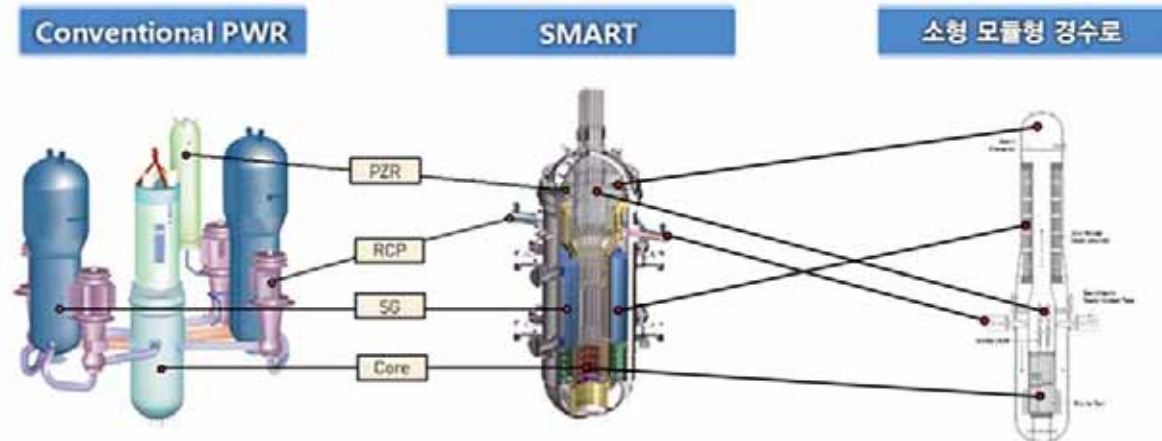
- 기 확보 기술 활용하여 소형 모듈형 경수로 핵연료 개발
 - 확보기술
 - 국내 경수로 핵연료 상용화 기술
 - 고유 설계코드 개발 및 인허가 기술
 - 경수로 노심설계 및 안전해석 기술
 - 적용경험
 - 국내 상용 경수로원전 초기노심 및 교체노심 노심설계
 - 국내 상용 경수로원전 안전해석
 - SMART 핵연료 개발, 안전해석 및 초기노심설계 인허가



17

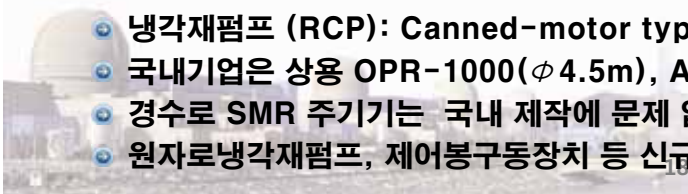
4. 주요기기 제작성

→ 소형 모듈형 경수로 제작성 분석



> 주요 구성부품

- 원자로압력용기 (RPV): 외경 3.5m의 cylindrical pressure vessel
- 증기발생기 (S/G): vertical tube type
- 냉각재펌프 (RCP): Canned-motor type
- 국내기업은 상용 OPR-1000(ϕ 4.5m), APR-1400(ϕ 4.6m) RPV 제작경험 보유
- 경수로 SMR 주기기는 국내 제작에 문제 없음
- 원자로냉각재펌프, 제어봉구동장치 등 신규기기는 개발/검증 필요



4. 수송 특성

→ 소형 모듈형 경수로 수송성 분석

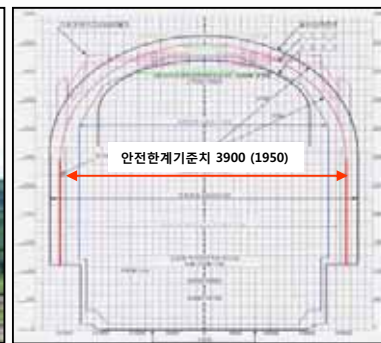
> 철도 차량을 이용한 수송

- SMR 시스템의 수송성 판단 기준이 되는 수송 수단, 각 국가별로 규정이 다름
- 제한 조건 : 철로 상의 터널과 육교 높이, 곡선로 운행 조건 등
- 한국철도공사 운행 기준

	폭(B)	높이(H)	길이(L)	중량(W)	비고
일반 화차	2.5 m	3.6 m	14 m	50 ton	
특대 화차	3.9 m	3.6 m	15 m 이상 고려 가능	유동적	폭 : 안전한계치 기준



[철도 차량을 이용한 Reactor Pressure Vessel 수송]



[특대화물 적재 한계도]

4. 기존 PWR vs. SMR의 안전설비 비교

→ 기존원전 대비 안전 계통 비교

기존 PWR	SMR
<ul style="list-style-type: none"> - 고압안전주입 계통 - 저압안전주입 계통 	<ul style="list-style-type: none"> - 피동냉각기능으로 능동 안전주입 계통 불요
<ul style="list-style-type: none"> - 비상냉각수조 및 펌프, 헤드유지 시스템 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 사고완화 관련 안전펌프 및 관련 시스템 불요
<ul style="list-style-type: none"> - 비상디젤 발전기 	<ul style="list-style-type: none"> - 노심냉각 및 잔열 제거 비상전원 불요
<ul style="list-style-type: none"> - 능동 격납 건물 가열 및 살수계통 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 능동 시스템 불요
<ul style="list-style-type: none"> - ECCS, I&C 등 안전설비 관련, 정기 시험 등 신뢰성 유지 	<ul style="list-style-type: none"> - 설비 신뢰성 유지 노력 저감 및 정기 시험 단순화
<ul style="list-style-type: none"> - 비상급수계통, 설비 연관시스템 유지노력 과다 	<ul style="list-style-type: none"> - 비상급수계통 설비 단순화

4. 기존 PWR vs. SMR의 안전설비 비교

→ 기존원전 대비 안전 계통 비교

기존 PWR	SMR
- 원자로냉각재펌프 밀봉 및 기밀유지 시스템 필요	- 일체형으로 밀봉 및 기밀시스템 불요
- Ultimate heat sink용 해수 또는 담수 취수 및 연관시스템 필요	- Convection, Conduction 열제거에 의한 관련 시스템 불요
- 기기 냉각수 계통 필요	- 기기냉각 및 연관시스템 불요
- HVAC 등 안전설비 보조시스템 필요	- 안전설비 Room, HVAC 계통 단순화



21

5. SMR 상위레벨 설계요건

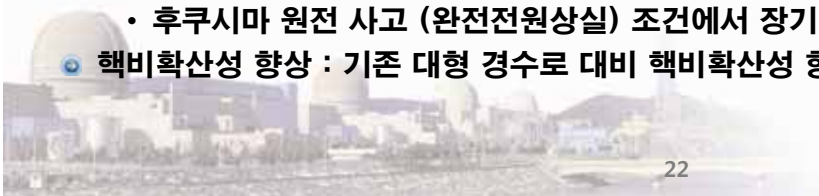
→ SMR 개발 상위 요건(안)

> 일반 요건

- 노형 : 가압 경수형 원자로
- 설계 수명 : 60년 이상, 낮은 출력 밀도에 의한 원자로 중성자 조사량 감소
- 지진 하중 SSE 0.5g 이상 : 면진(seismic isolation) 설계
- 일체형 원자로 : 원자로압력용기 내에 SG, 가압기 등 기기 내장, 대형배관파단사고 배제
- 설계 개념 : 모듈화, 설계 단순화, 충분한 설계 여유도, 입증된 기술최대활용, 인간공학 기반

> 안전성 요건

- 고유/피동 안전성 확보
 - 완전 피동 설계. 운전원 개입없이 원자로 정지 및 안전정지 유지 가능
 - 사고 저항성 향상 및 노심손상 가능성 감소
 - 후쿠시마 원전 사고 (완전전원상실) 조건에서 장기간 안전정지 유지 가능
- 핵비확산성 향상 : 기존 대형 경수로 대비 핵비확산성 향상



22

5. SMR 상위레벨 설계요건

→ SMR개발 상위 요건(안)(계속)

> 성능/경제성 요건/인허가 이슈요건

- 핵연료재장전 장-초장주기
 - 재장전 주기 5년, 핵연료 농축도 5% 이하
- 완전 자동제어운전
 - 운전원 부담, 개입 최소화
- 부하추종운전
- 정비/검사/진단 용이성
- 공장 제작/조립 및 육상 운송
 - 건설기간 2년 이내 (2x 50MWe 기준)
- 경제성/경쟁력 확보
 - 해외경쟁 SMR 대비 경제성 30% 이상 우위
- 규제기관(NRC) Policy Statement 및 요건사항, 이슈
 - 안전여유도 증진, 주제어실 운전요원, 다단 모듈 인허가성
 - 물리적 방호, 비상계획 구역, 이해관계자 조기 참여

23

6. 결 론

- **세계 원전시장에서의 SMR 확대 예상**
 - 장점: 탄력적 재정모델, 모듈화/공기단축/다량생산, 다목적 활용
 - 완전 안전 피동 설계 가능 및 설치 지역에 제한 없음
 - 대형원전 대비 틈새시장(전력망 규모 소형 국가 등) 시장성 우위
- **소형 모듈형 경수로의 조기개발**
 - 해외경쟁사 개발일정 및 수요 예측상 과제의 조기 착수 필요
 - 축적된 상용 원전의 설계, 건설 및 운전경험을 기반한 개발
 - SMART 개발 결과 연계 소형 모듈형 경수로 적기 개발 가능
- **SMR 관련 기술기준 조기 정립**
 - 국내 SMR 최상위 설계 및 일반 설계 기준 조기 정립 필요
 - 국내 SMR 규제기준 및 인허가 체계 조기 구축 필요

24

소형 모듈형 원자로의 인허가 접근방안

김균태(KINS)



한국원자력학회 춘계학술발표회

소형 모듈형 원자로의 인허가 접근방안

2012. 5. 16.

김 군 태

(kkt@kins.re.kr)

한국원자력안전기술원

발표 내용

1. 소형 모듈형 원자로
2. 기존 원자로의 안전규제
3. SMR 안전규제 접근방안
4. 개발자의 인허가 접근방안
5. 맺음말

1. 소형 모듈형 원자로 - 개념

□ 정의

- Small : 출력 300 MWe 미만의 소형 원자로
- Modular :
 - 공장에서 제작하여 철도 및 차량으로 운반하여 설치
 - 모듈방식으로 수요에 따라 증설 가능한 설계개념

□ 장점

- 건설공기 단축 및 투자비용 저감
- 소규모 전력공급, 원격지 설치 등이 가능
- 압력용기 등 주기기의 소형화로 제작공장의 다원화 가능
- 핵확산저항성 확보에 유리

1. 소형 모듈형 원자로 - 개발 현황

□ 해외

원자로	설계자	노형	용량	완성도	비고
4S	Toshiba	SFR	10MWe	개념설계	
W SMR	WH	PWR	200MWe	개념설계	
mPower	B&W	PWR	125MWe	DC준비	
NuScale	NuScale	PWR	45MWe	DC준비	
TWR	Terra Power	SFR	30MWe	개념설계	

□ 국내

원자로	설계자	노형	용량	완성도	비고
SMART	KAERI	PWR	330MWt	설계심사중	
REX-10	RERI	PWR	10MWt	개념설계	
SMR	?	?	~100MW	기획단계	

1. 소형 모듈형 원자로 – 설계 특성

□ 노심

- PWR-based SMR → SFR-based SMR
- 50~200MWe 정도의 용량으로 일체형으로 설계
- 장주기 운전이 가능한 핵연료 및 노심 설계

□ 설계 및 건설, 운영

- 기존 원전에 비해 상향된 안전목표
- 완전 피동안전계통 채용
- 지하에 설치 : Security측면에서 유리
- 공장제작 후 이송 및 설치 가능한 "plug and play" 형태
- 모듈 증설방식으로 한 발전소에 다수의 원자로 설치
- 운전원 개입 최소화

2. 기존 원자로의 안전규제

□ 원전기술과 규제기준

- 1세대, 2세대, 3세대까지는 완성된 노형을 도입
- 도입기에는 수출국 및 개발국의 기준을 그대로 인정
- 고유모델 개발시에는 새로운 규제기준의 적용이 불가피

단계	일반 산업	원자력 산업	규제기술
1	수입	1970-1980년대: 수입	수입국 규제기준 사용
2	모방	1990년대 : 모방단계	선진국의 규제기준 준용
3	부품개발	2000년대 : 부품국산화	일부 규제기준 개발
4	자체개발	현재 : 국산 원전 수출	자체 규제기준 개발
5	고유모델 개발	SMR 등 신형 원자로 개발	고유 규제기준 필요

2. 기존 원자로의 안전규제

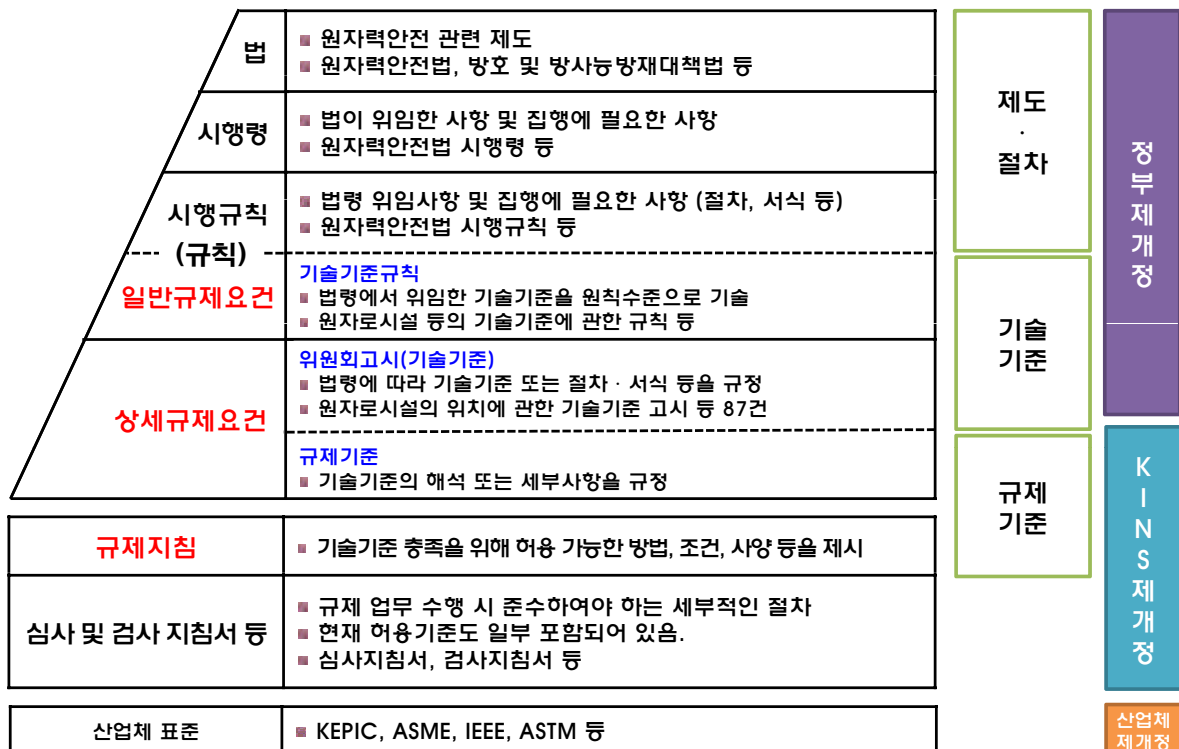
□ 발전용 원자로에 대한 규제

- 법령/기술기준/규제기준 체계
 - 허가 및 심사 기준
 - 미국의 규제요건을 근간으로 프랑스, 캐나다, 독일, IAEA 등의 기준을 참조
- 보수적인 심사기준과 관행을 정립

□ 인허가 절차

- 표준설계인가 (선택사항)
- 건설허가, 운영허가
- 사용전 검사, 정기검사, 품질보증검사 등

(참조)국내 법령 및 안전기준 체계



2. 기존 원자로의 안전규제

□ 후쿠시마 원전사고 이후의 변화

- 기술적 변화
 - 극한자연재해 및 중대사고를 설계에 고려
 - 사고를 예방할 수 있다는 개념에서, 사고가 발생할 수 있다는 개념으로 전환
 - 비상대응시설 및 조직의 강화
- 사회적 변화
 - 원자력에 대한 우려 및 거부감 확산
 - 전문가 집단의 반원전 조직화 : 교수, 의사, 변호사

3. SMR 안전규제 접근방안 - 경험

□ 규제기준 vs 설계기준

- 남아공의 PBMR 사례 vs. 미국의 NGNP에 대한 입장
- Chicken and Egg

□ 규제기관의 양면성

- 피규제자와는 기술적으로 대화, 돌아서면 국민을 이해시켜야 함
 - 논리가 명쾌하지 않으면 설명이 구차해짐

□ Early Interaction : 매우 중요

- 제도의 정비 : 개발단계의 안전성 검토,
- 기술적 이해와 해결방안의 모색
 - 개발사업의 성공은 안전성 확보가 전제조건
- 규제기술 개발을 위한 자원 확보

3. SMR 안전규제 접근방안 – 제도적 측면

□ 입증된 원자로 도입의 경우

- 국내기준에 따라 검토하되, 개발국의 안전기준 및 심사결과를 참조

□ 신형 원자로 개발의 경우

- 인허가 제도
 - 개발단계 원자로에 적합한 인허가 검토제도 도입 검토
 - 표준설계인가 vs. 특정설계인가
 - 2 Step / 1 Step Licensing vs. Multi- Step Licensing
 - 안전성 실증을 위한 시운전허가 후, 상업운전 허가 도입 검토
 - 공장제작에 따른 제작검사의 중요성 부각

3. SMR 안전규제 접근방안 – 기술적 측면

□ 신형 원자로 개발의 경우 (계속)

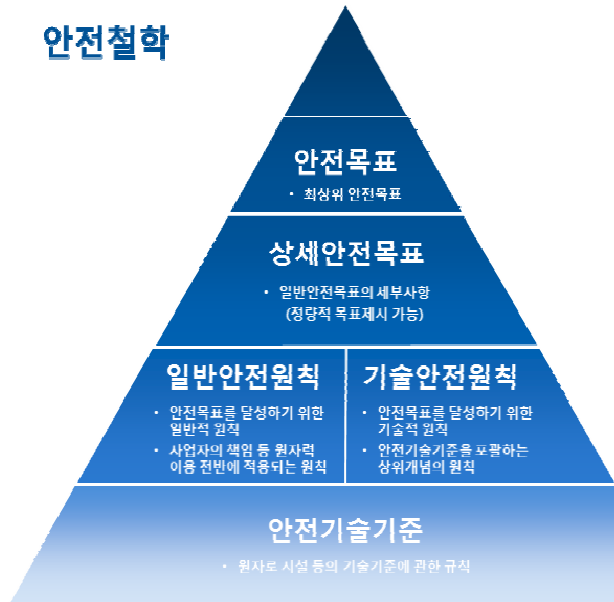
- 안전기준
 - 고유안전성 등 안전원칙의 적용
 - 중대사고 가능성 최소화를 위한 심층방어 개념의 강조
 - 일체형 설계에 따른 사고 개념의 재검토
 - 장주기 운전에 따른 안전기준 재검토
- 규제기술개발
 - 해외 사례의 수집 및 검토
 - 노형특성을 고려한 안전목표 및 기술기준 개발
 - 고유기술에 대한 규제기준 및 규제기술 개발
 - 안전성 확인을 위한 독립 검증계산 체계 개발

3. SMR 안전규제 접근방안 - 사례

□ 제4세대 원자로의 안전철학 (안)

필요성	<ul style="list-style-type: none"> IAEA, WENRA, GIF, NRC, NNR 등의 여러 원자력 국제기구 및 국가의 안전철학 정립내용 검토 우리나라 고유의 미래 원자로 안전철학의 구체적 수립
-----	--

안전철학



안전목표 내용 및 그외 항목

안전목표	미래원자로는 국민과 작업종사자 그리고 미래 세대의 건강과 환경에 미치는 영향을 최소화하도록 인간-환경친화적이며 높은 수준의 안전성을 갖춘다.
상세 안전목표	1. 국민에 대한 상세안전목표 2. 환경에 대한 상세안전목표
일반 안전원칙	1. 사업자의 역할과 책임 2. 안전에 대한 관리 조직 및 체계 3. 비상 및 사고 대응책 4. 종합적인 사회적 이득 5. 규제기관의 역할과 책임 6. 안전문화
기술 안전원칙	1. 고유 안전성 확보 2. 심층방어의 적용 3. 설비의 신뢰성 강화 4. 원전 안전성 종합 평가 5. 환경보호 및 해체 용이성 6. 보안 및 통제와의 연계성 7. ALARA 원칙

13

4. 개발자의 인허가 접근방안

□ 설계개념 및 사업목표 정립

- 노형 선정, 사업의 최종목표 설정 등

□ 안전목표 상향 설정

- 기존원자로의 안전성 개선추이 및 Gen-IV 원자로를 참조

□ 설계요건을 계층별로 확정

□ 원자로의 특성 검토 및 기존 기술기준과의 비교

□ 신기술의 적용 가능성 검토

- 이론적, 실험적 입증자료를 충분히 확보

□ 인허가 절차 및 전략 검토

- ❖ 문제점 발견시 신속히 협의 및 해결방안 강구

14

5. 맺음말

- 획기적인 안전수준 향상 필요
 - 중대사고 제거
 - 인적오류 제거
 - 방사성물질 방출 제한
- 명확한 목표설정 및 인허가 전략 수립
 - 안전목표, 사업목표, 신기술의 도입 등
- 설계기술과 규제기술의 조기 동반개발 필요
 - 시행착오의 최소화 및 인허가 기간 단축
 - 실질적인 안전성 향상 기대