

# 국내외 소형모듈원전(SMR)정책의 배경과 경제적·기술적 문제

석광훈 에너지전환포럼 전문위원  
(과학기술정책학 박사)

2021.5.24.

# 1. 소형모듈원전(SMR)의 개념

- 소형: 300MW이하로 “대형원전의 건설비용 감축” 주장 (단위\$/kW는 증가)
  - 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 수 백기 이상의 수주확보가 관건
- 미국 에너지부는 지난 2010년대 초반 ‘경수로 SMR’을 지원, 최근 고온가스냉각로(X-Energy), 소듐냉각고속로(TerraPower) 등 ‘비경수로(Non-LWR) SMR’에 대해서도 지원
  - X-Energy와 TerraPower의 SMR구상은 재생에너지증가에 따른 미래전력망의 유연성 요건 대비 기존원전의 경직성 개선논리 전개

# 미국 규제기관(US 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
	NPM-20 일체형 가압경수로	77	2022 신청	-

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

# 캐나다규제기관(CNSC)의 신청전 심사 SMR

(신청전심사: 설계심사전 규제요건충족 관련 기초심사 1,2,3단계로 구성)

공급자	설계명 및 냉각방식	용량(MW)	심사단계	심사개시	심사상황
Terrestrial Energy Inc.	IMSR 일체형 용융염 냉각로	200	1단계	2016.4.	완료
			2단계	2018.12.	진행중
ARC Nuclear Canada Inc.	ARC-100 소듐냉각 고속로	100	1단계	2017.9.	완료
SMR, LLC. (Holtec Int'l.)	SMR-160 지하매설형 가압경수로	160	1단계	2018.7.	완료
Moltex Energy	Moltex Energy 용융염냉각로	300	1단계	2017.12.	진행중
NuScale Power, LLC	NuScale 일체형 가압경수로	60	1-2단계통합	2020.1.	
GE-Hitachi Nuclear Energy	BWRX-300 비등형 경수로	300	1-2단계통합	2020.1.	
X Energy, LLC	Xe-100 고온가스냉각로	80	1-2단계통합	2020.7.	
Ultra Safe Nuclear Corporation	MMR-5 & 10 고온가스냉각로	5-10	1단계	2016.12.	완료
			2단계	중단	중단
Lead Cold Nuclear Inc.	SEALER 용융납 냉각로	3	1단계	2017.1.	중단
U-Battery Canada Ltd.	U-Battery 고온가스냉각로	4	1단계	-	중단

## 2. 중소형원전 개발사업의 악순환 구조:

경제성 문제·용량증대·설계변경·공기지연·비용증가

- 웨스팅하우스는 1980년대부터 AP600 모듈형 원전개발, 가스복합 대비 불리한 경제성 개선을 위해 AP1000으로 설계변경(2000)
  - 그러나 냉각재펌프 등 애초 소규모 모듈형 설비 용량이 확대됨에 따라 재료변형, 설비균열, 시스템통합 문제로 설계변경 반복, 공기지연
  - 중국수출 AP1000 4기 공기지연, 비용증가로 중국 추가AP1000계획 폐기
  - 미국내 다수 AP1000 사업들도 동일한 경험, Vogtle사업 외 모두 폐기
- 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 100MWt(2014)에서 200MWt로 변경

# 웨스팅하우스 AP1000와 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	업체도산, 신규 원전 시장 AP1000 원전 폐기		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), Davis et al.(2002), MIT Energy Initiative(2018), Ramana(2020)

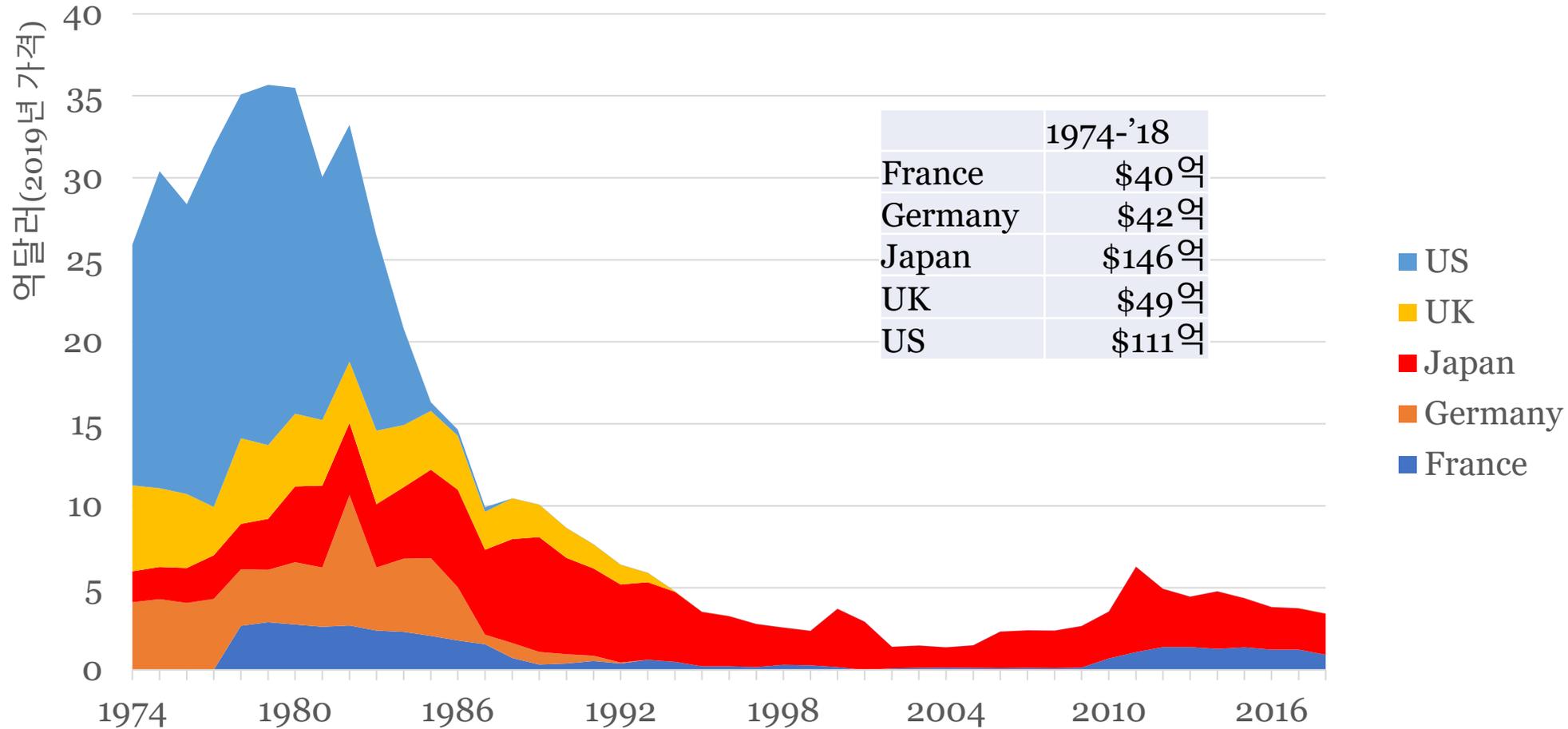
### 3. 비경수로형 SMR의 참고사례(고속증식로) 세계주요국의 부정적 소뭍냉각 고속증식로 경험

	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	'72-'77 이용률						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)

# 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)

## 4. SMR 미래전망에 놓인 2대 악재

### □ 규모의 경제 포기애 따른 경제성 확보문제

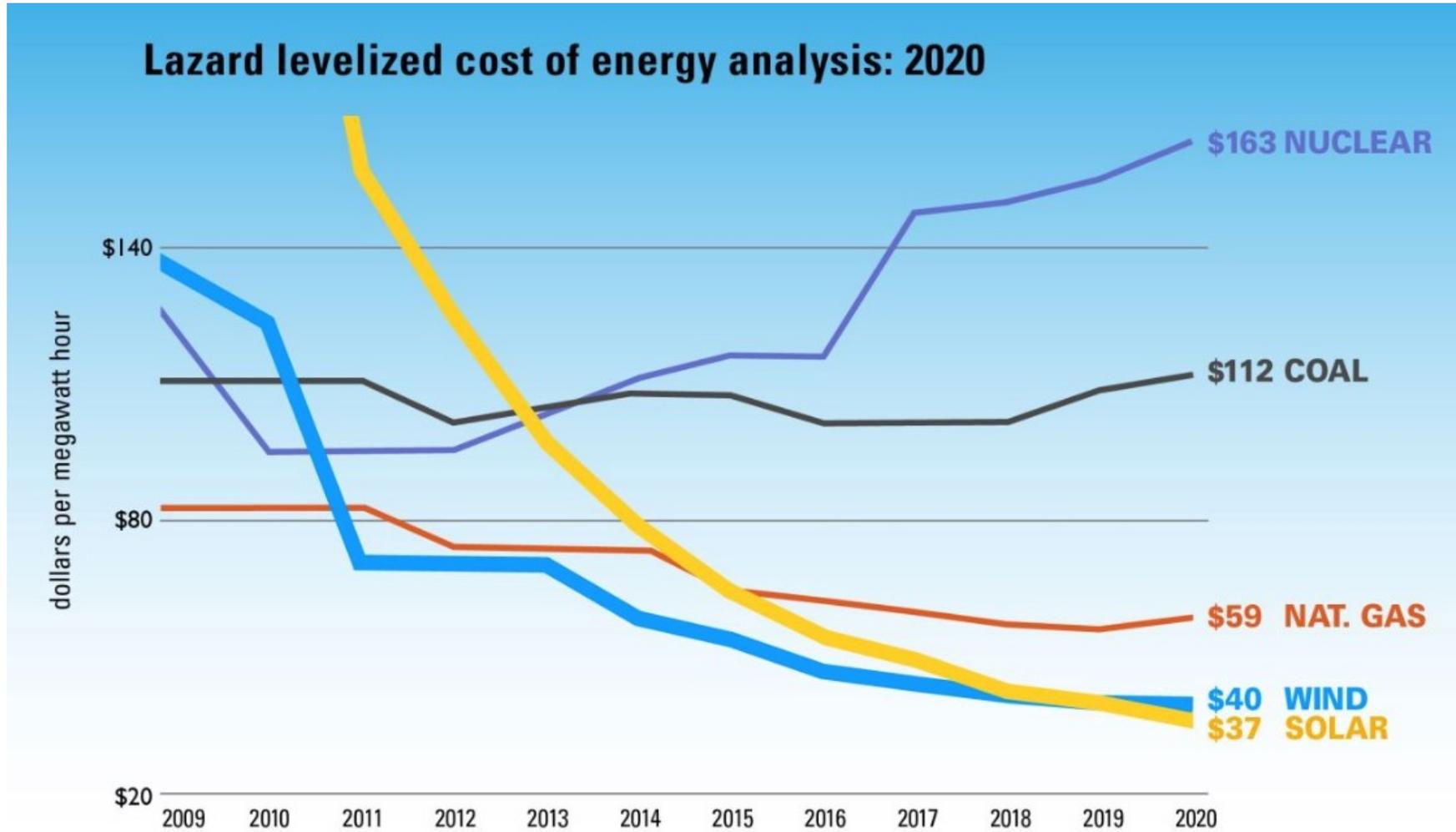
- OECD 주요시장에서 규모의 경제를 통해 경쟁해온 대형원전도 이미 가스복합발전과 재생에너지 대비 경제성 완전히 상실
- ' 규모경제 ' 포기애 ' 양산경제 ' 에 필요한 수요 부족사이 진퇴양난

### □ 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(2019기준 풍력 20%, 태양광 4%)에 따라 계통안정성 확보차원에서 2020년 사이즈웰-B 원전 4개월간 출력50%저감운전
- 미국 CAISO, MISO는 각각 태양광, 풍력의 증가로 원전 조기폐쇄 진행중

# 최근의 에너지원별 발전단가 실제 변화추세

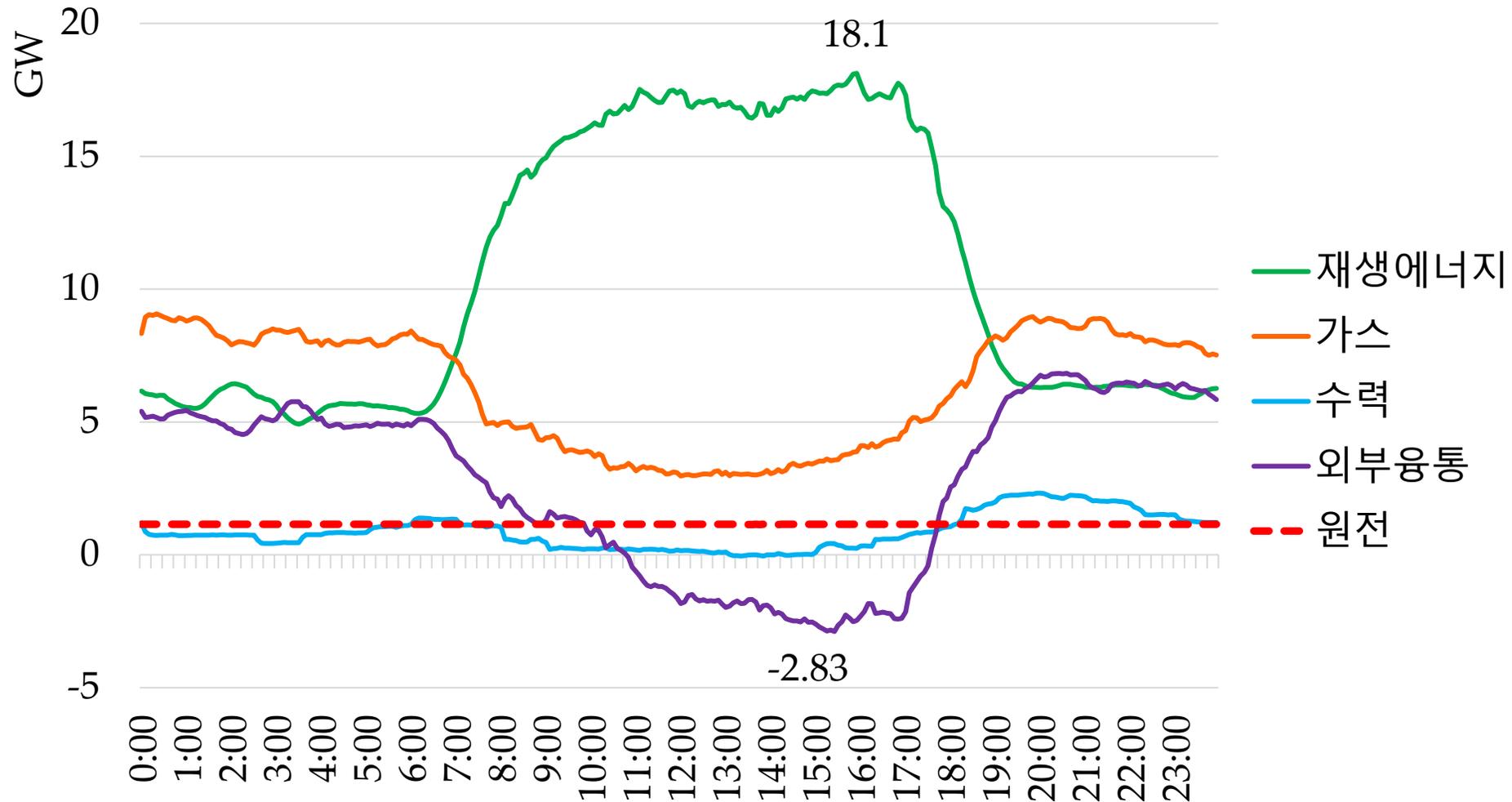
(미국 전력시장 기준, 풍력 \$40/MWh, 태양광 \$37/MWh, 대형원전 \$163/MWh)



출처: LAZARD LCOE Report 2020

# 캘리포니아의 태양광과 전력공급패턴

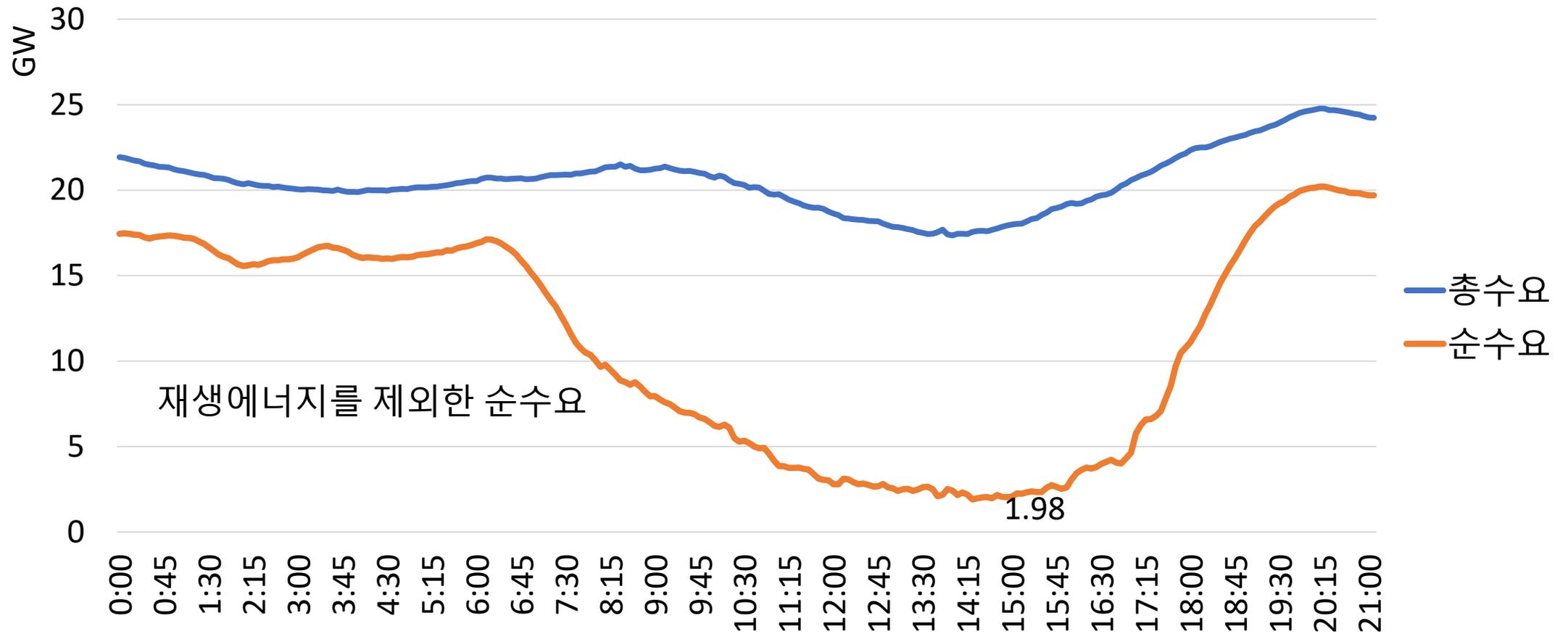
(4월24일 실적)



참고: 캘리포니아 독립전력계통(CAISO), Supply Trend

# 수요측 기준에서 CAISO 4월24일 실적:

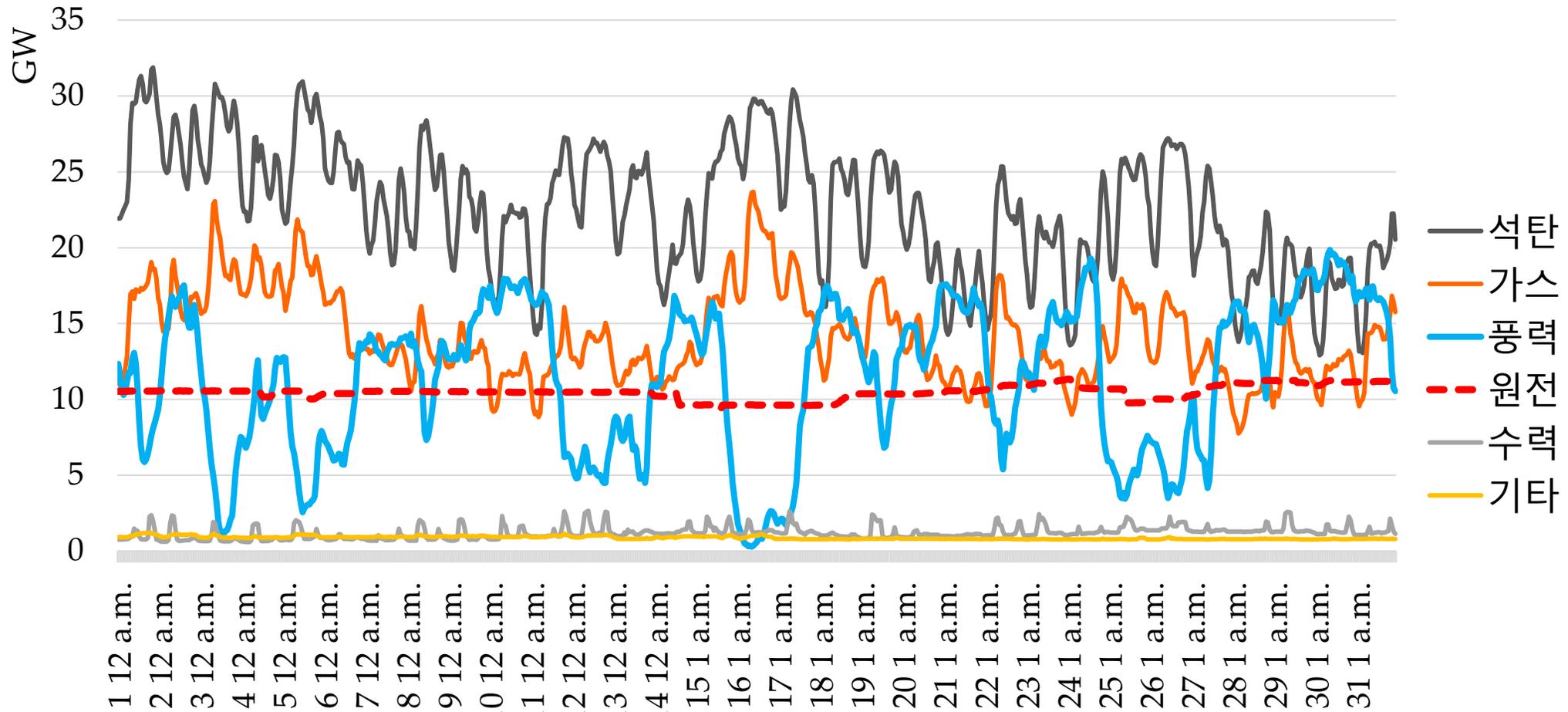
순수요 최저선은 이미 원전설비용량(2.25GW)아래에 형성  
해당 원전(디아블로 1,2호기)은 2024년, 2025년 폐쇄예정



참고: 캘리포니아 독립전력계통(CAISO), Net Demand Trend

# 미국 중부대륙 전력계통 (MISO) 3월 전력공급실적

원전은 풍력발전변동에 반응하지 못하며 계통비용유발(Negative Price)



참고: 미국 에너지정보청(US EIA) Hourly Grid Information

※ MISO는 미네소타, 일리노이, 아이오와, 위스콘신 등 12개주 포함

# 재생에너지증가에 따른 원전 조기폐쇄 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
	듀안 아놀드(MISO)	601	2034	2020	46년
	인디언 포인트 3	1,040	2025	2021.4.	44년
올해중 폐쇄예정 원전 (MISO 4기)	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)

# 주요 SMR 설계의 유연성 확보구상과 한계

- TerraPower의 소듐냉각 고속로: 전력망 여건에 따라 잉여전력을 부지내 용융염 탱크를 통해 열에너지로 저장
  - 용융염을 사용하는 집중형 태양열발전(CSP)은 태양광발전 (\$31~42/MWh) 대비 4배(\$126~156/MWh)로 용융염은 비용 대폭증대 요인 (Lazard 2020)
- X Energy의 고온가스냉각로: 전력망 여건에 따라 잉여에너지를 전력에서 증기로 전환 산업용 열로 활용 또는 수소생산
  - 실증로를 통한 검증이 필요하지만, 실증로없이 2027년까지 상용화추진
- 기타 다른 SMR 설계개념들은 재생에너지 증가에 따른 전력망 변동상황에 대한 유연성 확보방안 부재

## 5. 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
- 반면 소듐냉각 고속로는 연료로 사용후핵연료의 재처리(파이로 프로세싱)를 전제로 하기 때문에 핵확산우려로 미국측 허가필요

# 원자력연구원의 SMR관련 주요사업 1.

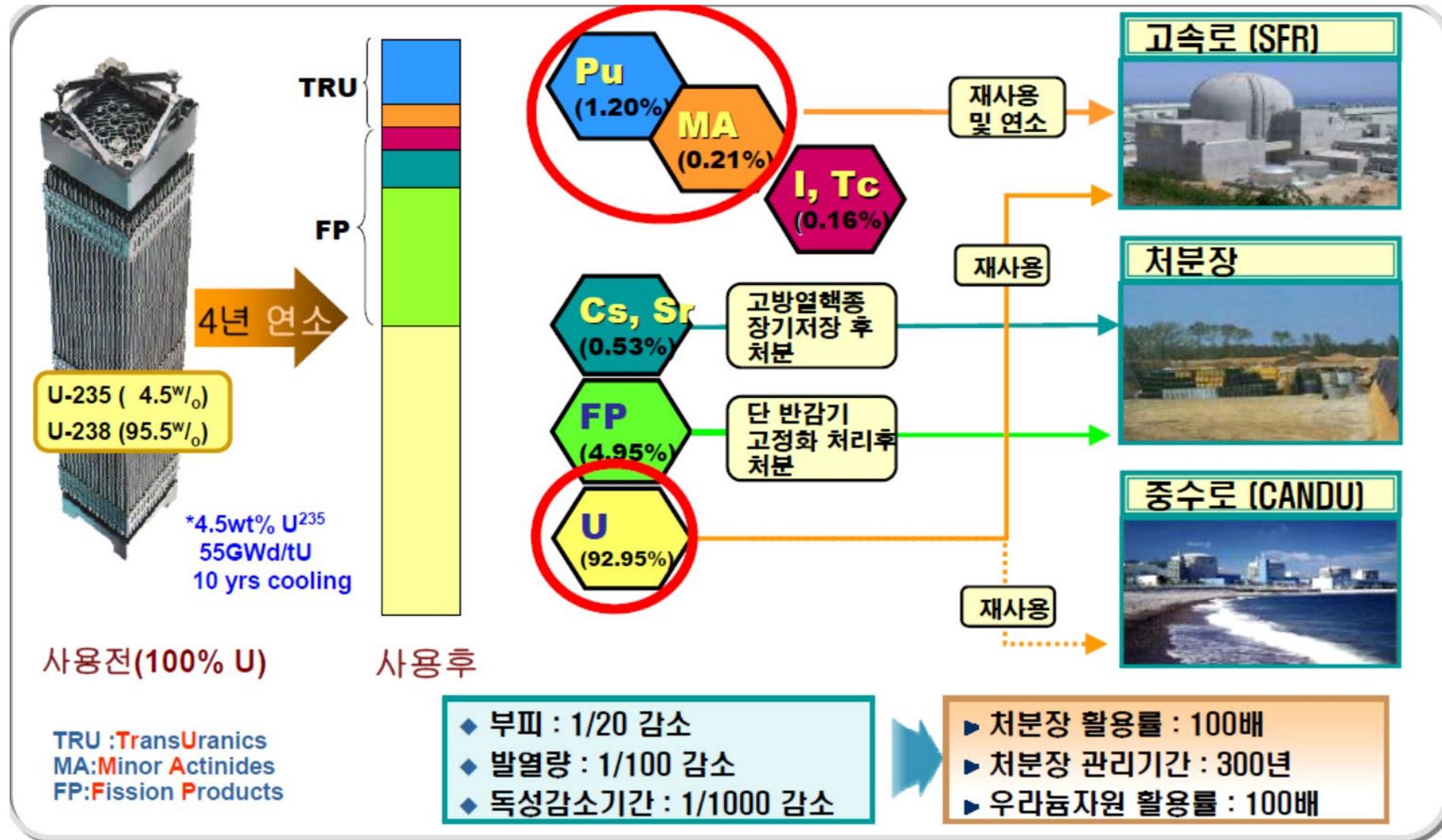
## 스마트원전

- 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 10여년전 폐기된 설계를 3번째 회생하려는 시도가 적절한 지 재검토 필요 (경제성, 기술적 타당성 등)

# 원자력연구원의 SMR관련 주요사업 2. 파이로프로세싱-소듐냉각 고속로

- 미국 아이다호 연구소(INL)의 실패한 소듐냉각고속로(EBR-II) 참조
  - 사용후핵연료 재처리(파이로프로세싱)로 플루토늄 및 우라늄 혼합 금속연료를 소듐냉각 고속로를 통해 연소한다는 구상
- 그러나 한반도비핵화 및 국제 핵비확산 체제를 강조하는 미국 바이든정부에서 동 사업을 허용할지 불확실
  - 한미정상회담 공동성명의 Factsheet에서 사우디가 거부하는 'IAEA안전조치 추가의정서' 비준요구 독려조항은 향후 대형원전, 스마트원전 모두 수출이 어려워졌음을 의미 (강정민 전 원안위 위원장)
- 현재 고속로개발은 “수출용 원전”사업으로 추진하고 있으나, 동 사업 결과물의 지적재산권은 애초부터 미국(INL, ANL)에 귀속
  - 경제성 문제는 전혀 고려되고 있지 않은 상황

# 원자력연구원의 사용후핵연료 파이로 프로세싱 및 고속로 연소 개념도



출처: 한국원자력연구원(2010), "파이로프로세싱을 통한 사용후핵연료 부피저감화 및 재활용기술개발"

## 6. 요약 및 국내 SMR개발정책에 대한 제안

- 북미를 중심으로 진행되는 SMR은 웨스팅하우스의 AP600/AP1000사례보다 실패할 위험이 더 클 것으로 전망됨
  - AP600보다 더 작은 설계용량, 이미 용량증대와 설계변경 반복, 재생에너지 주도 전력망 대비 유연성 부족 등
- 국내 스마트원전설계에 기반한 SMR개발에서 이와 같은 실패위험을 감안한 혁신노력 필요
  - 2022년으로 예정된 예타에서 철저한 검증 필요
- 소듐냉각 고속로는 핵확산우려, 선진국들의 소듐누출사고 경험, 막대한 비용손실 등에 대한 면밀한 검토 필요
- 장기적으로 원자력연구원의 고급전문인력은 보다 생산적이고, 혁신적인 부문으로 업종전환(해상풍력 구조물설계 등) 도모 필요

# 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