

SMR과 대형원전의 미래전망과 기술개발 현황

2022. 10. 19

한수원 중앙연구원

발표순서

1 개요

2 원자력산업 미래전망

3 국내 대형원전 추진현황 및 계획

4 SMR 기술개발 현황

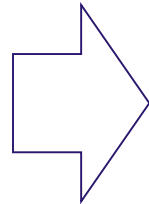
5 맺음말

I. 개요

❖ 원자력산업 관련 최근 국내외 동향

■ 신정부 110대 국정과제 중 원자력 관련 7개 과제 천명

- 원전의 적극적 활용
- 원전 생태계 경쟁력 강화
- 원전의 수출 산업화
- 원자력 협력 외교 강화
- 차세대 원전기술 확보
- 방폐물 관리
- 원자력 안전 확보



신한울 3,4 건설재개
 계속운전추진
 원전수출전략추진단 신설
 한미 원전동맹 강화
 독자 SMR 노형개발
 고준위 방폐물 처분
 원안위 전문성/독립성 강화

■ 원자력을 포함한 K-Texonomy 초안 발표 (21.09)

- 녹색부문 : 원자력 핵심기술 연구, 개발, 실증
- 전환부문 : 신규원전 및 계속운전 (기한 : 2045년)
- 전제조건 : 사고저항성 핵연료 적용, 고준위 방폐물 처분계획
- 기대효과 : 다양한 세제혜택 및 금융지원 가능

I. 개요

❖ 원자력산업 관련 최근 동향(계속)

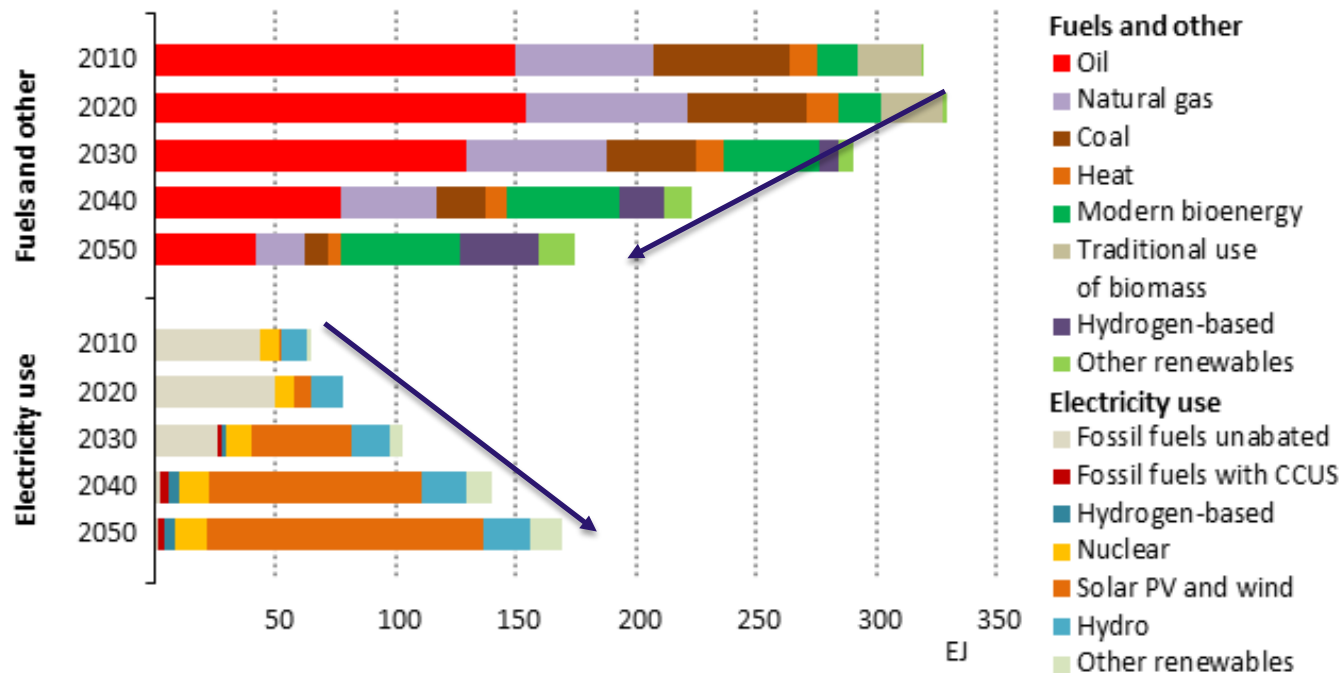
- **우크라이나 전쟁 관련 에너지 안보이슈 급부상**
 - 국가 차원의 에너지원 자급의 중요성 (노드스트림2, 독일 전기료 3배 인상등)
 - 연료비 변동에도 안정적 전력공급이 가능한 원자력 발전의 장점 대두
 - 연료 비용이 전력생산비의 약 9% (준 국산 에너지원)

- **탄소중립을 위한 원자력의 역할**
 - 저탄소 에너지원으로서의 원자력 발전 (EU-Taxonomy)
 - 신재생 에너지의 간헐성 극복을 위한 원전의 조화로운 활용
 - 안전성을 극대화한 SMR 시장의 부상

II. 원자력 산업 미래전망

❖ 2050 글로벌 에너지믹스 변화 전망

- 최종소비 에너지중 난방 .vs 전력비중 (%) : 80: 20 → 50: 50
 - 화석연료 소비 약 50% 감소
 - 전력수요에 대응하여 태양광, 풍력 등 대폭 증가
 - 원자력 발전량도 2배 이상 증가 전망

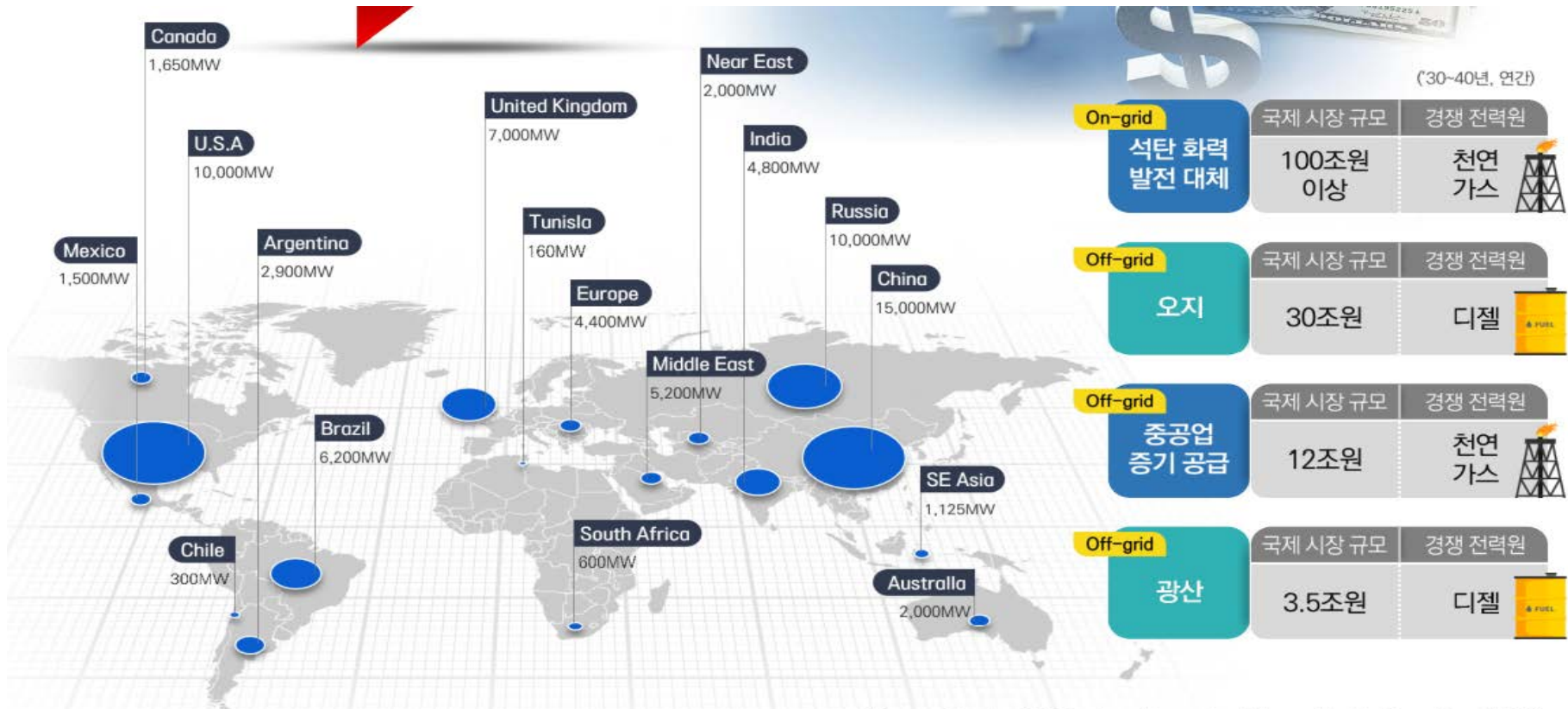


자료 : IEA, Net Zero by 2050 : A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021

II. 원자력 산업 미래전망

❖ 국가별 에너지수요 전망

- 중국, 미국, 러시아, 영국을 중심으로 수요증가
- 석탄화력 발전 대체수요가 대부분을 차지 (약 70%)



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

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

II. 원자력 산업 미래전망

❖ 원자력발전 신규도입 희망국 전망

지역	국가
유럽	알바니아  세르비아  크로아티아  포르투갈  노르웨이  폴란드 
	터키  에스토니아  라트비아  리투아니아  아일랜드 
중동 및 북아프리카	사우디아라비아  카타르  쿠웨이트  예멘  이스라엘  시리아 
	요르단  이집트  튀니지  리비아  알제리  모로코  수단 
아프리카 (북아프리카제외)	나이지리아  가나  세네갈  케냐  우간다  탄자니아  잠비아 
	나미비아  르완다  에티오피아 
중남미	쿠바  칠레  에콰도르  베네수엘라  볼리비아  페루  파라과이 
중앙아시아& 남아시아	아제르바이잔  조지아  카자흐스탄  몽골  방글라데시  스리랑카 
	우즈베키스탄 
동남아시아& 오세아니아	인도네시아  필리핀  베트남  태국  라오스  캄보디아 
	말레이시아  싱가포르  미얀마  호주 
* 출처 : 세계원자력협회(World Nuclear Association)-Emerging Nuclear Energy Countries (Updated March 2021)	

II. 원자력 산업 미래전망

❖ 원자력 발전설비 증설량 전망

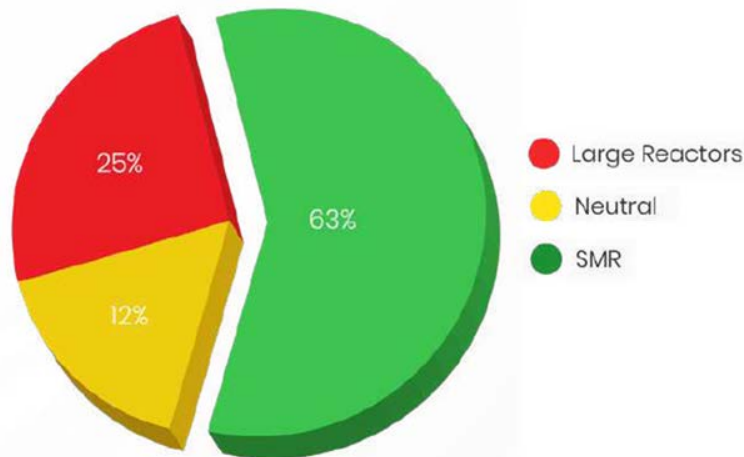
■ 650GWe (참고 : APR1400 기준 450 호기 분량)

(단위:GWe/년)

구분	2016-2020	2021-2030	2031-2050
연평균 추가 증설량	7	17	24

자료 : IEA, Net Zero by 2050 : A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021

❖ 소형원전 선호도 조사



자료 : Nuclear Business Platform, Africa SMR Report ACCELERATING THE ADOPTION OF SMR TECHNOLOGY IN AFRICA, 2021

II. 원자력 산업 미래전망

❖ 국내 노형개발 방향

	1990s	2000s	2010s	2020s
주력노형	OPR1000	APR1400	APR+	?
현지화 노형 및 소형		US-APR1400 EU-APR	APR1000+	?
		SMART		

■ 단기 노형개발 방향

- 개량형 APR1400 : EU-APR, US-APR1400
- GEN III+ NPP : APR1000+ (APR+의 열출력 축소 모델)
- SMART 표준설계 인가 (피동형)

■ 중장기 노형개발방안 고려사항

- 안전성 극대화, 탄소중립, 재생에너지와의 Harmonization

III. 대형원전 기술개발 현황

❖ 원전 건설현황

국내 건설 원전

[’22. 4월 기준]

구 분	준공시점	공 정 률	건설기간	용량(MW)	설계수명
신한울 #1	’22. 9	99.1 %	’11.12~’22. 9	1,400	60년(’22~’82)
신한울 #2	’23. 9		’11.12~’23. 9	1,400	60년(’23~’83)
신고리 #5	’24. 3	76.5 %	’16. 6~’24. 3	1,400	60년(’24~’84)
신고리 #6	’25. 3		’16. 6~’25. 3	1,400	60년(’25~’85)

해외 건설 원전

[’22. 4월 기준]

구 분	준공시점	공 정 률	추진 현황
BNPP 1호기	’21. 5	99.3 %	상업 운전 중(’21. 4 .1.~)
BNPP 2호기	’22. 6		상업 운전 개시(’22. 3.24.~)
BNPP 3호기	’23. 6	95.5 %	연료장전(’22. 6)을 위한 시운전 시험 중
BNPP 4호기	’24. 6		고온기능시험 착수(’22. 5) 예정

출처 : 2022 KNS 춘계학회 Workshop 자료(원자력 산업 전망과 과제 및 학회의 역할)

III. 대형원전 기술개발 현황

❖ EU-APR 유럽 사업자협회 인증 취득(2017)



❖ APR1000에 대한 추가인증 진행 (2023년 취득 목표, 체코 수출 대비)



III. 대형원전 기술개발 현황

❖ APR1400 NRC DC 획득(2019)

NRC Design Certificate for APR1400



APR1400

- 1400MWe Next generation PWR
- Shin Kori #3, #4 operation, 4 unit under const.
- Barakah #1, #2 in operation, 2 unit under const.



APR1400 training simulator

- High-fidelity simulator for operator training

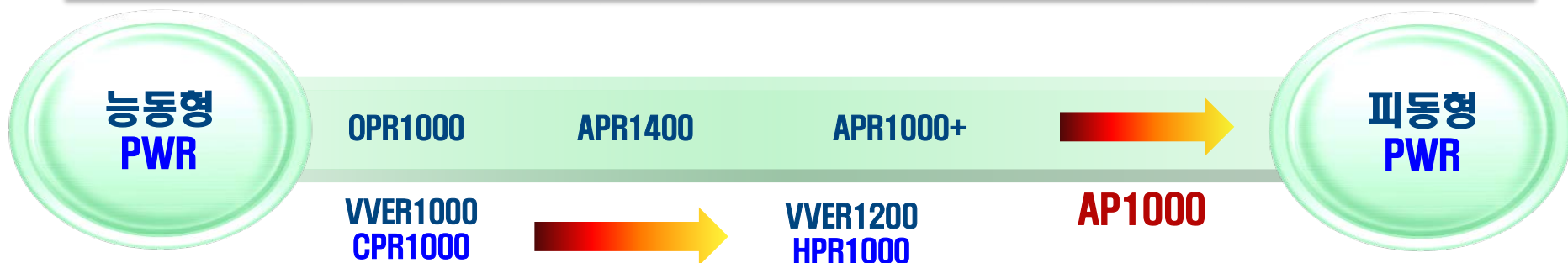


III. 대형원전 기술개발 현황

❖ 피동원전 핵심기술개발

	능동형 계통	피동형 계통
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 고효율 - 높은 냉각성능 - 제어가 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> - 고신뢰도 (외부전원 불필요) - 단순한 계통 - 기기수 감소
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 외부전원 필요 - 복잡한 계통 - 많은 기기수 	<ul style="list-style-type: none"> - 저효율 - 냉각성능 입증의 어려움 - 제어가 어려움
개발노형	APR1400, APWR, EPR	AP1000, ESBWR

후쿠시마 사고 이후 혼합형 및 피동형 원전 개발 추세



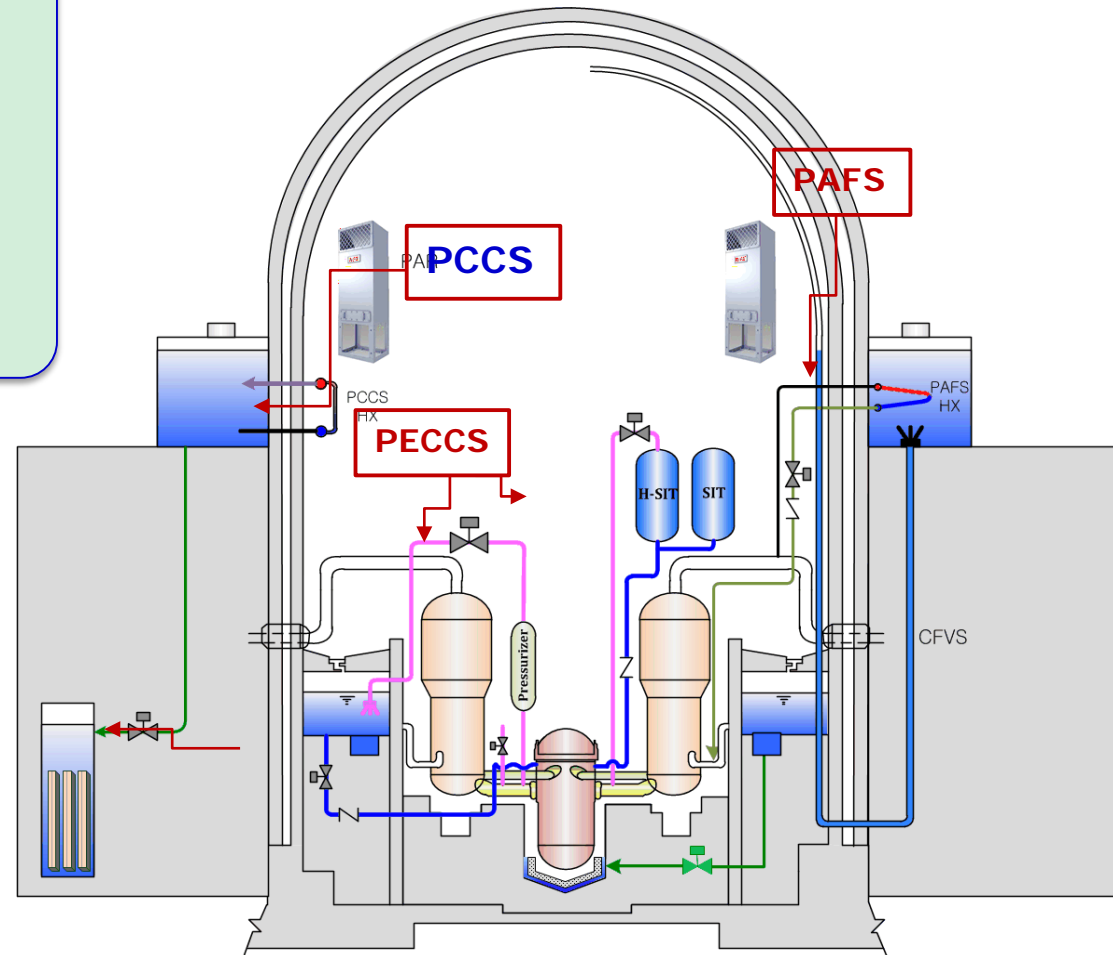
III. 대형원전 기술개발 현황

❖ 국내 피동안전계통 기술개발 현황

- 피동 보조급수계통(PAFS) *
- 피동 원자로건물냉각계통(PCCS) *
- 피동 비상노심 냉각계통 (PECCS)
- 피동 여과배기 계통
- 기타 : TM-ICI, In-vessel CEDM *

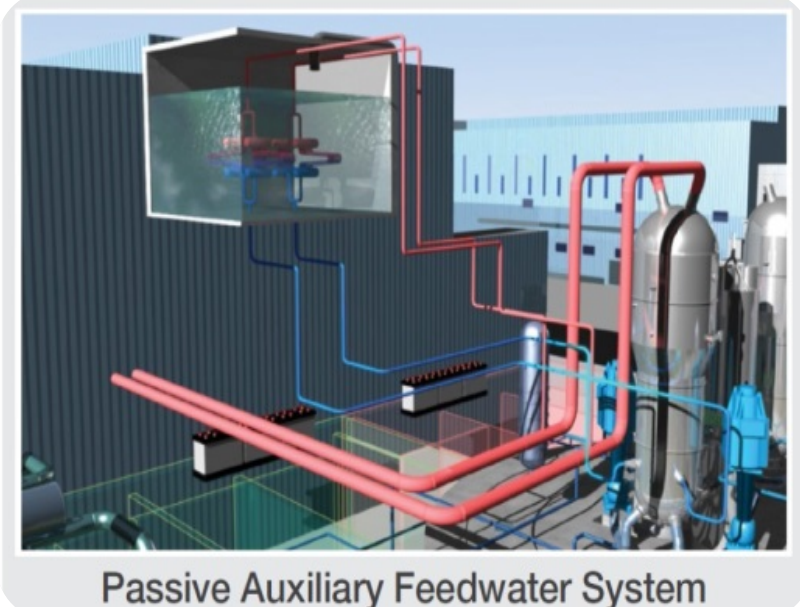
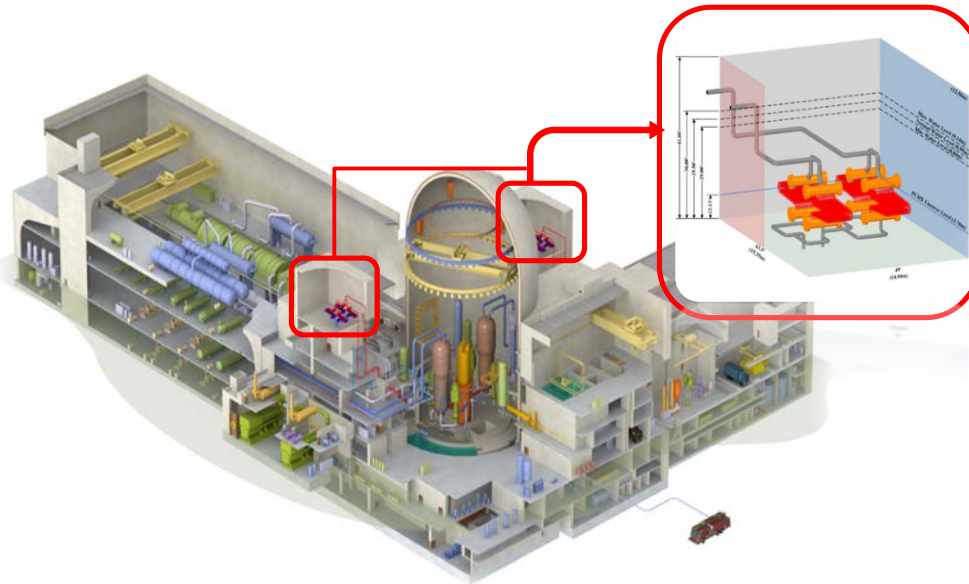
- 펌프 불필요
- 전원 불필요
- 조작 불필요
- 모든 고장원인 제거

실질적 방사능 누출 “0”

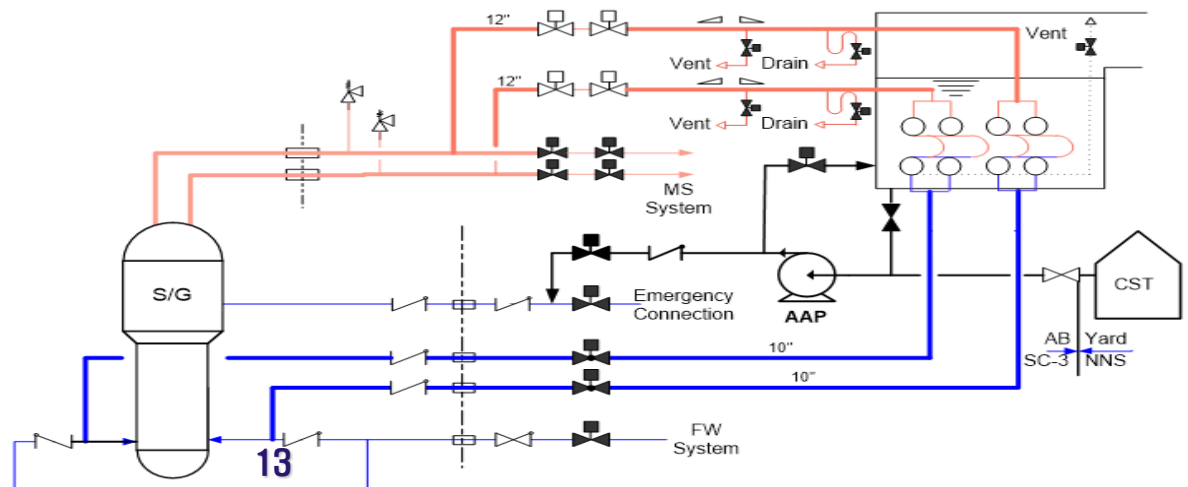


III. 대형원전 기술개발 현황

❖ PAFS 기술개발 : 능동형 보조급수계통을 피동형으로 완전대체



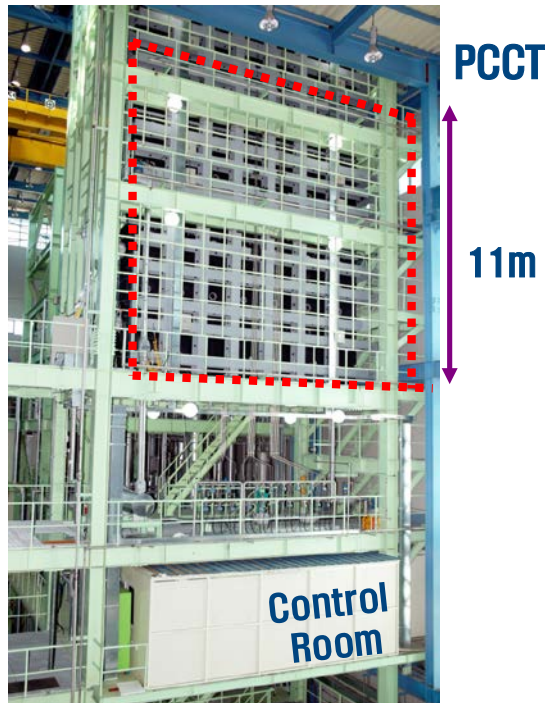
- 자연력(중력, 응축, 전도 등) 이용
- 운전원 조치 불필요
- SBO 시 최소 72시간 이상 운전



III. 대형원전 기술개발 현황

❖ PAFS 실증실험 수행

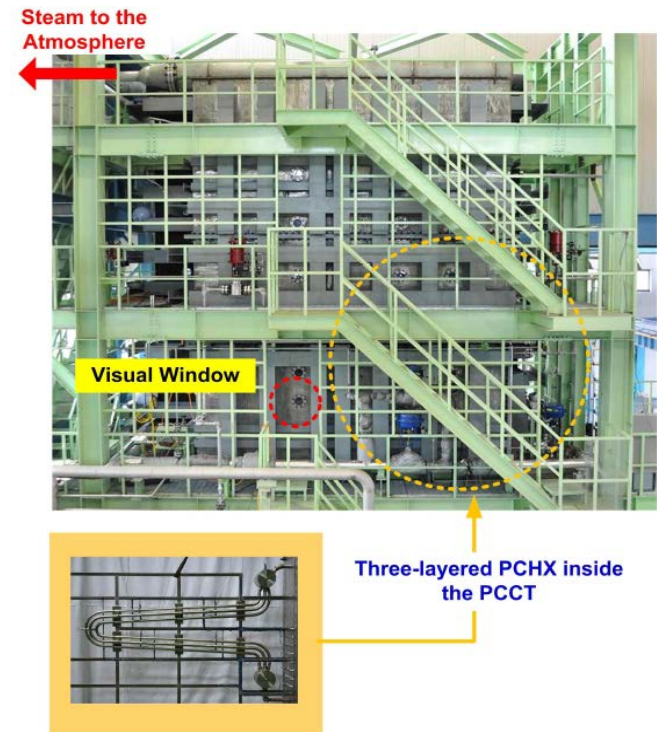
- APR+ 표준설계 인가 획득으로 입증된 기술
- 개별-종합-실규모 실험설비 인프라 구축완료, 해석모델 개발 및 검증 기수행



PASCAL



LAPLACE
(지상 30m, 지하 10m 실규모)

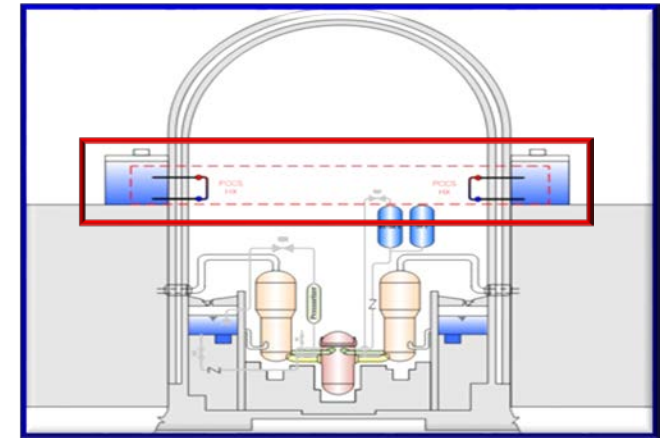


ATLAS-PAFS

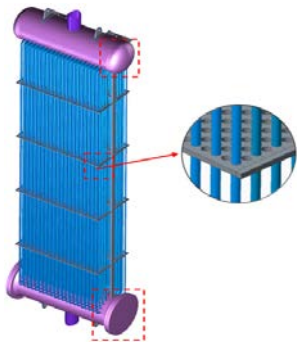
III. 대형원전 기술개발 현황

❖ PCCS 기술개발

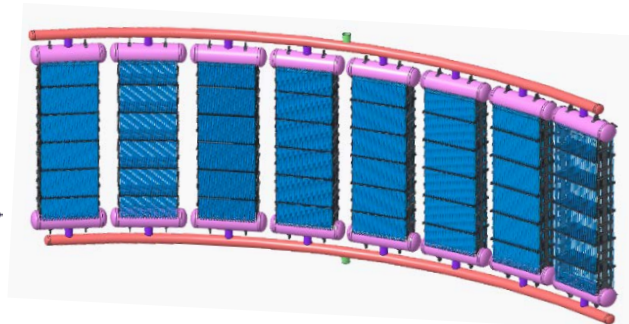
- 기존 능동 살수계통 완전대처
- 최소 3일이상 전기 없이 냉각가능
- 4계열, 133% 용량
- 0.3g 내진설계
- 항공기 충돌 대처설계



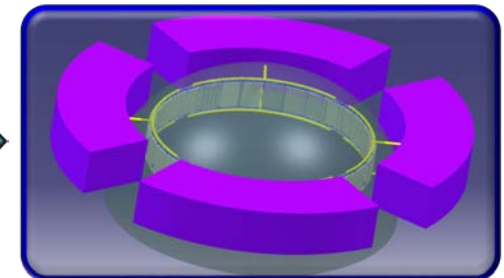
[iPower]



Single module
[8rows × 42tubes/row]



Single train
[8 modules (33% capacity)]

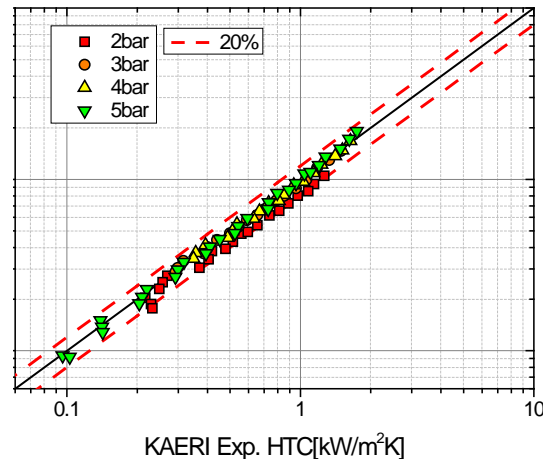
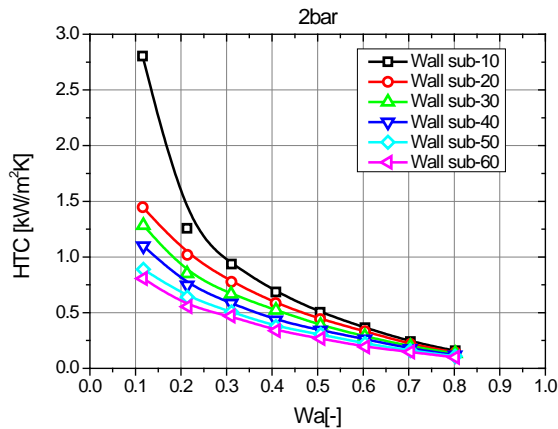


[33%/train × 4trainh]

III. 대형원전 기술개발 현황

❖ PCCS 실증실험 수행

- 축소모형 및 실규모 Bundle (18개) 실증실험 수행완료
- 개별-실규모 실험설비 인프라 구축완료, 해석모델 개발 및 검증 기수행



열전달계수 실증실험
(부산대)



PCCS 실규모 Bundle Test
16 (KAERI)



PCCS mockup 제작성 검토
(두산에너지빌리티)

IV. SMR 기술개발 현황

❖ 개발배경

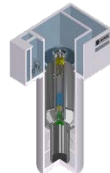
- 대형원전 초기투자비용 증가
- 노후발전소 대체 및 개발도상국 수요증가
- 기후변화 대응 및 탄소중립 달성
- 원자력산업 신성장동력 창출



❖ 전세계적으로 70여종의 SMR 개발 중

한국

해외 SMR 개발



SMART

NuScale

BWRX-300

SMR-160

KLT-40S

ACP-100

NuWard

UK SMR

KAERI

NuScale(미)

GE-Hitachi(미)

Holtec(미)

OKBM(러)

CNNC(중)

EDF(프)

Rolls-Royce(영)

'12년 7월
표준설계인가

자연순환
표준설계인가('20년)

BWR 노형
캐나다 건설계획

블록형
NRC예비심사중

블록형, 해상원전
상업운전중('19)

일체형
건설중('21)

블록형, 개념설계
'30년 건설계획

루프형
'30년 건설계획

IV. SMR 기술개발 현황

❖ 원자력발전 선도국을 중심으로 SMR 개발 가속화

미국, 영국, 러시아, 중국 등을 중심으로 기술개발을 추진 중이며,
경수로형 SMR은 2030년을 전후로 본격적인 상용화 전망

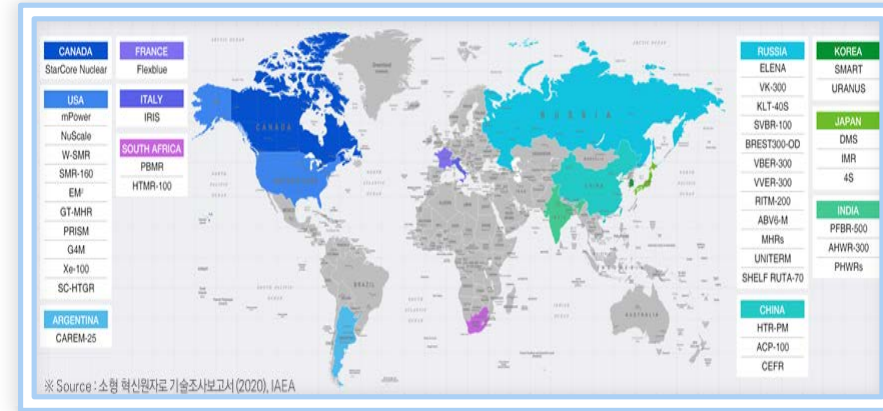
· OECD 국가를 중심으로 SMR에 대한 관심이 증가, 2020년 기준 전세계적으로 70종 이상의 SMR이 개발 중

노형별 SMR 개발 현황

노형		미국	러시아	중국	한국	기타	합계
경수로	육상용	5	7	4	1	8	25
	해양용	0	5	1	0	0	6
고온가스로		2	3	2	0	7	14
고속로		3	1	0	1	6	11
용융염냉각로		4	0	1	0	5	10
초소형원자로		3	0	0	0	3	6
합계		17	16	8	2	29	72

* 기타 : 일본, 아르헨티나, 캐나다, 영국, 남아공, 인도네시아, 체코, 프랑스 등

세계 SMR 개발 분포



기술성숙도가 가장 높은 미국의 NuScale은 최초호기 건설을
계획중이며 북미를 비롯해 유럽과 아시아 시장으로의 진출을 추진
중

IV. SMR 기술개발 현황

❖ SMR 개발 필요성

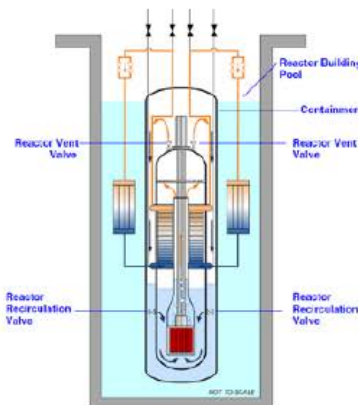
글로벌 시장 경쟁력이 높은 수출 전략형 경수로 SMR 필요성 대두

해외 시장에서 경쟁력 상실 우려

2030년 이후 세계 시장을 겨냥한 수출 전략형 SMR 개발 필요

- SMART는 신속한 인허가 취득을 위해 이전 대형원전의 설계개념을 적용하여 안전성, 경제성, 유연성 부족
- 경쟁노형인 NuScale의 경우 모듈화 및 안전계통의 단순화를 통해 차별화된 경쟁력을 보유

SMART vs. NuScale 제원 비교



구분		SMART	NuScale
전기 출력	모듈	110 MWe	50 MWe
	플랜트출력	110 MWe	600 MWe (12개 모듈)
노심손상빈도		$1.0 \times 10^{-7}/R-Y$ 이하	$1.0 \times 10^{-9}/R-Y$ 이하
원자로 냉각재펌프		4개측면	없음
재순환밸브		-	있음
안전 등급 DC 전력		필요	불필요
격납용기 냉각		원자로 건물내 재상전수 탱크	외부 침수
격납용기		+ 비상냉각 탱크 콘크리트 건물	철제 용기
기본모듈 배치		1 (stand alone)	12

IV. SMR 기술개발 현황

❖ 추진경과

- 한수원-KAERI 간 논의개시
 - SMR 개발방안 검토 (19.06~)
 - 한수원-KAERI간 협력방안 논의 (19.10)
- 혁신형 SMR 추진위원회(20.5~)
 - 혁신형 SMR 개념개발과제 착수
 - 산학연 협력체계 구축
- 혁신형 SMR 포럼 (20.09)
 - 산학연 기관대표, 비원자력계 포함
 - SMR 개발 필요성에 대한 공감대 형성
 - 개발방안 의견청취

→ 정부지원 및 규제연구 필요성 도출



IV. SMR 기술개발 현황

❖ 추진경과

- 혁신형 SMR 국회포럼 (21.4, 21.9, 22.4)
 - 공동위원장 : 이원욱의원, 김영식 의원
 - 주제 : SMR 개발필요성 및 개발방안
제도개선 및 범정부 지원방안
- 정부 예타 통과 (22.06)



❖ 개발 로드맵 : 2030년 이전 수출시장 진입



IV. SMR 기술개발 현황

❖ 안전성



CDF
< 1.0e-9 / RY



EPZ
< 부지경계



- 일체화 : 냉각재 상실사고 배제
- 피동 : 자연력을 이용한 안전계통
- 무전력 : 전력 불필요
- 단순화 : 고장가능성 저감



- 내진설계 0.5g
- 원자로용기 지하 배치
 - 주요기기 면진 설계



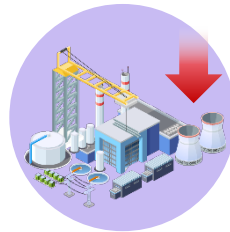
- 방사능 누출 저감
- 작은 원자로 + 낮은 사고 확률
 - 철제 격납용기 + 침수 설계

IV. SMR 기술개발 현황

❖ 경제성

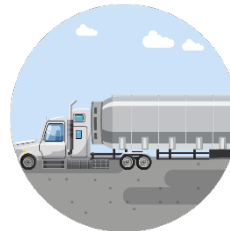
건설물량 대폭 감소

- 계통 단순화
- 동일 원자로건물내 다수모듈 배치



모듈화 및 공장 제작

- 육상운송 가능한 수준의 최적 설계
- 현장 작업 및 건설공기 대폭 감소



운영인력 대폭 감소

- 통합 주제어실 및 3인 운전
- 자율/자동운전 및 운전지원시스템
- 디지털 트윈 및 예측예방정비



건설단가 \$3,500/kWe
발전단가 \$65/MWh

최종 목표

대형원전 수준의
경제성 확보

IV. SMR 기술개발 현황

❖ 유연성

다목적 활용

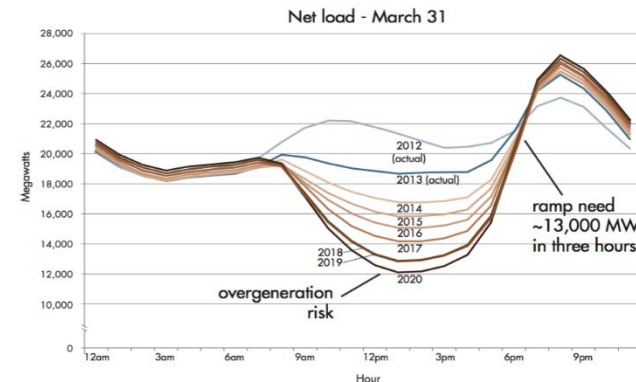
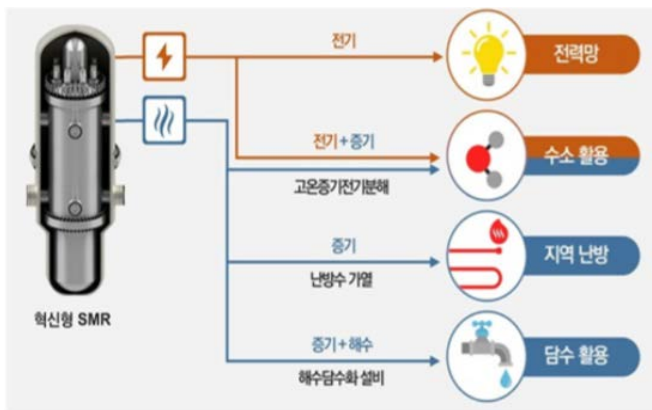


- 노후 석탄화력 대체, 분산형 전원
- 수소 생산 (고온 수전해)
- 공정열 및 난방열 공급, 해수 담수화 등

부하추종운전



- 재생에너지 증가에 따라, 시간대별 수요-공급 불일치 및 전력망 부하 가중
- 간헐성 보완을 위한 무탄소 보조전력 필요



III. 혁신형 SMR 설계개념

❖ 원자로 및 일차계통

■ 일체형 원자로

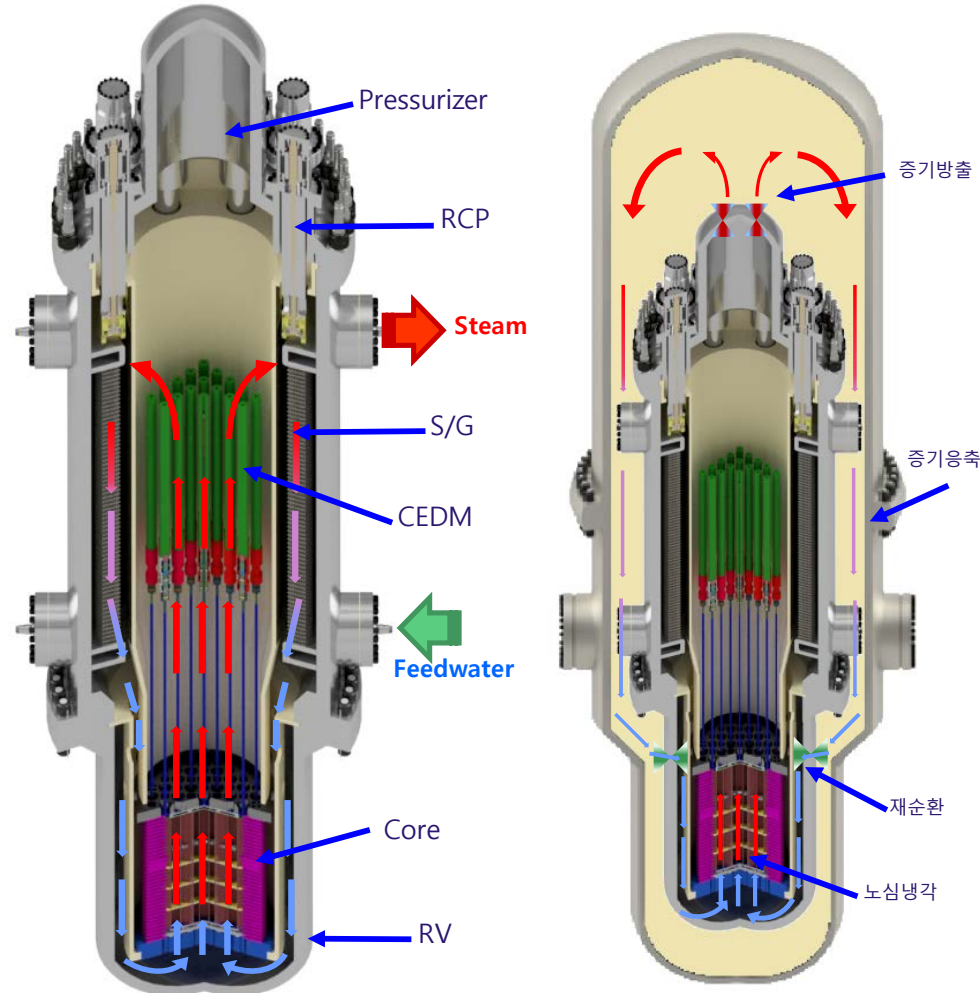
- LB-LOCA 배제
- 공장 제작, 건설공기 단축
- Canned motor RCP
- 콤팩트 나선형 SG 배치

■ 무붕산 노심 설계

- 540 MWth (17x17, 2.4m, 69 FAs)
- CVCS 계통 단순화, 폐기물 감소
- 장기냉각시 붕산석출/재임계 문제 해소
- 내장형 CRDM (제어봉 이탈사고 배제)

■ 피동 비상노심냉각

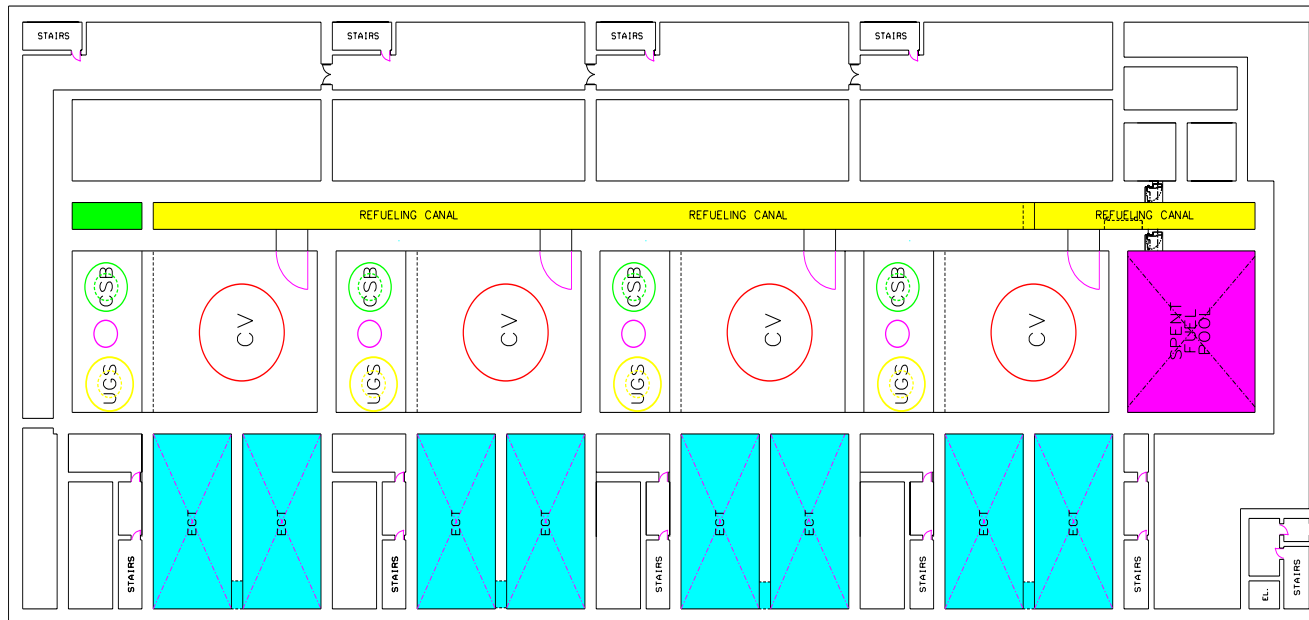
- 자연순환 냉각 (주입 탱크/펌프 배제)
 - 방출/재순환 밸브 (피동, 고신뢰도)
- 피동보조급수계통
- 격납용기 벽체를 통한 피동 냉각/감압 25



III. 혁신형 SMR 설계개념

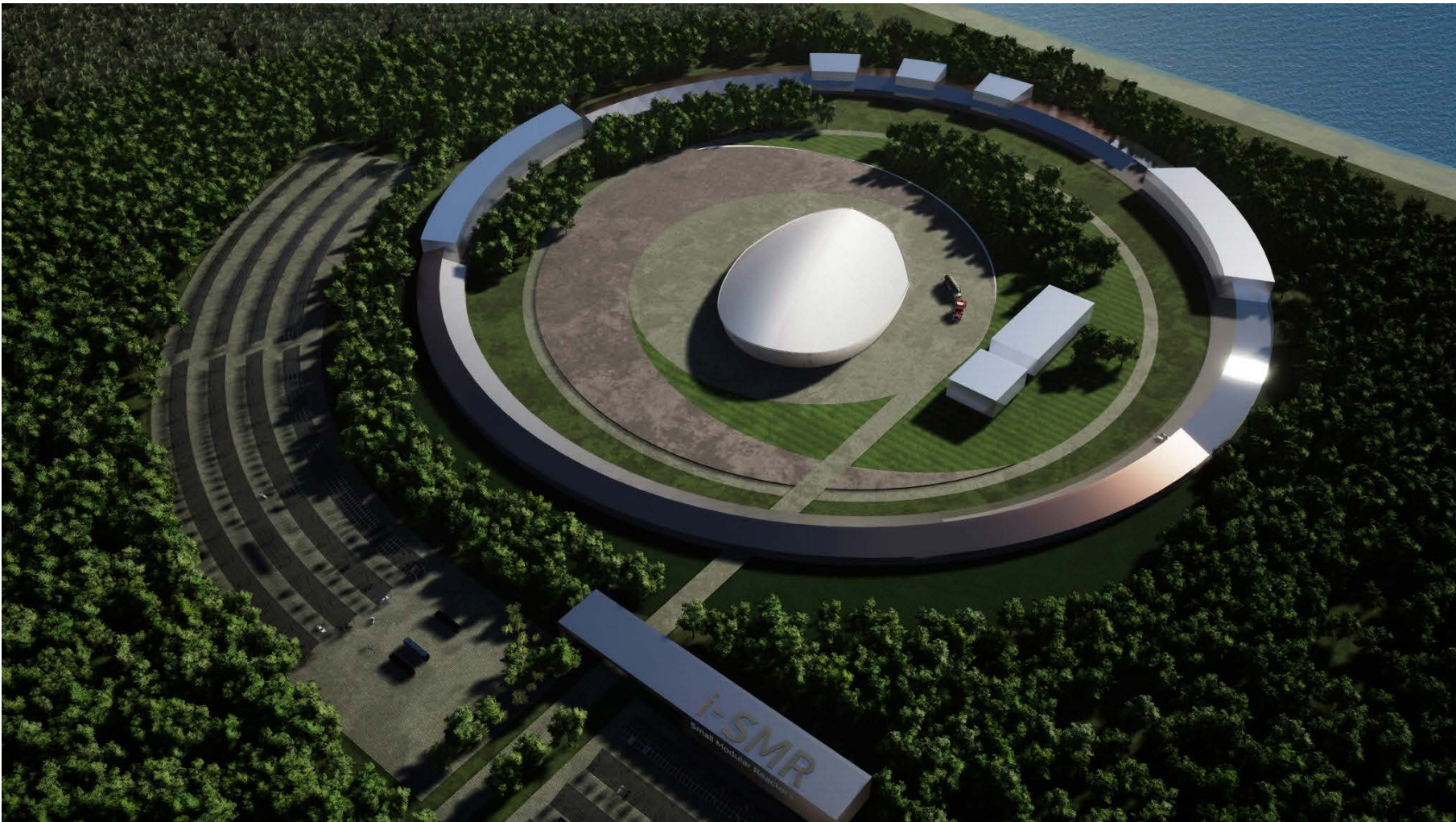
❖ 원자로건물 및 배치

- 콘크리트 원자로건물
 - 항공기 충돌 등 외부사고 대비
 - 비내압, SC구조 적용
- SFP 일체형 대형 냉각수조
 - Pool형 안전급 최종 열제거원
 - 물+공기 장기 냉각
- 4개 모듈 기본 배치
 - 건설 물량 저감, 운영 편의
 - 크레인 등 공유
- 안전급 펌프/전원 배제
 - Fail-safe 피동안전 개념 적용
 - 비안전급 AC/DC 설계



IV. SMR 기술개발 현황

❖ 혁신형 SMR 조감도



IV. 맺음말

❖ 국내외 환경변화

- 신정부 110대 국정과제 중 원자력 관련 7개 과제 천명
- 원자력을 포함한 K-Texonomy 초안 발표 (21.09)

❖ 원자력산업 미래전망

- 원자력발전량 약 2배 증가 전망
- 2050까지 650MWe 증설 전망

❖ 대형원전 기술개발 현황

- 주력노형인 APR1400 및 EU-APR 해외 인증
- 피동형 원전 핵심기술개발 수행

❖ SMR 기술개발 현황

- 전세계적으로 70여종의 SMR 개발 중
- 혁신형 SMR 기술개발을 통해 2030 수출 추진 목표로 진행 중

Q & A