

한국원자력학회-창원시 공동 SMR 워크숍

세계 SMR 개발 동향과 iSMR 성공 전략

심 형 진

서울대학교

2021년 10월 20일

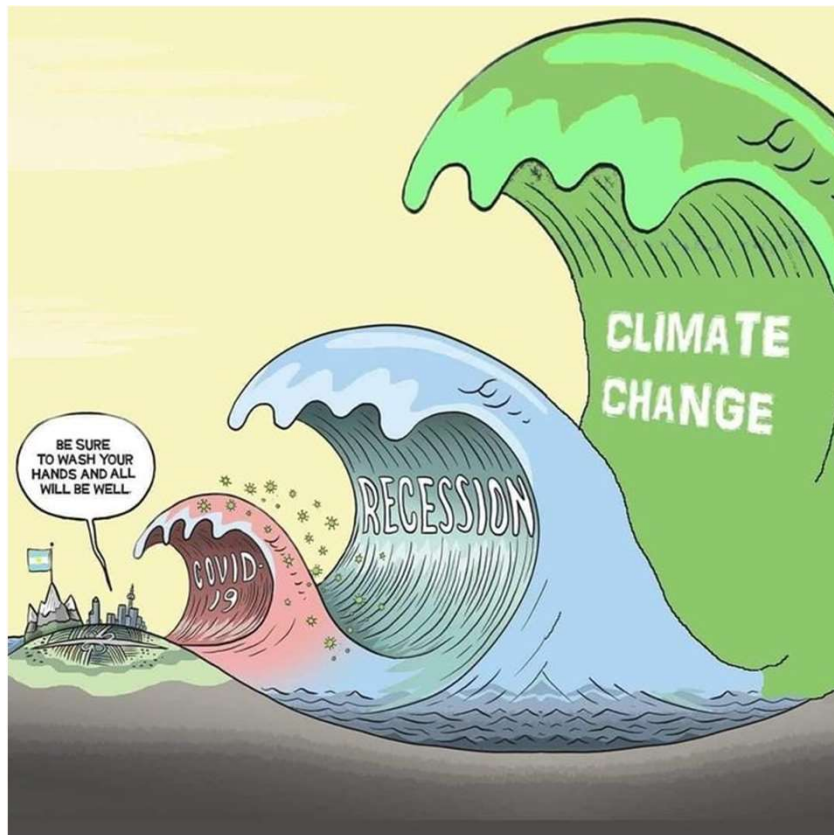
창원컨벤션센터



목 차

1. 탄소중립과 원자력, 그리고 SMR
2. 세계 SMR 개발 현황: 세계 원자력시장의 재편 관점에서
3. iSMR 개발 성공 전략
 - ① 경제성 확보 방안
 - ② 안전성 강화 전략
 - ③ 재생에너지와 연계전략
 - ④ SMART와의 차별화 전략
 - ⑤ 인허가 불확실성 해소 전략
4. 결론

1. SMR을 어느 관점에서 볼 것인가? – 인류최대 위협



Graeme MacKay @mackaycartoons

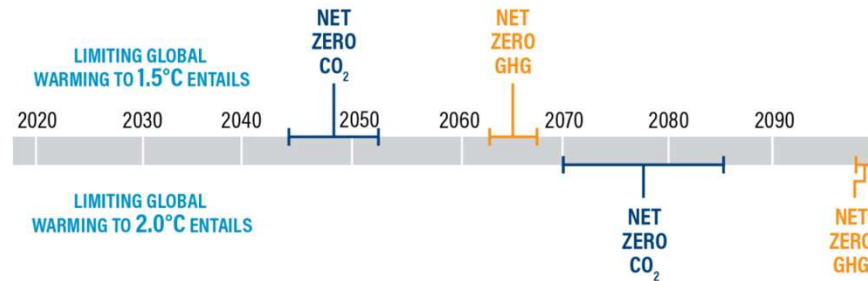
How do respondents perceive the impact ↑ and likelihood → of global risks?



“글로벌위험보고서 2021,” 세계경제포럼

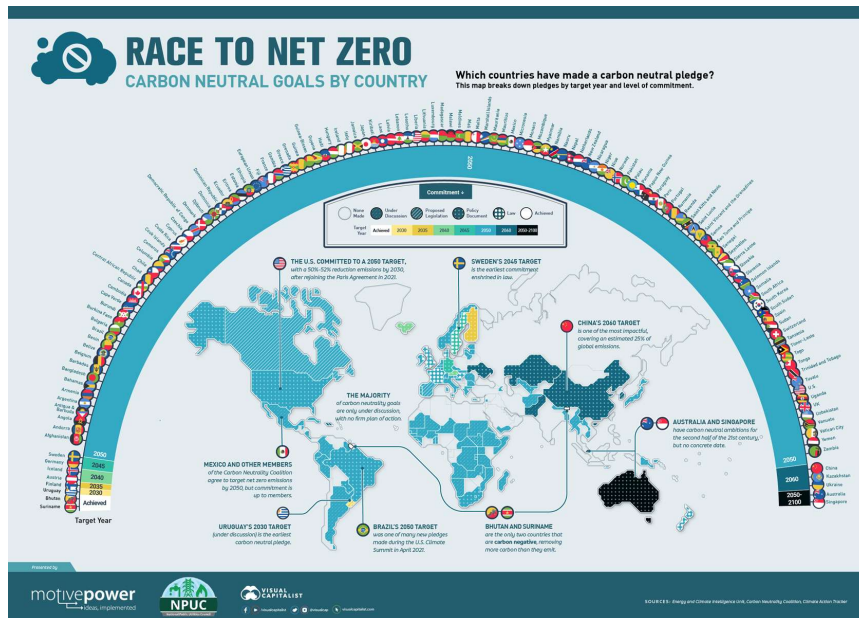
기후위기의 시대: 탄소중립을 향한 경주

Global timeline to reach net-zero emissions



Source: IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C

WORLD RESOURCES INSTITUTE



뉴스1 | 2021.08.19. | 네이버뉴스

전경련 "탄소중립 기본법 환노위 통과 유감...경제에 부담"

전국경제인연합회는 19일 국회 환경노동위원회가 '기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법안'(탄소중립기본법)을 통과시킨 것에 대해 유감을 표명했...

FKI 전국경제인연합회

최태원 "탄소중립, 기업 힘으로 역부족... 정부 적극적 지원 필요"

최태원 대한상공회의소 회장이 8일 홍남기 경제부총리를 만나 "탄소중립 기술 개발과 환경산업 육성에는 막대한 비용과 투자가 소요되는 만큼, 기업 혼자 힘으...

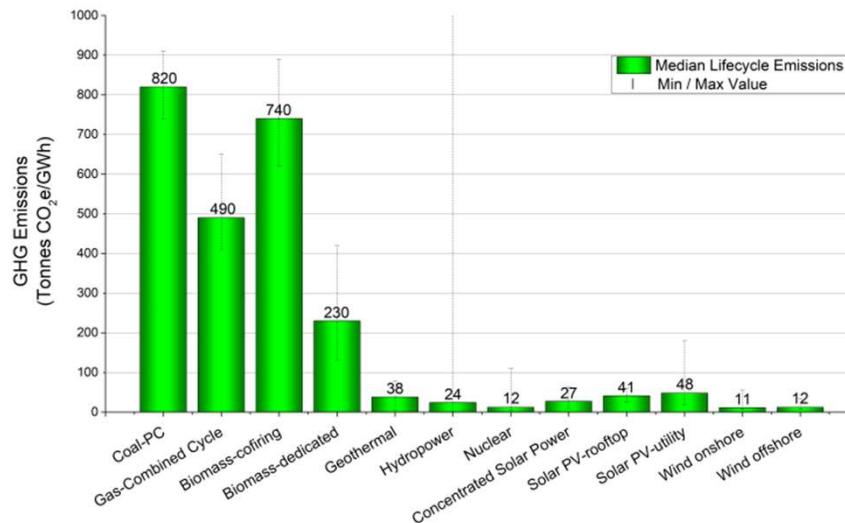
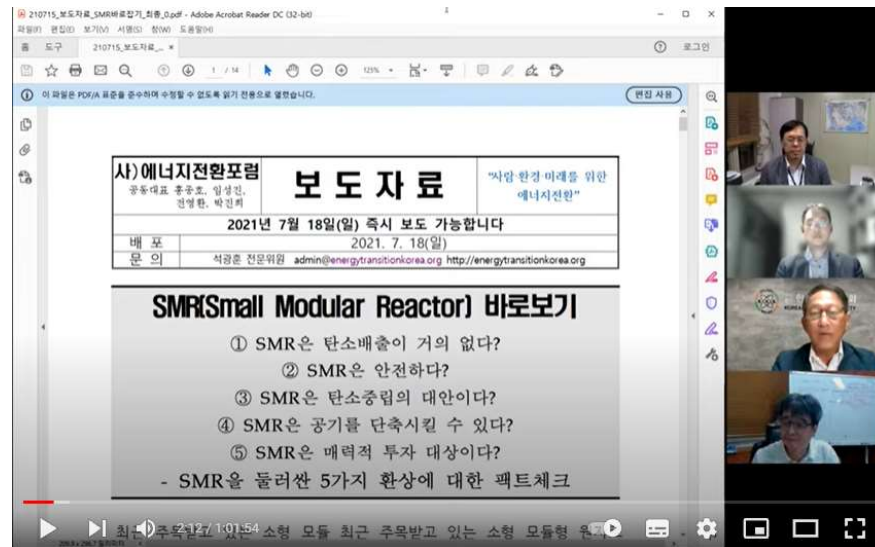


정부 "2030년까지 탄소 40% 줄여라"

환경부, 산업통상자원부 등 정부 관계부처 및 대통령 직속 2050 탄소중립위원회는 8일 탄소감축 목표치를 26.3%에서 40%로 대폭 상향하는 내용을 담은...



탄소중립 및 기후위기 대응 수단



Credit Suisse사 선정 2020년대
10대 기후 혁신 기술

- ✓ 소형모듈원자로
- ✓ 그린 수소
- ✓ 태양광 신기술
- ✓ 풍력 신기술
- ✓ 탄소중립 시멘트
- ✓ 그리드 기술
- ✓ 친환경 농업기술
- ✓ 식물성 고기 및 세포 배양육 기술
- ✓ 전기차
- ✓ 고용량 배터리 기술

소형모듈원전은 다르다...

← 전자신문 구독

주요뉴스 정치 경제 사회 생활 세계 IT 사설

전자신문

정부, 중·저준위 방폐물 관리 5000억원 투자, 한국형 SMR 개발 추진

입력2020.12.28. 오후 4:49

11 1

가

정부가 안전한 중·저준위 방폐물 관리를 위해 향후 5000억원을 투자한다. 한국형 소형 모듈 원자로 (SMR) 개발도 추진해 수출 시장을 공략한다.

← 서울경제 구독

서울경제

한정에 환경부 장관 “소형 모듈 원자로, 기존 원전과 분리해 생각해야”

입력2021.03.10. 오후 5:58 수정2021.03.10. 오후 10:34

조지원 기자 >

27 11

가

취임 후 첫 기자간담회에서 밝혀
“바이든·빌 게이츠 원전도 SMR”
“가덕도신공항 환경영향평가 원칙대로”

정세균 국무총리가 28일 정부서울청사에서 열린 제9차 원자핵위원회를 주재하며 발언하고 있다. [자료:연합뉴스]

한정에 환경부 장관이 10일 오전 환경부 대회의실에서 열린 부 출입 기자단과의 정책 간담회에서 주요 정책 현안 질의에 하고 있다. / 사진 제공=환경부

사) 에너지전환포럼 공동대표 홍창호, 임성진, 권영환, 박진희	보 도 자 료	“사람·환경·미래를 위한 에너지전환”
2021년 7월 18일(일) 즉시 보도 가능합니다		
배 포	2021. 7. 18(일)	
문 의	석광훈 전문위원 admin@energytransitionkorea.org http://energytransitionkorea.org	

SMR(Small Modular Reactor) 바로보기

- ① SMR은 탄소배출이 거의 없다?
- ② SMR은 안전하다?
- ③ SMR은 탄소중립의 대안이다?
- ④ SMR은 공기를 단축시킬 수 있다?
- ⑤ SMR은 매력적 투자 대상이다?

- SMR을 둘러싼 5가지 환상에 대한 팩트체크

- ## SMR(Small Modular Reactor) 바로보기
- ① SMR은 탄소배출이 거의 없다?
 - ② SMR은 안전하다?
 - ③ SMR은 탄소중립의 대안이다?
 - ④ SMR은 공기를 단축시킬 수 있다?
 - ⑤ SMR은 매력적 투자 대상이다?
- SMR을 둘러싼 5가지 환상에 대한 팩트체크

- 코리아리포트 2022: 다음 정부의 길
- 탄소 중립과 기후 적응

- 과제8: 탄소 중립을 위한 연구개발전략
 - 에너지 저장기술 - 배터리
 - 수소의 생산과 사용
 - 전력망 운용 혁신을 위한 기술과 제도 설계
 - 산업부문의 탈탄소화 기술
 - 학문간 연계 및 소통형 연구 주제 발굴 및 인재 양성
 - 소형모듈원전(SMR)과 핵융합 기술

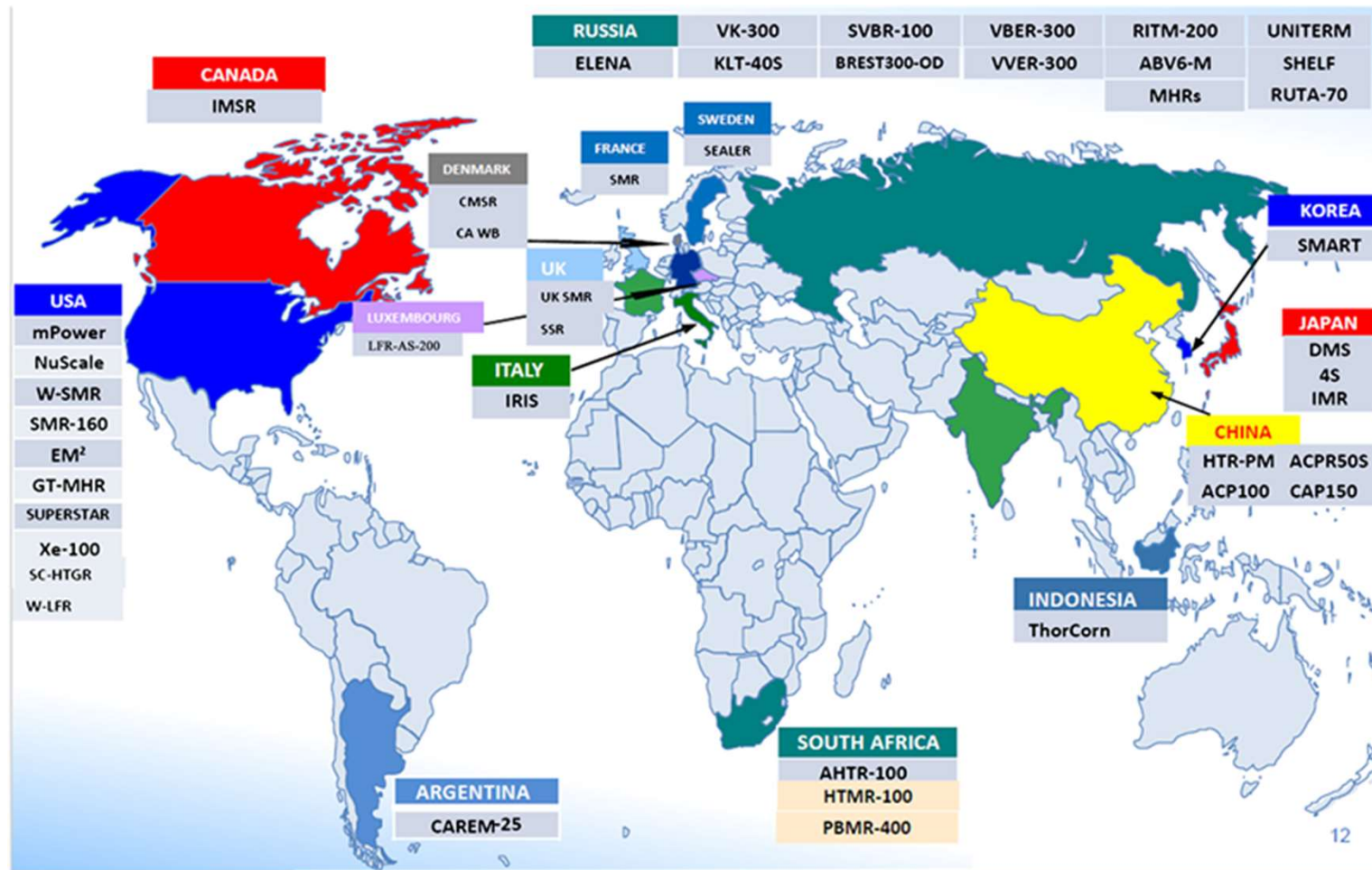
- 코리아리포트 2022: 다음 정부의 길
- 탄소 중립과 기후 적응

- 과제8: 탄소 중립을 위한 연구개발전략
 - 에너지 저장기술 - 배터리
 - 수소의 생산과 사용
 - 전력망 운용 혁신을 위한 기술과 제도 설계
 - 산업부문의 탈탄소화 기술
 - 학문간 연계 및 소통형 연구 주제 발굴 및 인재 양성
 - 소형모듈원전(SMR)과 핵융합 기술

■ 과제8: 탄소 중립을 위한 연구개발전략

- 과제8: 탄소 중립을 위한 연구개발전략
- 에너지 저장기술 - 배터리
 - 수소의 생산과 사용
 - 전력망 운용 혁신을 위한 기술과 제도 설계
 - 산업부문의 탈탄소화 기술
 - 학문간 연계 및 소통형 연구 주제 발굴 및 인재 양성
 - 소형모듈원전(SMR)과 핵융합 기술

2. 세계 SMR 개발 현황



Kroger, W., Sornette, D., & Ayoub, A. (2020). Towards Safer and More Sustainable Ways for Exploiting Nuclear Power. *World of Nuclear Science and Technology*, 10(3), 91-115.

세계 원전 시장의 재편 가능성

AP1000, 보글 3, 4호기 건설 현황

- ✓ 2013년 3월/11월 착공, 2016년/2017년 운영시작 목표
- ✓ 공사비 증대와 공기 지연 등으로 현재 2022년/2023년 운영허가 계획
- ✓ 두 개 호기 건설비는 총 250억 달러에 이를 것으로 예상됨.



<https://www.southerncompany.com/>

EPR, 플라망빌 3호기 건설 현황

- ✓ 2007년 11월 착공
- ✓ 공기 지연으로 현재 2022년 가동 목표
- ✓ 총 건설비는 191억 유로에 달할 것으로 예측됨.

Flamanville 3 startup pushed back to 2024

2 April 2020



Print Email

A decree published by the government in France's Official Journal on 25 March has postponed the deadline for the startup of unit 3 at France's Flamanville nuclear power plant until 2024.

This is 12 years later than the original target date for operation of the EPR reactor.

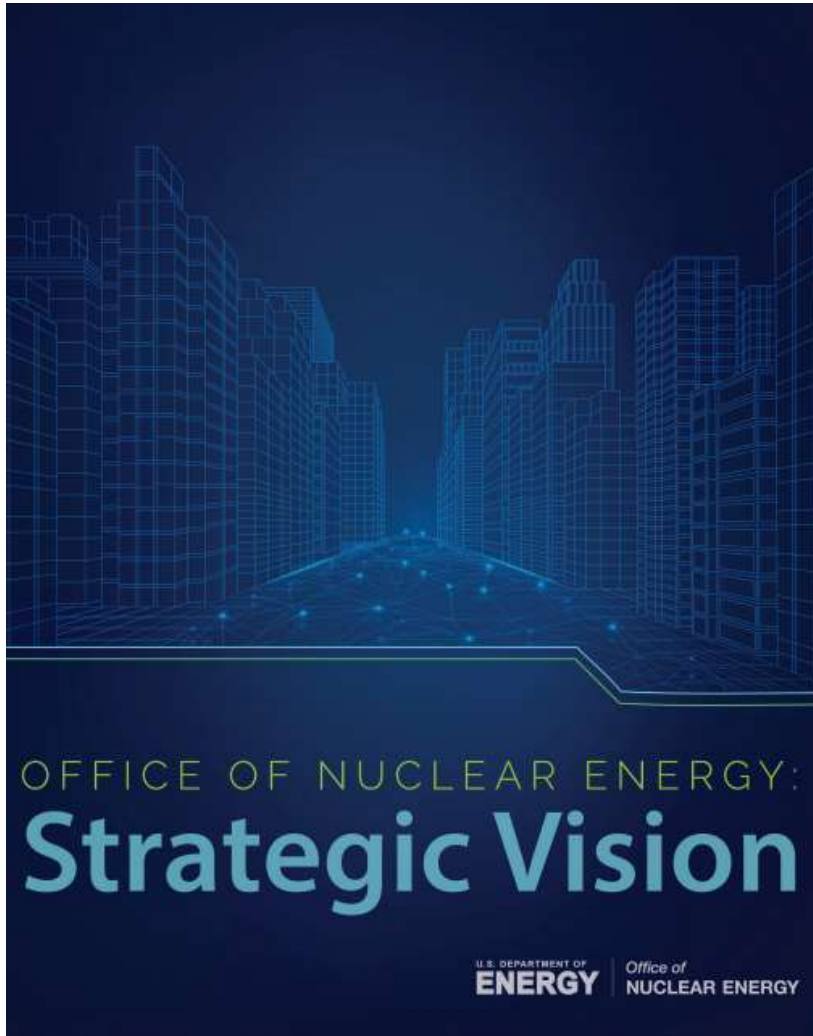
The original decree in April 2007 set a 10-year deadline and another in March 2017, extended the construction period to 13 years to early 2020.

APR1400, 바라카 원전 1-4호기 건설 현황

- ✓ 2012년 11월, 2013년 4월, 2014년 9월, 2015년 7월 착공
- ✓ 1호기 2021년 4월 상업운전 시작
- ✓ 총 건설비는 ~200억 달러 규모



미국 에너지부의 2021년 ‘원자력 전략 비전’ 발표



- 5대 원자력 전략 비전:
 - ① 기존 원전 계속 운전 유지
 - ② 차세대원자로 도입
 - ③ 차세대 연료주기 개발
 - ④ 미국의 원자력 리더십 유지
 - ⑤ 원자력국 조직역량 강화
- 용융염원자로, 고온가스로 등 차세대원자로 개발에 7년간 최대 32억 달러 투자
- 유타주전력회사조합(UAMPS)에서 수행하는 NuScale SMR 12기 건설 프로젝트에 13.5 억 달러를 지원함으로써 차세대 원자력시장을 목표로 함

NuScale 건설 계획

UAMPS downsizes NuScale SMR plans

Wed, Jul 21, 2021, 9:06PM | Nuclear News



A still image from a three-part video tour of NuScale's facilities. (Photos: NuScale Power)

UAMPS plans to submit the combined license application (COLA) to the NRC in 2024.

"Construction start will depend more on how long the COLA review takes, but the change from 12 modules to six is not expected to delay the overall schedule. The first module is still scheduled to be operational in 2029, and the full plant in 2030."

‘프랑스 2030’ SMR 개발 지원

이투데이

‘프랑스 2030’, 소형 원자로·전기차 등에 41조 원 투자...원전 축소 대신 확대

입력 2021-10-13 15:44

변호선 기자 구독하기

제보하기

가 가 +

脫탄소·에너지 불안 속 ‘소형 모듈 원자로’ 도입 방침 강조
에너지 대란에 원자력 재평가
프랑스 주도 10개국 장관 “유럽 원전 필요” 공동 기고
야당선 “반 년 뒤 대선 겨냥한 선거 캠페인” 비판



▲에마누엘 마크롱 프랑스 대통령이 12일(현지시간) 파리 엘리제궁에서 ‘프랑스 2030’ 투자 계획을 발표하고 있다. 연합뉴스

COMMODITIES NEWS SEPTEMBER 17, 2019 / 10:19 PM / UPDATED 2 YEARS AGO

EDF and Westinghouse in talks to develop SMR nuclear reactor

By Geert De Clercq 4 MIN READ

PARIS (Reuters) - French state-controlled utility EDF and French nuclear state agency CEA are in talks with U.S. nuclear reactor builder Westinghouse to develop a Small Modular Reactor (SMR), a group of French companies involved in the project said on Tuesday.

In a joint statement by CEA, EDF, defense firm Naval Group and nuclear propulsion specialist TechnicAtome, they said their jointly developed “Nuward” SMR project aims to build a 300-400 megawatt (MW) pressurized water reactor by the late 2020s and that it is open to international cooperation.



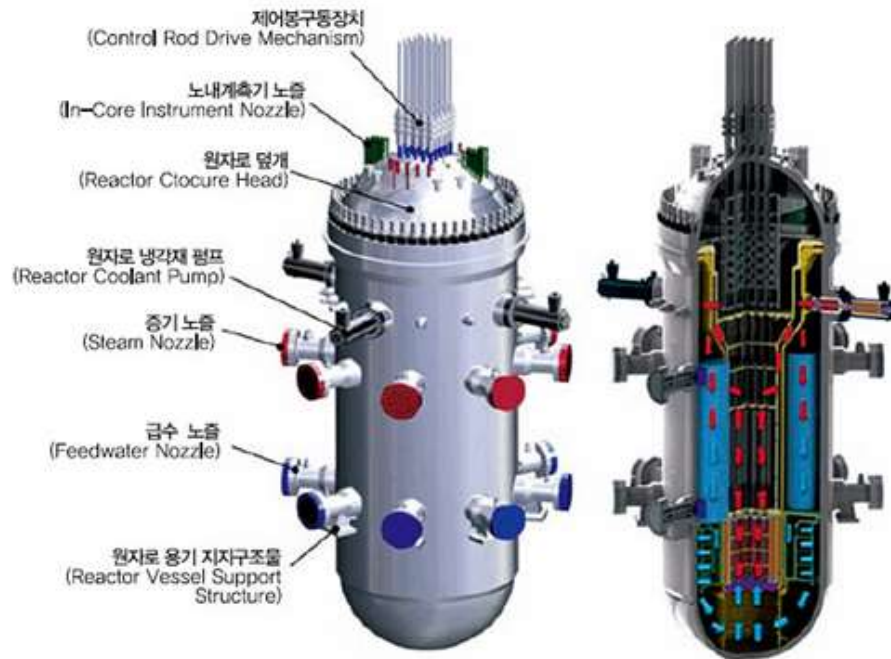
https://www.world-nuclear-news.org/NN_Deep_sea_fission_2001111.html

3. iSMR 개발 성공 전략

SMR, “크기만 작아진 핵발전소”?

- ① 경제성 확보 방안
- ② 안전성 강화 전략
- ③ 재생에너지와 연계전략
- ④ SMART와의 차별화 전략
- ⑤ 인허가 불확실성 해소 전략

SMART의 경제성?

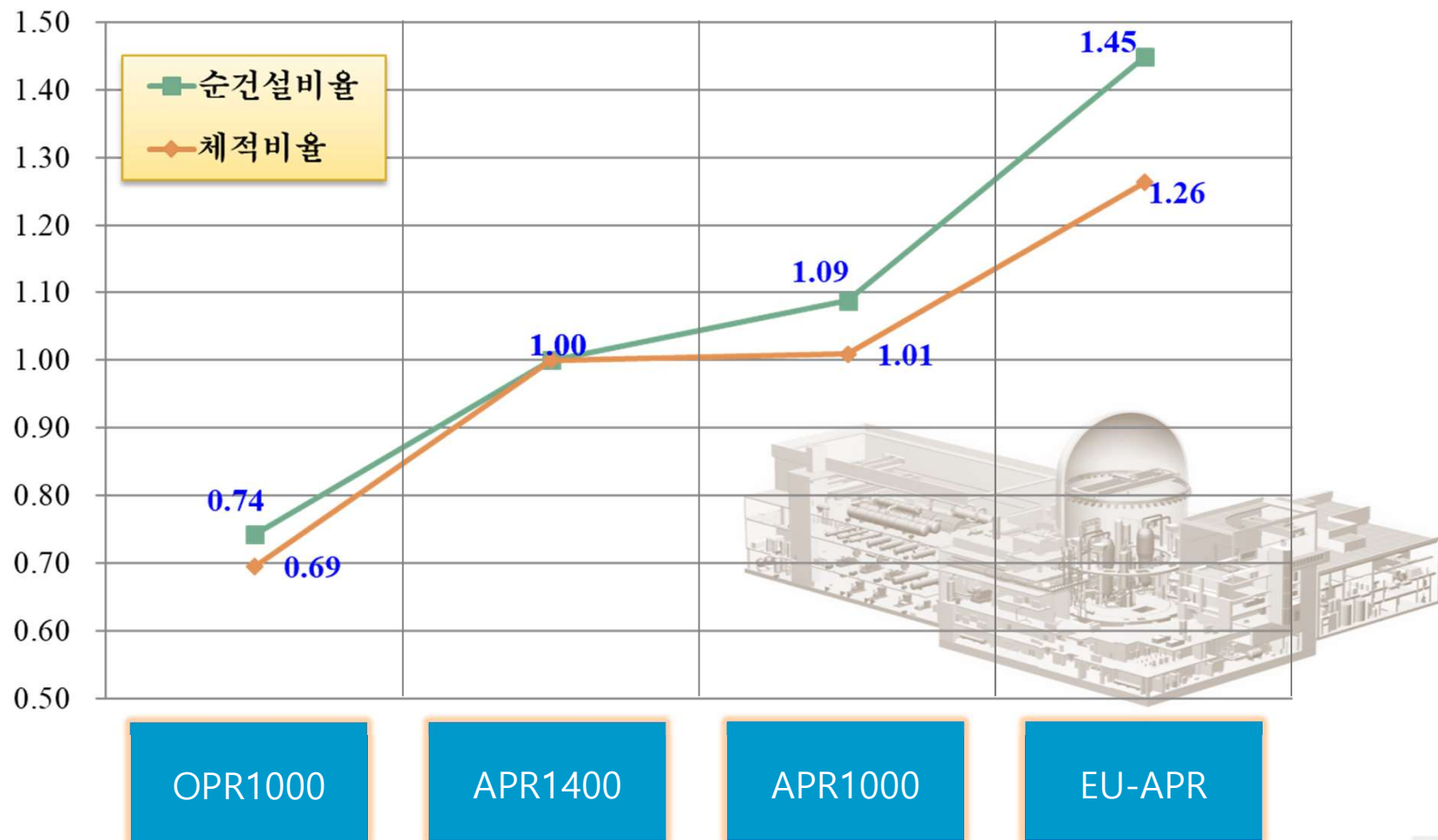


- '97.07-'02.03 : SMART-330 기본설계
- '02.07-'06.02 : SMART 실증로(SMART-P, 65MWth) 기본설계
- '07.07-'12.07 : SMART 표준설계와 기술검증 완료
- '12.05 : **소형 일체형원자로 중 세계 최초로 표준설계인가 획득**
- '12.03-'16.02 : 피동잔열제거계통, 피동안전주입계통, 피동원자로건물냉각계통에 대한 설계 완료, 검증시험 수행
- '15.09 : 한국-사우디아라비아 SMART 건설전 설계사업(PPE) 협약 체결
- '15.12-'18.11 : PPE 사업 종료

높은 인허가 적합성으로 일체형원자로 중 상용화 단계가 가장 앞서 있음
혁신적 시스템 기술은 상대적으로 배제

SMART 건설비 = ???

계통 최적화 및 건물체적 축소를 통한 경제성 확보

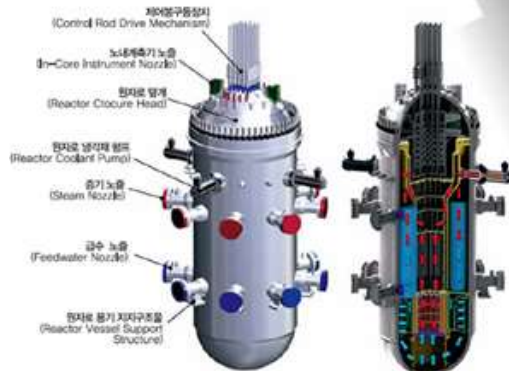


“경제성 TTR 요건 만족을 위한 기준설정 및 추진방안에 관한 제언,” KEPCO E&C, 2021/06.

①경제성 확보 전략: “팀 코리아” 전략



산업계의 기술력



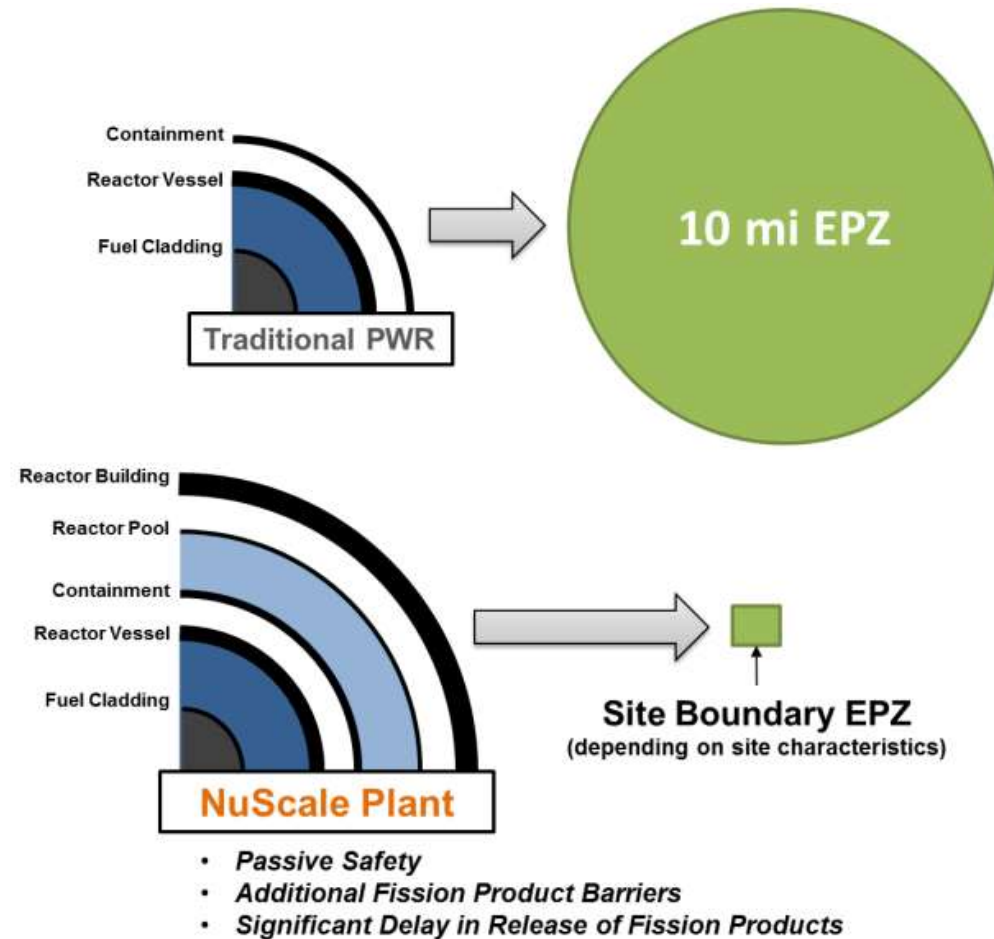
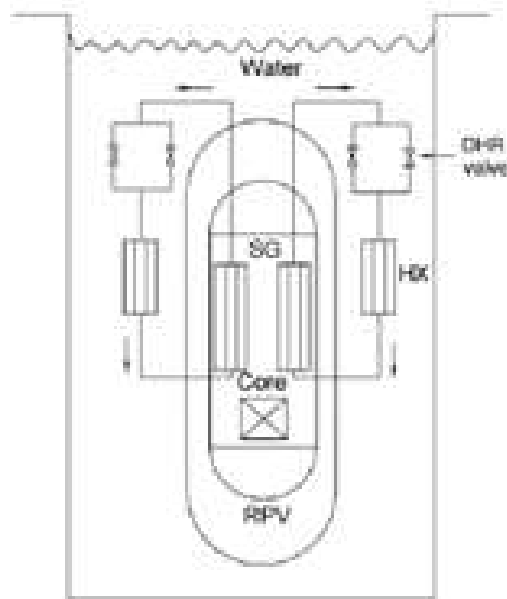
연구계의 기술력

Team Korea



*iSMR 건설비 목표= <4000 USD/kWe
건설공기(F/C~F/L)=<24개월*

② iSMR 안전성 강화 전략



NuScale Power, "NuScale SMR Technology," 2014.

$$\text{노심손상빈도} = < 1.0 \times 10^{-9} / \text{MY}$$

③ 재생에너지 연계 전략

환경단체의 주장

탄소중립 실현을 위해서는 전원 섹터에서 태양광, 풍력 등 신재생에너지의 확대는 불가피하며, 이때 원자력은 경직성 전원이라 사용이 제한될 수 밖에 없다!

재생에너지+ESS/수소 vs. 재생에너지+일반발전기



일반발전기 조합이 경제적!

재생에너지+가스발전 vs. 재생에너지+원자력발전



가스발전 조합은 탈탄소 전략에 위배!

재생에너지+원자력발전



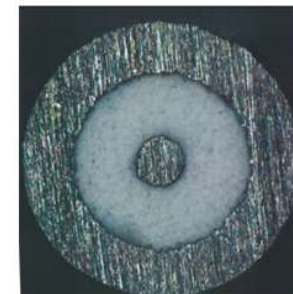
재생에너지의 간헐성 보완 가능?

원전의 부하추종운전 등 탄력운전 기능이 관건!

SMR의 고유한 제어 용이성
+ 무붕산 노심 구현

④ SMART와의 차별화 전략

계통/기기	SMART	i-SMR
핵연료/노심		
핵연료봉		
가연성독봉		
제어봉구동장치		
반응도 제어 봉산(액체)		
안전계통		
격납용기냉각계통		
격납용기 (물리적 방어)		
제어/보호/감시/운전		
제어실		
운전원 수		
부하추종		
종합설계/보조계통/터빈발전기		
원자로용기 배치		
순차적 모듈화 가능		



⑤ 인허가 불확실성 해소 전략

입증된 기술 vs. 혁신기술

원자력혁신역량법(NEICA, '18.9월)

- ✓ 인허가 심사 비용에 대해 비용분담보조금 제도를 만들어 인허가 비용 부담을 경감
- ✓ SMR을 포함한 첨단 원자로의 혁신기술개발 연구 활동 증진을 위해 민간 SMR 개발사업자가 국립연구소와 협력하여 국립연구소 부지 및 에너지부 부지에서 실증로를 건설할 수 있도록 지원

원자력혁신현대화법(NEIMA, '19.1월)

- ✓ 예측 가능하고 효율적이며 적기에 인허가 심사가 이루어질 수 있도록 원자력규제위원회(NRC)의 규제개선을 법으로 공식화
- ✓ 2027년 12월 31일까지 원자력규제위원회는 신형원자로 인허가 신청자를 위한 신기술이 반영된 규제체계를 수립하도록 명시

(가칭)원자력혁신특별법

- ✓ iSMR 등 신형 원자력시스템에 대한 예측 가능하고 효율적이며 적기에 인허가 심사가 이루어질 수 있도록 선진 인허가체계 구축 명문화

- ✓ 인허가기관과의 협의체 운영
- ✓ SMR 규제기술 연구개발 조기 착수

결론

- *iSMR의 경쟁상대는 NuScale이 아닌 APR1400!*

구분	대형 원전	iSMR
노심 출력	1,400 MWe	(예시) 680 MWe (170 MWe × 4 기)
노심손상빈도	$2.25 \times 10^{-6} / \text{RY}$ ($1.0 \times 10^{-5} / \text{RY}$ 이하)	$< 1.0 \times 10^{-9} / \text{MY}$ 이하
제어실	호기별 별도설치	통합제어실 (4개 모듈)
건설공기	48개월	24개월
건설비	약 5조원 (UAE 수출원전기준)	약 3조원 이하 (\$4,000/kWe 이하)

- 산·학·연의 최고 전문가들이 합심하고, 정부가 이를 지원하는 ‘Team Korea’를 구성함으로써 iSMR 개발에 성공한다면, 2030년대 우리나라 원자력은 새로운 비상을 맞을 수 있을 것임.