

국내외 소형 모듈원전 (SMR)

개발 논리의 배경과 실상

석광훈박사
에너지전환포럼 전문위원

국내외 소형모듈원전(SMR)정책의 배경과 경제적·기술적 문제

석광훈 에너지전환포럼 전문위원
(과학기술정책학 박사)

2021.5.24.

발제 목차

1. SMR개발논리의 기술적 배경: 대형원전의 몰락
2. 소형모듈원전(SMR)의 개념
3. 중소형원전 개발경험과 주요문제
4. 국내에서 추진되는 SMR사업과 실상
5. 요약 및 제안

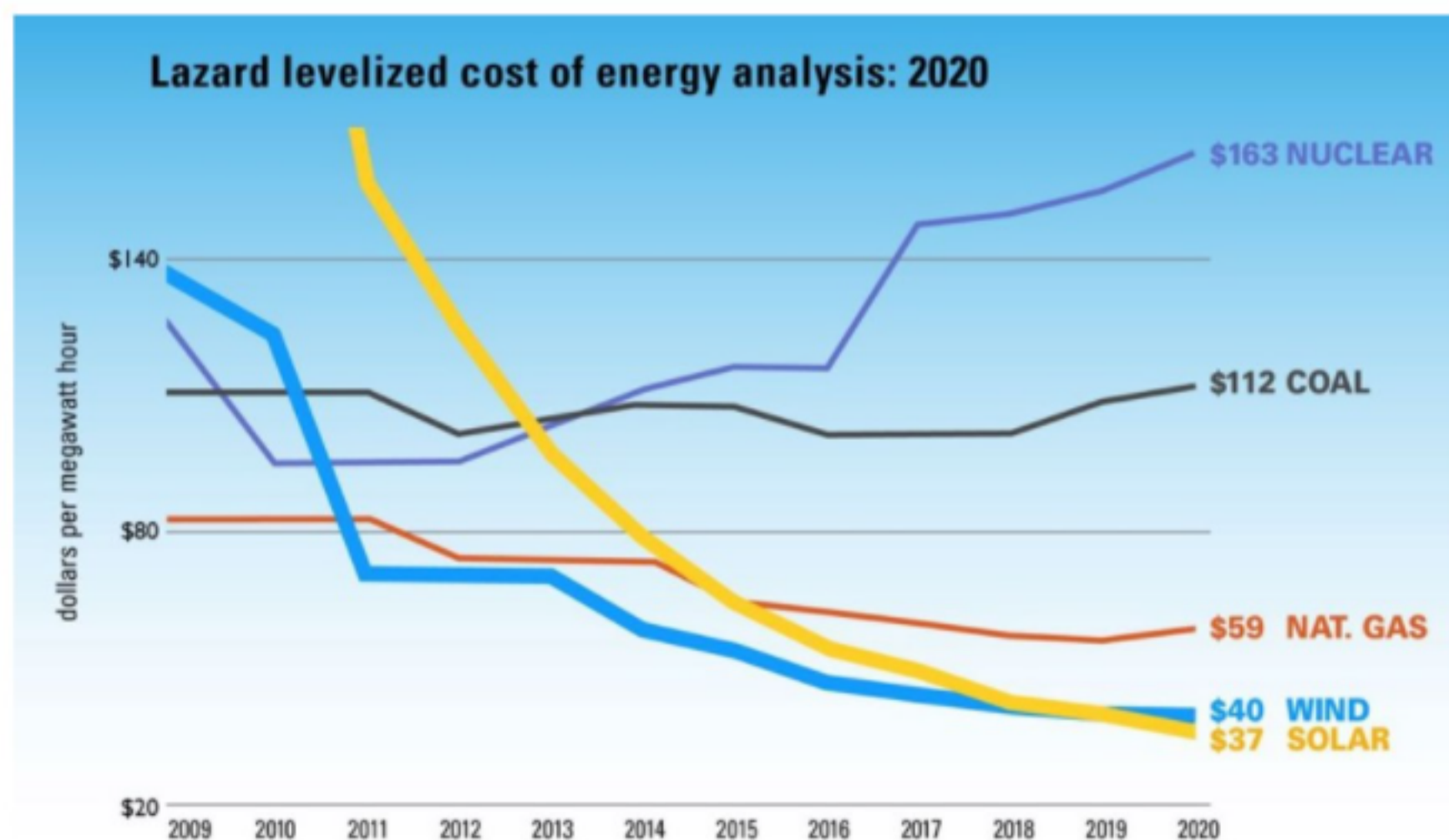
1.SMR개발논리의 기술적 배경

재생에너지 증가와 대형원전의 몰락

3

미국 에너지원별 균등화발전원가 변화추세

(미국 전력시장 기준, 풍력 \$40/MWh, 태양광 \$37/MWh, 대형원전 \$163/MWh)

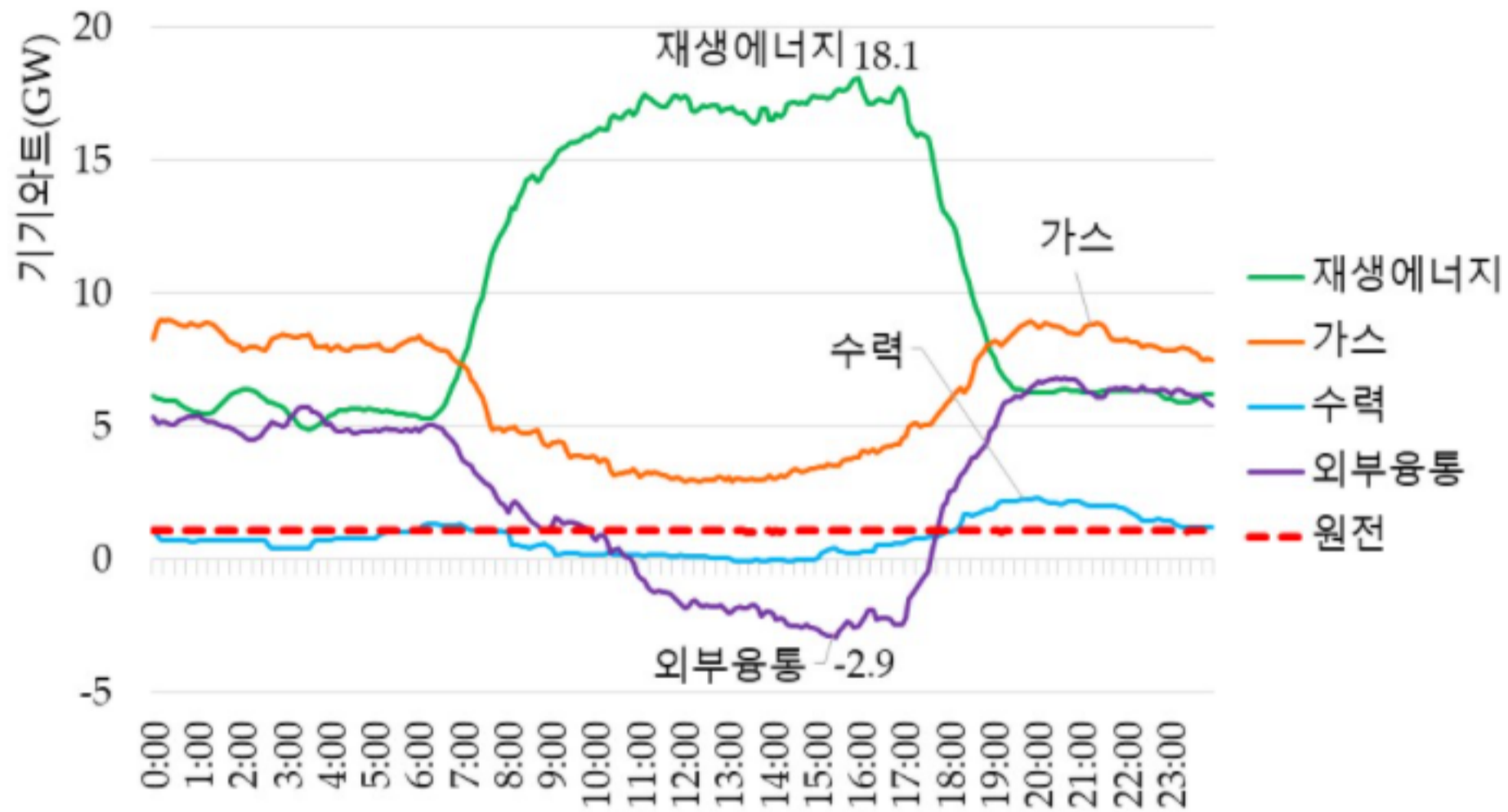


출처: LAZARD LCOE Report 2020

4

캘리포니아의 태양광과 전력공급패턴

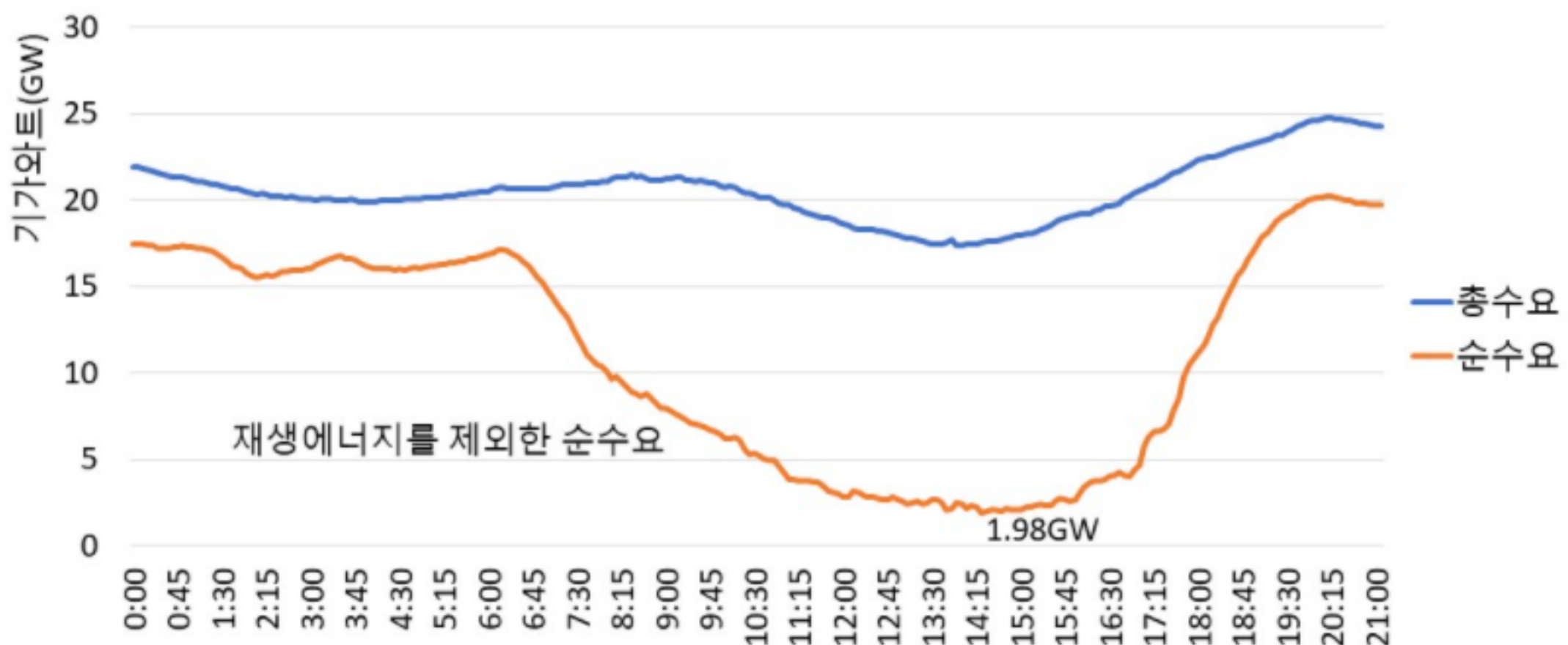
(4월24일 실적)



참고: 캘리포니아 독립전력계통(CAISO), Supply Trend

5

수요측 기준에서 CAISO 4월24일 실적:
순수요 최저선은 이미 원전설비용량(2.25GW)아래에 형성
해당 원전(디아블로 1,2호기)은 2024년, 2025년 폐쇄예정

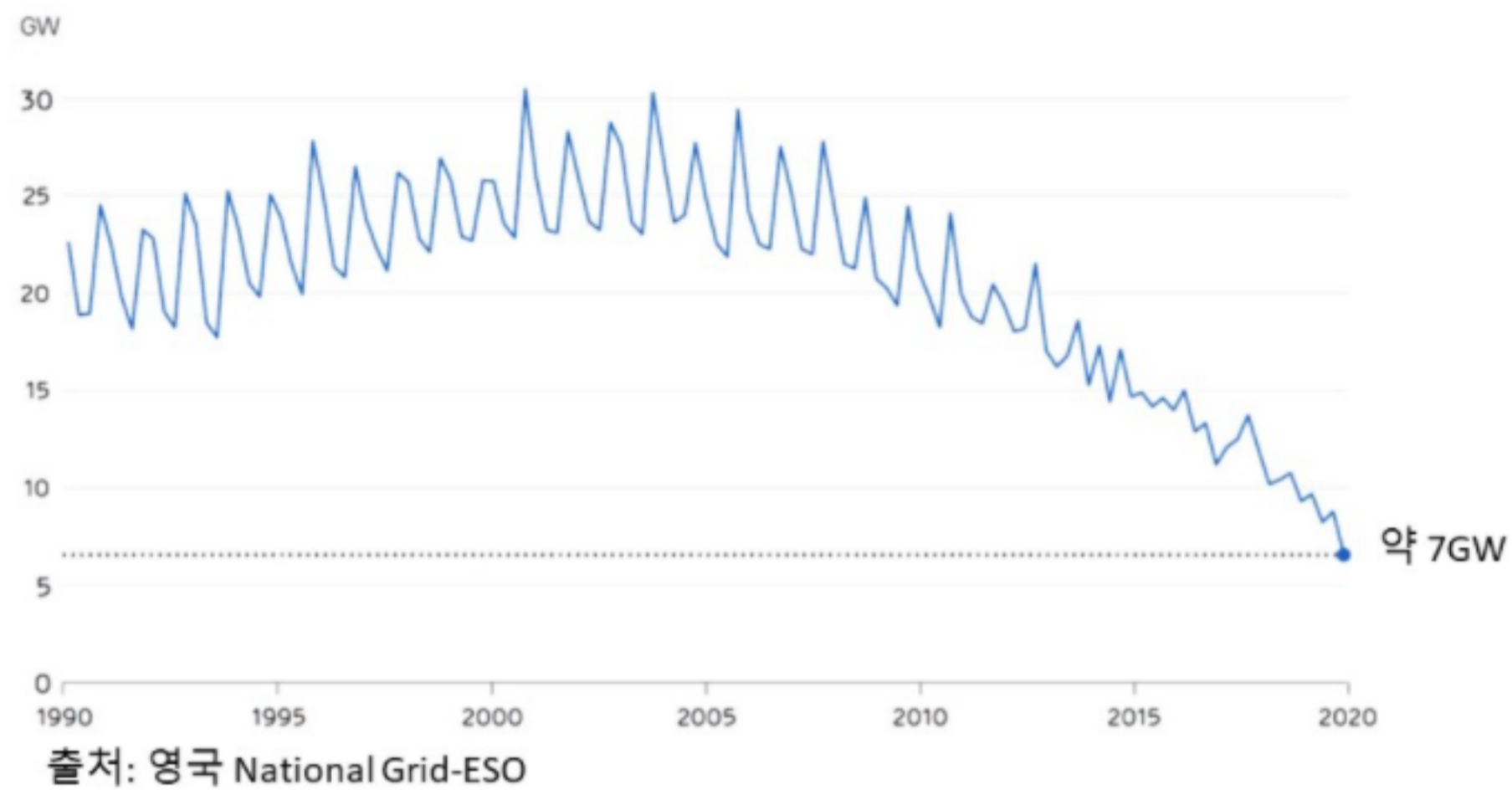


참고: 캘리포니아 독립전력계통(CAISO), Net Demand Trend

6

영국 전력계통의 분기별 최저 순수요 추세

※순수요 = 총수요 - 풍력·태양광



7

전력 순수요 하락추세와 원전의 문제

- 영국 전력당국(NG-ESO), 지난해 5개월간 원전출력 50%감발운전
 - 사이즈웰-B원전(1.2GW) 5-9월 50%출력감발, 이중7-9월은 가동정지
 - 풍력증가(공급비중24.8%)로 순수요 하락, 대형원전 불시정지시 정전위험
- RE비중 6.5%에 불과한 국내도 휴일주말 원전 불시정지 영향증대
 - 5월29일 신고리4호기(1.5GW) 불시정지로 순간 주파수 59.79Hz까지 하락
 - 915정전(2011년) 59.4Hz→순환단전, 텍사스정전도 59.4Hz →순환단전
- 현재 최대원전인 신고리3,4호기를 연휴마다 20%출력 감발중
 - 재생에너지증가로 5,6년후 주말에도, 2030년대 평일에도 출력감발 전망
 - 신규 원전 건설은 물론 가동중 원전도 수익보장 불가

8

미국의 재생에너지증가와 원전조기폐쇄 추세

		설비용량 (MW)	면허받은 운영기한	실제 폐쇄년도	폐쇄시점 가동년수
최근 폐쇄된 원전	포트 칼훈 1	482	2033	2016	43년
	오이스터 크릭	619	2029	2018	48년
	필그림 1	677	2031	2019	46년
	드리마일 1	819	2034	2019	44년
	인디언 포인트 2	1,020	2024	2020	45년
	두웨인 아놀드	601	2034	2020	46년
	인디언 포인트 3	1,040	2025	2021.4.	44년
올해중 폐쇄예정 원전	바이런 1	1,220	2044	2021	37년
	바이런 2	1,220	2046	2021	35년
	드레스덴 2	890	2030	2021	52년
	드레스덴 3	890	2031	2021	51년

참고: 미국 에너지정보청(US EIA)

9

2. 소형모듈원전(SMR)의 개념

10

소형모듈원전(SMR)의 개념

- 소형: 300MW이하로 “대형원전의 건설비용 감축”주장
 - 그러나 규모가 작아질수록 건설단가는 상승
 - 최근 북미 틈새시장(오지, 탄광)을 공략하고 있으나, 전력수요 과부족
- 모듈: 공장 대량생산 및 조립을 통해 부지현장 공기 대폭 단축
 - 원전의 경제성을 결정해온 ‘규모의 경제’를 포기하는 대신 ‘양산의 경제(Economy of Mass Production)’를 추구
 - 그러나 ‘양산의 경제’ 구현에 필요한 수백기 이상의 수주확보가 관건
- 세계적으로 70여종의 SMR이 제안되고 있지만, 구체적인 설계개발로 진척된 경우는 미국 뉴스케일사(50MW) 사례가 유일

11

SMR이 모방하려는 사례: 소형가스터빈

- GE, 60MW 이하 가스터빈만 세계적으로 5,300기 판매실적
- 항공기엔진 설계를 발전용 및 선박용으로 개량
- 대부분 공장에서 제조후 부지로 수송, 조립(조립설치 11일소요)
- 우수한 응답성으로 재생에너지 증가와 전력수요공급 변동이 큰 지역에서 판매수요가 높음
- 그러나 SMR이 유사한 수주, 설계완성도, 경제성 확보 불가
- 사진: 최근 남호주 설치사례



미국 안전규제기관(NRC)에 제출된 SMR설계

공급자	설계명 및 냉각방식	용량(MW)	심사개시	심사상황
BWXT(B&W, Bechtel)	mPower 지하매설형 가압경수로	180 (초기 120)	2009	신청전 심사(중단)
SMR, LLC. (Holtec Int'l)	SMR-160 가압형경수로	160	2012	신청전 심사
GE-Hitachi	BWRX-300 비등형경수로	300	2019	신청전 심사
NuScale Power, LLC	NuScale 일체형 가압경수로	50	2020.1.	조건부허가 (증기발생기문제)
	NPM-20 일체형 가압경수로	77	2022 신청계획	-

※ 미국 에너지부는 이와 별도로 2020년 X-Energy의 고온가스냉각로 및 Terra Power의 소듐냉각 고속로 설계개발에 각각 \$1.6억, \$8천만을 지원, 2027년까지 풀스케일 상용원전 가동 목표

13

3. 중소형원전 개발경험과 문제

경제성 문제·용량증대·설계변경·공기지연·비용증가

14

SMR 미래전망에 놓인 2대 문제

□규모의 경제 포기에 따른 경제성 확보문제

- OECD 주요시장에서 규모의 경제를 통해 경쟁해온 대형원전도 이미 가스복합발전과 재생에너지 대비 경제성 완전히 상실
- '규모경제' 포기과 '양산경제'에 필요한 수요 부족사이 진퇴양난

□변동성 재생에너지(VRE) 증가추세와 유연성 확보문제

- 영국(NG-ESO), 캘리포니아(CAISO), 미국중부전력계통(MISO)에서 재생에너지 증가로 인해 기존 대형 원전들의 출력저감운전, 조기폐쇄
- 영국은 재생에너지 증가(2020, 풍력 24.8%, 태양광 4.4%)에 따라 계통안정성 확보차원에서 2020년 사이즈웰-B 원전 5개월간 출력50%저감운전
- 미국 CAISO, MISO는 각각 태양광, 풍력의 증가로 원전 조기폐쇄 진행중

15

주요 SMR 설계의 유연성 확보구상과 실상

- 빌 게이츠의 소듐냉각 고속로: 용융염 저장탱크를 별도로 건설해 전력망 여건에 따라 잉여전력을 열에너지로 저장 -> 추후발전
 - 용융염을 사용하는 집중형 태양열발전(CSP)은 태양광발전 (\$31~42/MWh) 대비 4배(\$126~156/MWh)로 용융염은 비용증대 요인 (Lazard 2020)
- X-Energy의 고온가스냉각로: 전력망 여건에 따라 잉여에너지를 고온증기로 전환 열병합발전 또는 수소생산
 - 실증로를 통한 검증없이 2027년까지 상용화 목표(최근 2030년으로 연기)
 - 미국 포트 세인트브레인(330MW, 1979~89)원전이 유일한 상용화사례이나, 냉각설비부식, 변압기손상, 잦은 불시정지, 안전문제로 조기폐쇄
- 기타 다른 SMR 설계개념들은 명확한 유연성 확보방안 부재

16

'나트륨(소듐)원전' 잉여전력 용융염 저장의 비용문제

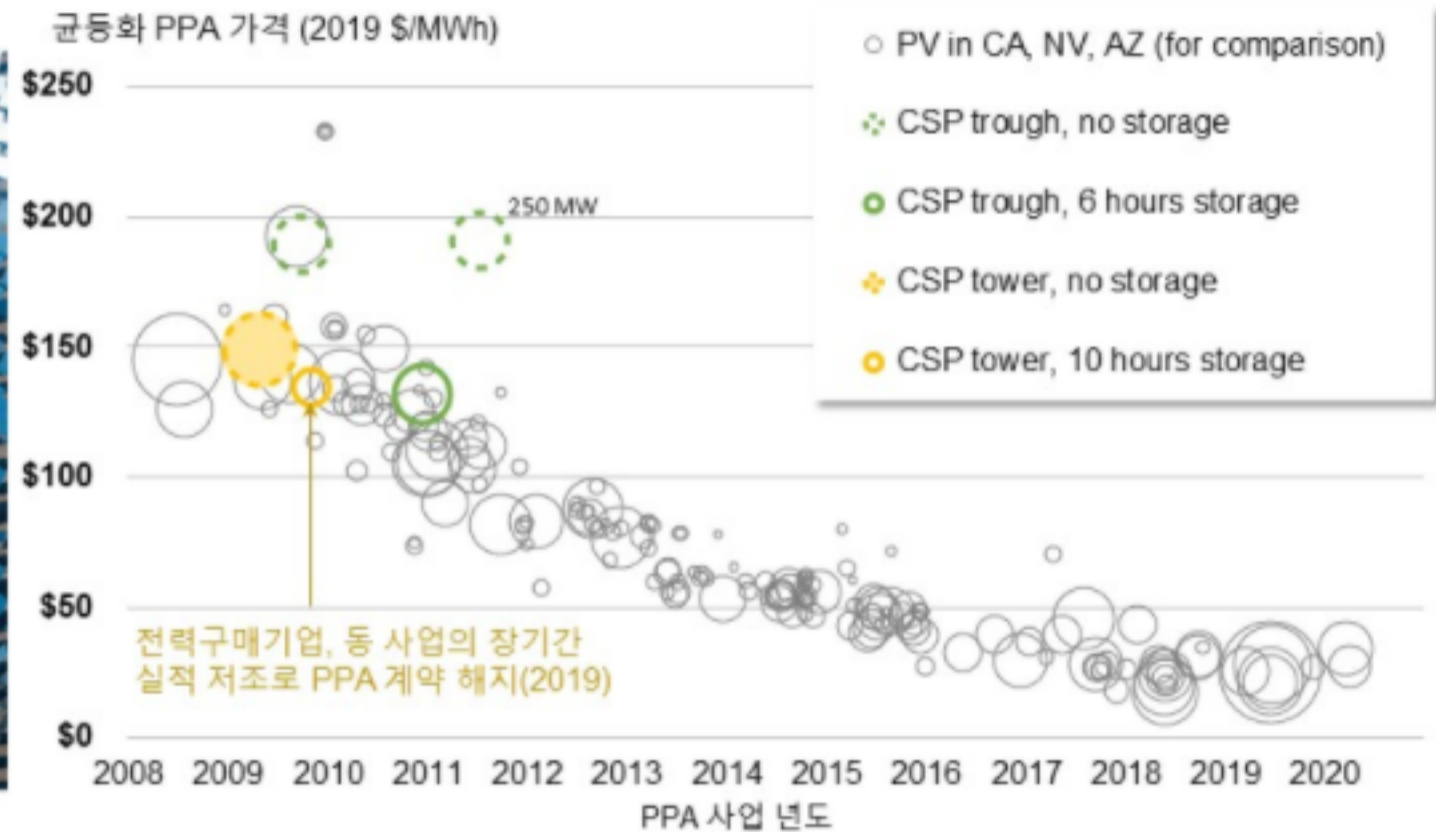
용융염으로 열을 전달 및 저장하는 CSP는 용융염의 비경제성 증명 (태양광대비 비용 4배)
 세계CSP용량의 75%를 차지하는 미국과 스페인은 경제성문제로 2012년 이후 신규CSP 중단

타워형 CSP와 용융염 저장탱크 전경



출처: Crescent Dunes Solar Energy Project, Nevada

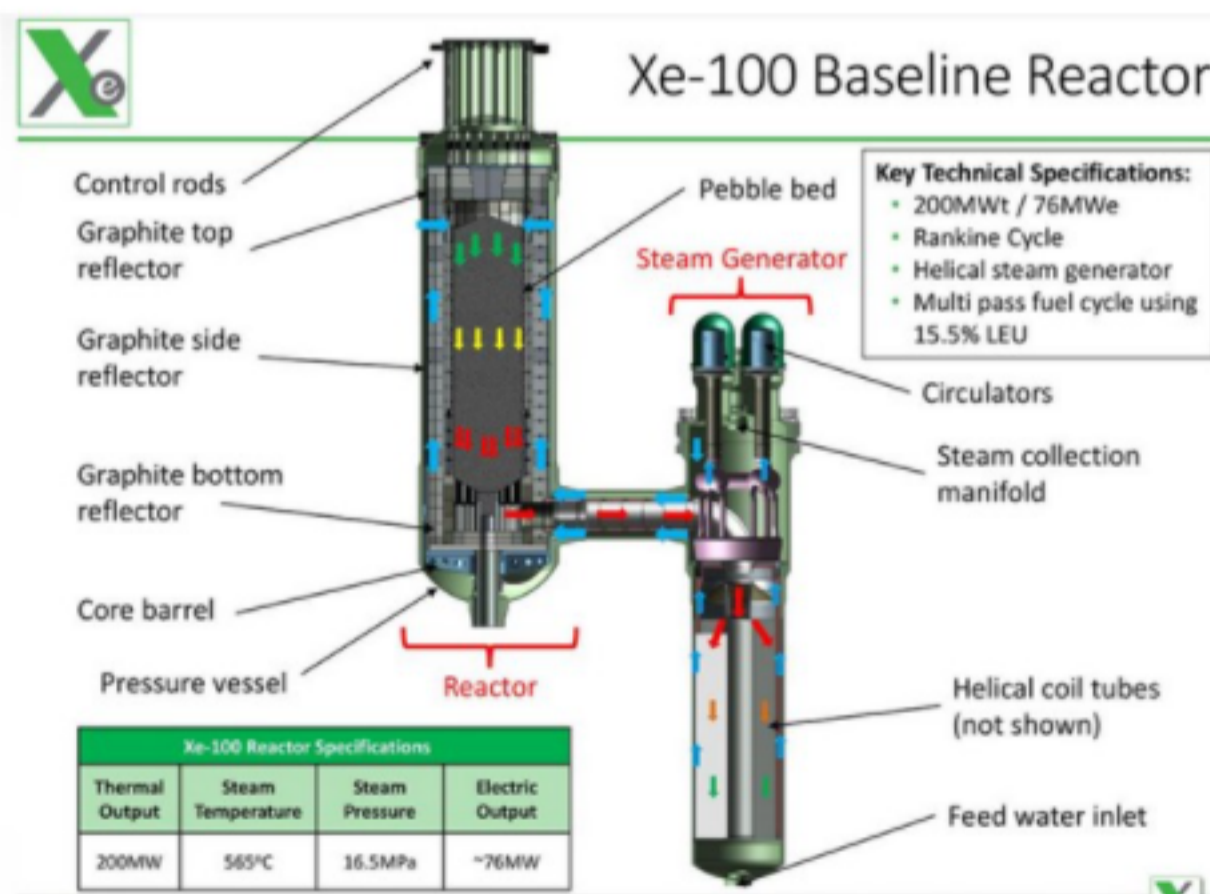
태양광(PV) 대비 집중형태양열(CSP) PPA사업 실적추세 (미국)



출처: Lawrence Berkeley National Lab, FERC (2021)

X-Energy의 펄베드 고온가스냉각로(HTGR)

유연성(전기-열 전환) 성능검증 이전에 과거 미해결 안전문제 및 운영문제 해소필요
 과거 폐기된 기술이나, 국립핵연구소(INL, ORNL), 파생기업의 연명 지원정책



출처: X-Energy, LLC

- 1970년대 미국 총 10건의 상용HTGR이 추진되었으나, 타당성부족으로 발주철회
- 1980년대 대형실증로인 미국 Fort St. Vrain, 독일 THTR도 기술적 문제로 중도 폐지
 - 헬륨가스 순환기 베어링을 통한 습기침투로 냉각설비 부식, 헬륨가스 누설 등
- 2000년 전후 미국 엑셀론과 남아공 에스콤, 미국내 펄베드형 HTGR사업 공동추진
 - 2002년 엑셀론, 사업타당성 문제로 철수
- 2005년 미국 부시행정부 "차세대원전사업" 차원에서 HTGR사업 추진
 - 민간사업자들, 50%사업비용 부담조건과 사업타당성 우려로 참여거부
- 2010년 에스콤, 남아공내 추진사업폐기

중소형원전 개발사업의 악순환 구조:

- 경제성 문제·용량증대·설계변경·공기지연·비용증가

- 웨스팅하우스는 AP600 모듈형 원전개발(1999년 설계인증), 가스발전대비 불리한 경제성 개선을 위해 AP1000으로 설계변경
 - 냉각재펌프 등 애초 소규모설비 용량이 확대됨에 따라 재료변형, 균열, 시스템통합 문제로 설계변경 반복, 공기지연, 웨스팅하우스 파산
 - 추진중 AP1000 사업 모두 폐기, 보글원전만 정부지원조건때문에 건설중
- SMR설계에서 가장 앞선 NuScale 역시 경제성문제 개선을 위해 용량증대와 설계변경 반복, 웨스팅하우스와 유사한 경로에 진입
 - 35MW(2003), 40MW(2007), 45MW(2014), 50MW(2016), 77MW(2020)
- X-Energy의 고온가스냉각로도 열출력 설계를 100MWt(2014)에서 200MWt(전기출력 약 80MW)로 증대

19

웨스팅하우스 AP1000과 NuScale SMR의 유사한 경로

	AP1000		NuScale SMR	
건설단가 증가추세	\$1,363/kW(2002)	\$8,600/kW(2018)	\$1,718/kW(2003)	\$8,500/kW(2020)
주요 기술혁신	피동형 안전 시스템, Canned Motor 냉각재펌프		일체형 경수로, 콤팩트 증기발생기 (helical coils) 등	
결과	AP600의 경제성문제로 용량증대, AP1000 설계변경으로 기간, 비용 증대		에너지부 9년간 건설비 지원(\$14억)약속 (2020), 잔여 건설비 \$47억(\$6,500/kW)	
배경	용량증대후 설계변경의 반복, 5년이상 공기지연, 비용초과		초기 설계단계에서 추상적인 비용평가에 기반해 사업추진, 진행될수록 비용증가	

참조: Cummins & Matzie(2018), MIT Energy Initiative(2018), 캐나다 브리티컬럼비아대 Ramana교수(2020)

20

※ 빌 게이츠의 소듐냉각 고속로 참고사례

- 세계주요국, 소듐냉각 고속증식로의 화재폭발로 막대한 비용만 지불

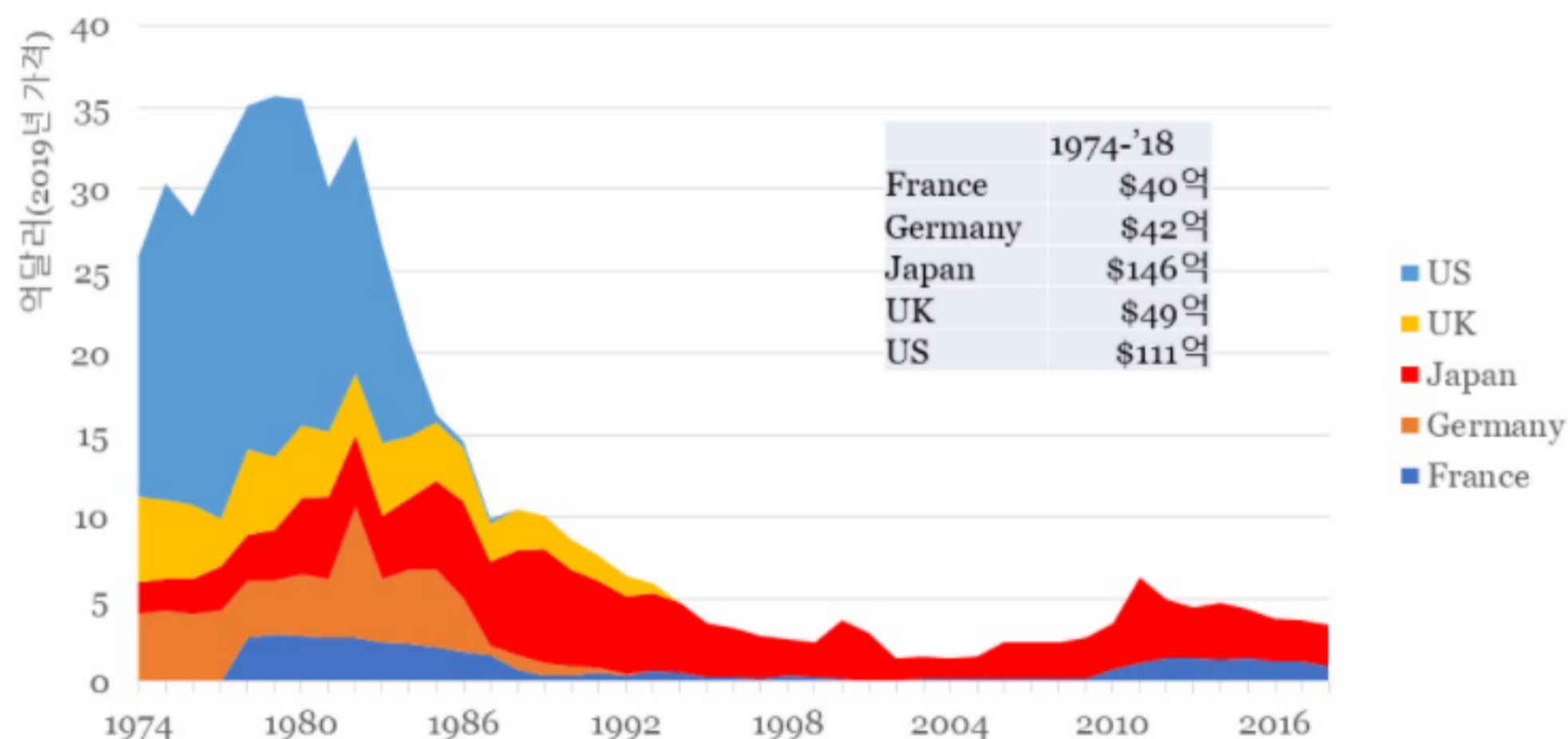
	영국		프랑스		러시아		독일	일본
	던리 (DFR)	던리 (PFR)	피닉스	수퍼 피닉스	BN-600	BN-800	SNR-300	몬주
용량(MW)	14	234	233	1,200	560	789	300	246
가동기간	1962-1977	1975-1990	1973-2010	1986-1998	1980-현재	2015-현재	1991	1995-2017
이용률(%)	33.5	26.9	40.5	7.9	75.9	68	0	미공개 (총 250일 가동)
누출·화재	7회	20회	31회	7회	27회	-	-	1회
비고	중도폐기						건설직후 폐쇄, 유원지로 개조	건설비 2.2조엔, 유지비 연200억엔, 폐로비 3천억엔

참고: IAEA Power Reactor Information System, Guidez et al. (2008), von Hippel et al.(2019)

21

OECD 주요국 고속증식로 연구개발 예산추세

- 대부분 '80년대 중단, 최근까지 프랑스, 일본이 지속하다 실패
- '몬주': 22년간 250일가동, 건설비 2.2조엔, 유지비 연평균 200억엔, 폐로비 3천억엔



참조: 국제에너지기구(IEA) Energy Technology RD&D Data Services 통계에 기반해 필자 작성

※ 일본의 몬주 등 각국의 실제 고속증식로 예산과 IEA에 보고된 통계는 일치하지 않을 수 있음(추세만 참조)

22

4. 국내에서 추진되는 SMR 개발사업 현황과 문제

23

국내에서 추진되는 SMR 개발사업 배경

- 원자력연구원은 지난 25년간 스마트원전설계를 개발해왔고, 지난 2000년 이후에는 소듐냉각 고속로 관련 미국측과 협력진행
- 최근 SMR 국회포럼 등에서 공개적으로 제시된 SMR은 그동안 진행해온 스마트원전설계를 발전사업자인 한국수력원자력의 참여하에 설계를 변경해 수출하겠다는 취지
- 이와 별도로 사용후핵연료의 재처리(파이로 프로세싱)를 전제로 한 소듐냉각 고속로사업을 추진을 모색중
- 그러나 핵확산우려로 이에 대한 검증을 위해 한미공동연구개발 1단계사업이 완료되었으나, 이 사업을 지속할지 여부 미정

24

원자력연구원의 SMR개발 이력과 문제

- 스마트원전: 1990년대 러시아 핵잠수함 추진원자로설계 구입
- 국내 해수담수화용 원전으로 추진되었으나 2007년 예타부적합 판정, 2008년 2월 과학기술부 동사업 공식폐기
- 이명박정부, 수출용 원전으로 재추진, 한전을 컨소시엄에 참여시킨 후 설계심사비용 지원 (한전, 설계인증후 컨소시엄 탈퇴)
- 박근혜정부, 사우디 수출용 원전으로 재추진(원연+스마트파워)
- 문재인정부, 수출용 원전으로 재추진 (한수원참여, 설계변경 중)
- 이미 14년전 폐기된 설계를 3번째 회생하려는 시도가 적절한 지 재검토 필요 (경제성, 기술적 타당성 등)

25

5.요약 및 제안

26

요약 및 제안

- 국내외에서 추진되는 SMR사업의 실제목표는 전력시장이 아니라 “정부R&D보조금 시장”
 - 체르노빌사고 이후 세계원자력계의 대안으로 추진된 AP1000원전 파산이후 정부지원을 받을 수 있는 새로운 명분과 개념 필요
 - 사실상 “원자력 복지정책”(8년간 4천억원은 원연 500명에 1인당 1억/년)
- 국내의 경우 이미 2008년 폐기된 스마트원전을 이명박, 박근혜, 문재인 정부에서 수출사업으로 부활, 육성했으나 모두 실패
- 스마트원전 사례의 답습을 방지하기 위해 철저한 예타 평가필요
- 과학기술부의 출연연구소 프로젝트베이스체계(PBS) 개혁필요
 - 인건비확보를 위해 ‘유행따르기식’ 허위과장 연구개발사업이 난무하는 PBS제도를 대폭 축소하고, 연구원들의 기본 인건비 지급 보장 필요

27

주요 참고문헌

- Cummins, W.E., Corletti, M.M. and Schulz, T.L. (2003), Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant. Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, May 4-7, Cordoba, Spain
- Davis, G., Cummins, E. and Winters, J. (2002), AP1000: Meeting economic goals in a competitive world, Annex 7 (IAEA-TECDOC-1290). Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA)
- Guidez, L. Martin, S. C. Chetal, P. Chellapandi & Raj, B. (2008), Lessons Learned from Sodium-Cooled Fast Reactor Operation and Their Ramifications for Future Reactors with Respect to Enhanced Safety and Reliability, Nuclear Technology, 164:2, 207-220, DOI: [10.13182/NT08-A4020](https://doi.org/10.13182/NT08-A4020)
- Lazard (2020), LAZARD'S LEVELIZED COST OF ENERGY ANALYSIS—VERSION 14.0
- Lyman, E. (2013), “Small Isn't Always Beautiful”: Safety, Security, and Cost Concerns about Small Modular Reactors, Union of Concerned Scientists
- _____ (2021), “Advanced” Isn't Always Better: Assessing the Safety, Security, and Environmental Impacts of Non-Light-Water Nuclear Reactors, Union of Concerned Scientists
- MIT Energy Initiative 2018. The future of nuclear energy in a carbon-constrained world-An interdisciplinary MIT study, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- OECD/IEA Energy Technology RD&D Data Services
- Ramana, M.V. (2020), Eyes Wide Shut: Problems with the Utah Associated Municipal Power Systems Proposal to Construct NuScale Small Modular Nuclear Reactors, Oregon Physicians for Social Responsibility.
- von Hippel, F., Takubo, M. and Kang, J.(2019), *Plutonium: How Nuclear Power's Dream Fuel Became a Nightmare*, Springer Press

28