

제주 CFI 달성을 위한

양수발전의 역할

2022. 5.3

상근부회장 김은수 eunnsk@gmail.com



Contents

- 탄소중립과 에너지 저장장치
- ‘양수발전’이란?
- 양수발전 해외 동향
- 양수의 비용 경쟁력
- 제주 CFI 달성을 위한 준비사항



- 설립 : 2020년 3월 (협회장 정재훈)
- 회원 : 수력 · 양수 관련 설계, 건설, 제조, 운영, 정비 분야 102개 기업
- 업무 : ① 수력 · 양수 핵심설비 국산화
② 수력산업 생태계 활성화
③ 수력산업 홍보 및 정책개발
- 비전 : 대한민국 수력산업의 글로벌 TOP 수준 경쟁력 확보





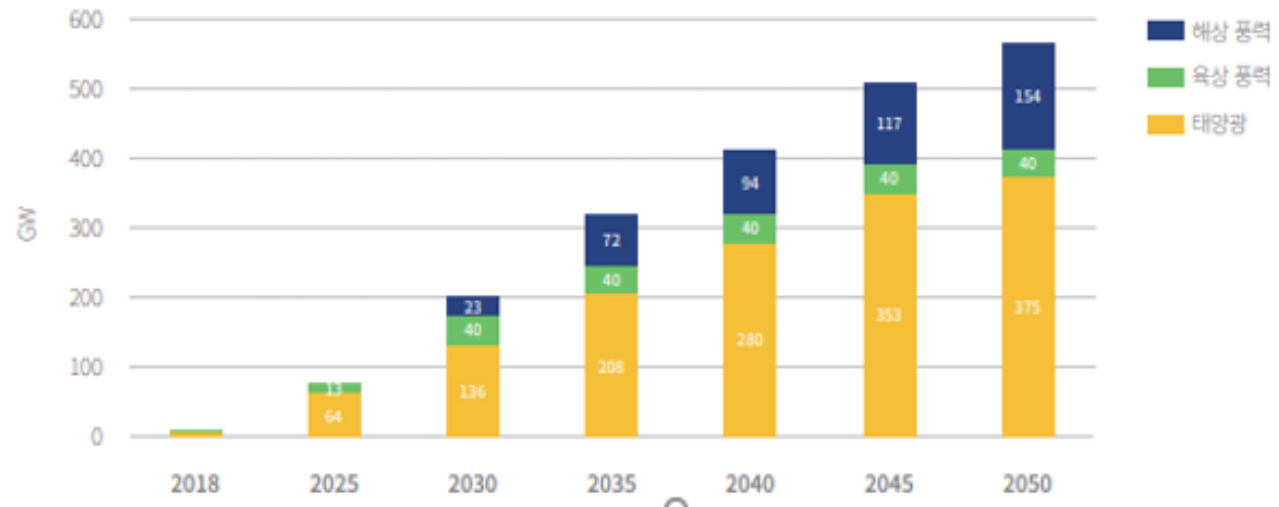
탄소중립과 에너지 저장장치



- 지구온도 상승을 1.5도 이내로 유지하려면
 - 2030년까지 탄소배출 43%, 2050년까지 84% 감축 필요(2019 대비)
- 전세계가 탄소중립 달성 목표를 앞당기고 있음
 - 미국, 영국 등은 2035년까지 전력부문 탈탄소 완료 선언
- 우리나라도 탄소중립 가속화
 - 2030 NDC 확정('21.10)
 - 2050 탄소중립 시나리오 확정('21.10)



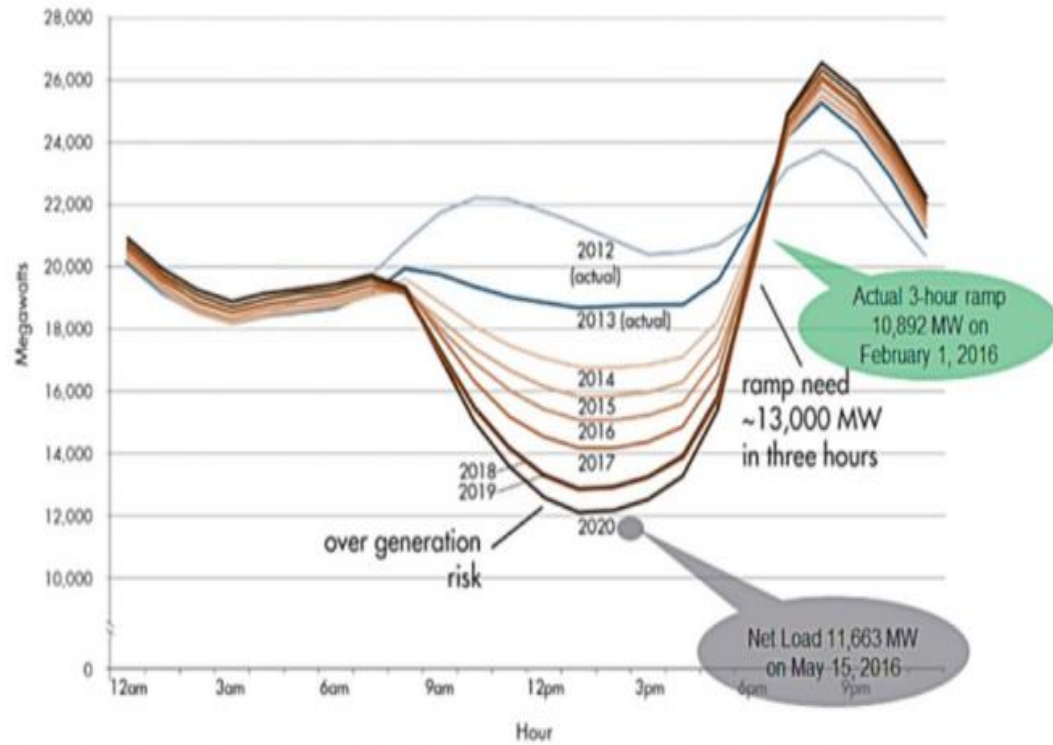
- 2030 NDC 달성에 필요한 VRE* : 100GW
- 2050 Net-Zero 달성에 필요한 VRE : 500GW 이상
- 사단법인 Next의 전망
 - 2030년 : 199GW
 - 2050년 : 569GW



* VRE: Variable Renewable Energy, 변동성 재생에너지(예:풍력, 태양광 등)

구분	VRE비중	전력계통 특징	도전과제	비고
1단계	3% 이내	<ul style="list-style-type: none"> ▪ VRE가 전력계통이 미치는 영향 없음 - 접속점 근처 국지적 계통에 일부 영향 	<ul style="list-style-type: none"> • 그리드 코드에 추가사항 고려 • 국지적 계통영향 검토 	
2단계	3~15%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ VRE에 의한 영향을 인식하는 단계 - VRE 수용을 위해 계통운영 패턴 변화 	<ul style="list-style-type: none"> • 혼잡관리 & 그리드code 개선 • 출력예측 시스템 도입 검토 • VRE를 고려한 급전계획 수립 	현 육지계통
3단계	15~25%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 유연성 자원 확보의 중요성 증가 - 기존 발전소 운영이 지속적으로 감소 - 순부하의 변동성이 확대, 양방향 조류의 증대 	<ul style="list-style-type: none"> • 출력예측 시스템 필요 • 유연성 자원의 확대 • 송전망 배전망 운영자간 협조 	제주도
4단계	25~50%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 전력계통 안정도의 중요성 증대 - VRE가 수요의 100%를 담당하는 시간 발생 - 모든 발전기가 VRE 수용을 위해 출력 조정 	<ul style="list-style-type: none"> • 계통관성 확보가 최우선 과제 • 광범위 계통보강, 복원력 강화 	2030 NDC
5단계	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ VRE 발전이 구조적으로 남아도는 단계 - 수요초과 공급 및 대규모 출력제어 curtailment 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 최종 소비 부문의 전기화 • 장주기 공급과잉 부족 	
6단계	-	<ul style="list-style-type: none"> ▪ VRE 공급과 수요간 계절적 불균형 - 계절에 따라 수급부족 현상 발생 - 저장장치 및 DR 가능량을 초과한 공급부족 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 전력의 변환/저장기술 필요 • 계절수요 저장수단 확보 	2050 탄소중립

California의 Duck-Curve



CAISO DUCK CURVE GRAPHIC ILLUSTRATING POTENTIAL DAILY FUTURE SCENARIOS OF NET LOAD CURVES.

제주도에 나타난 Duck-Curve

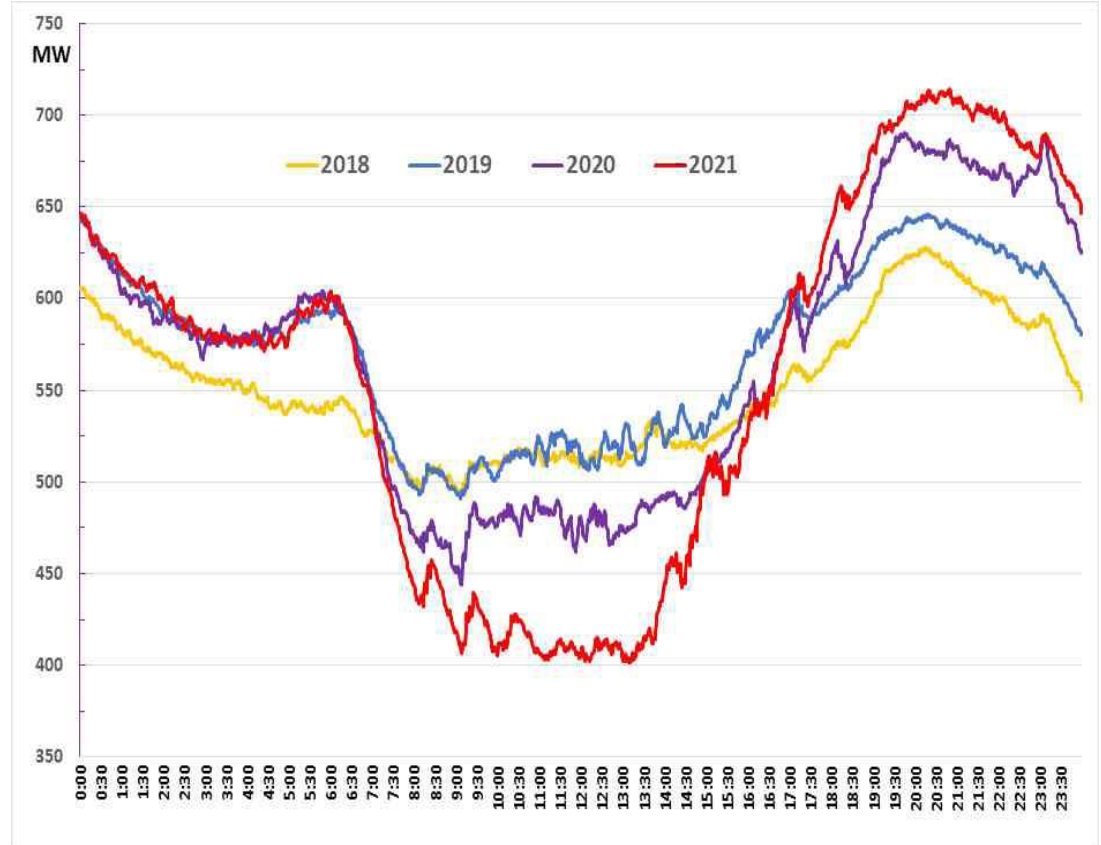
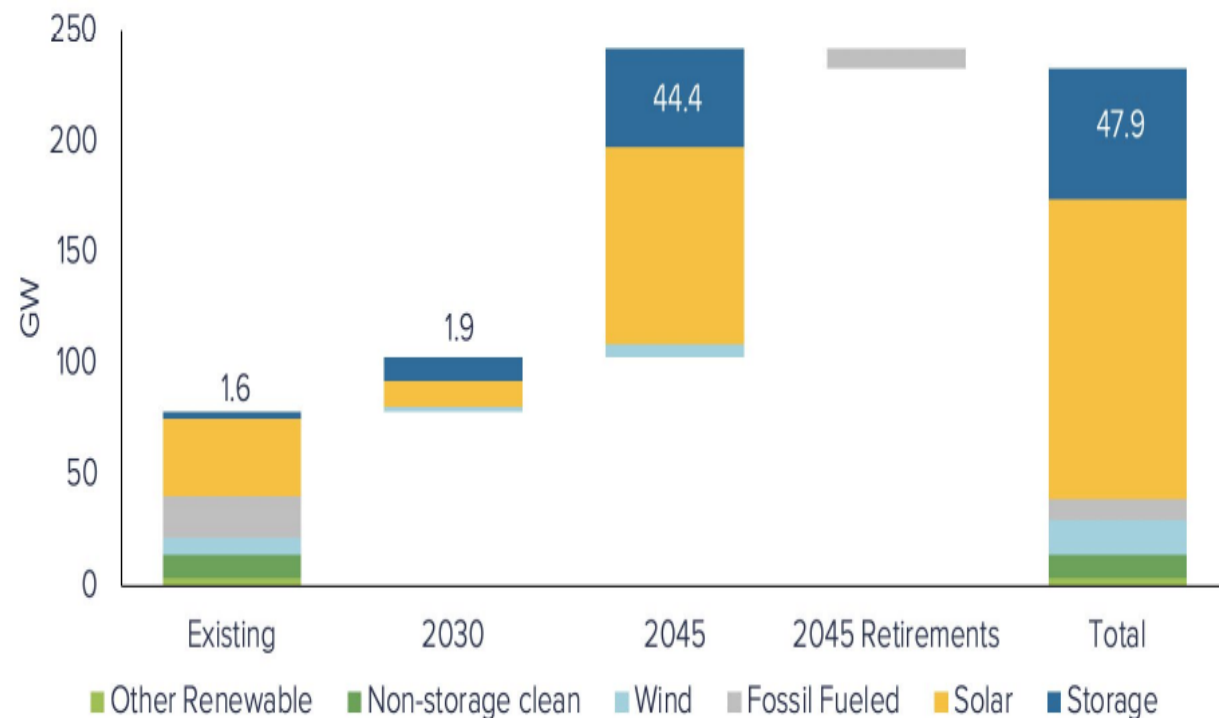
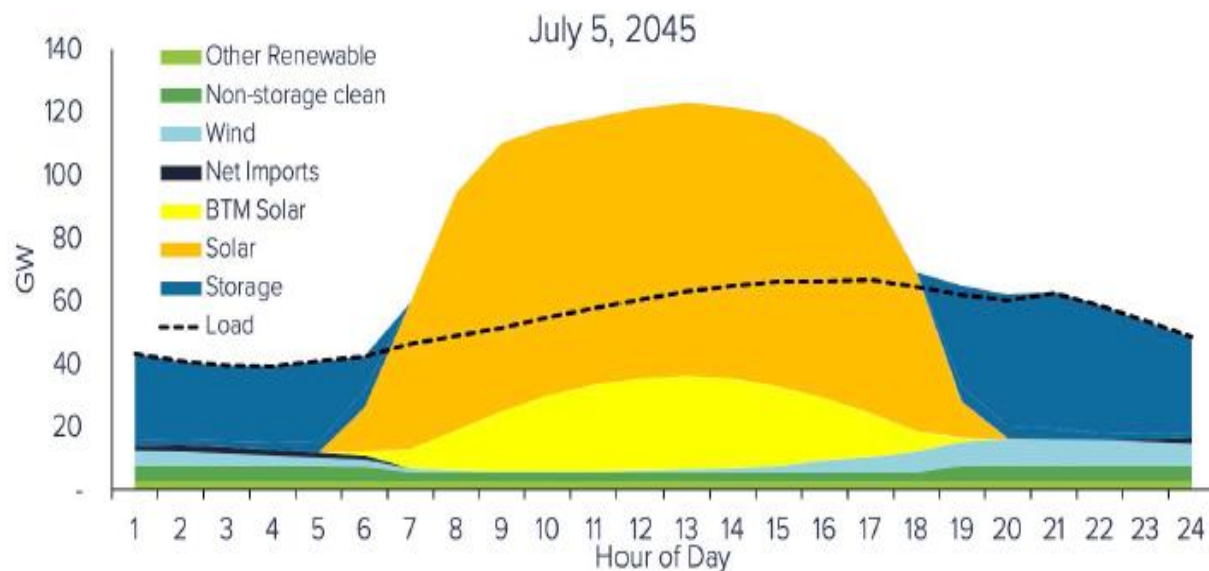


Figure 7. Daily CA Energy Supply, 2045

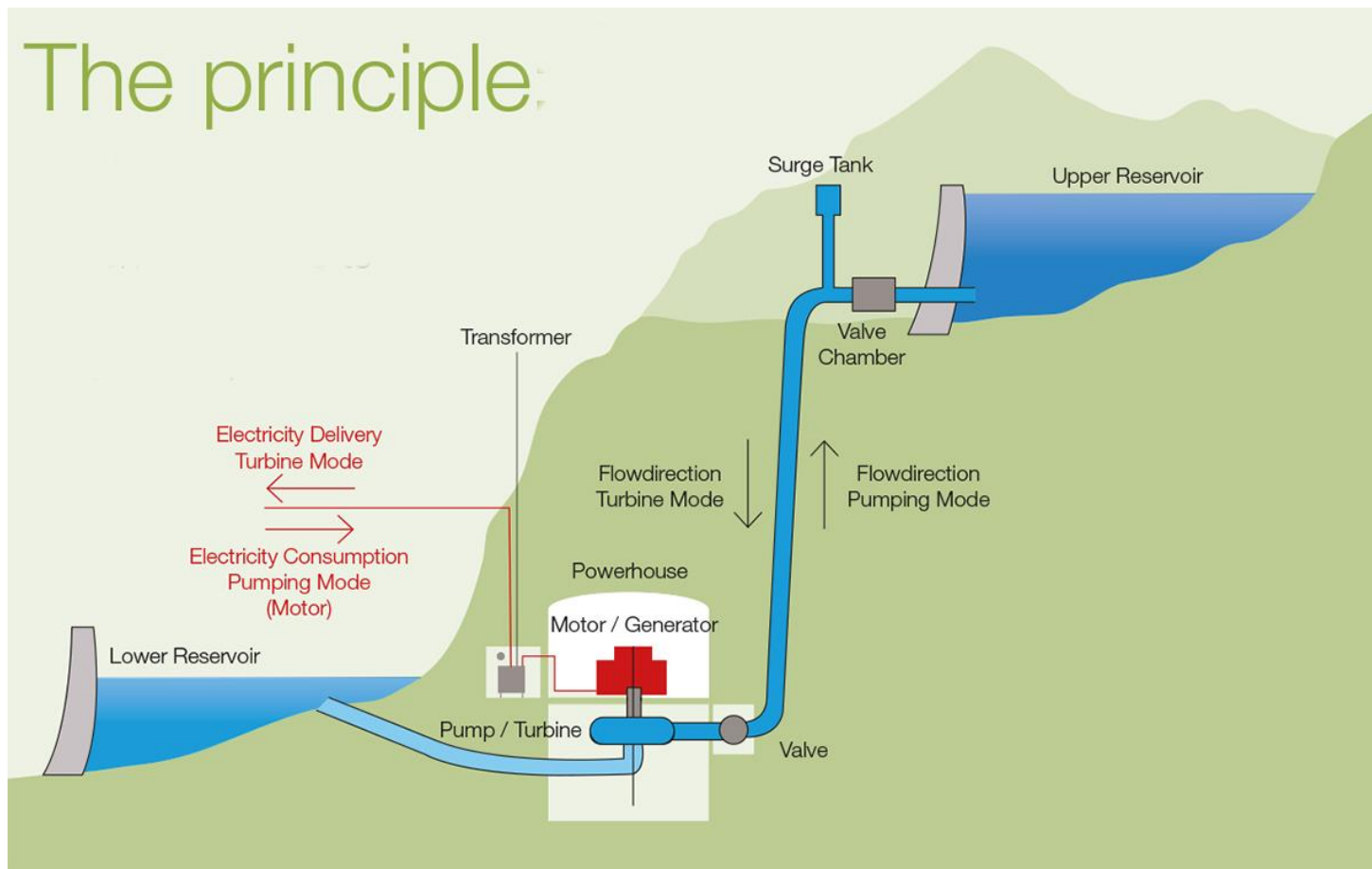


👉 미래 전력망은 전력저장장치가 매우 중요(공급설비의 20% 이상)



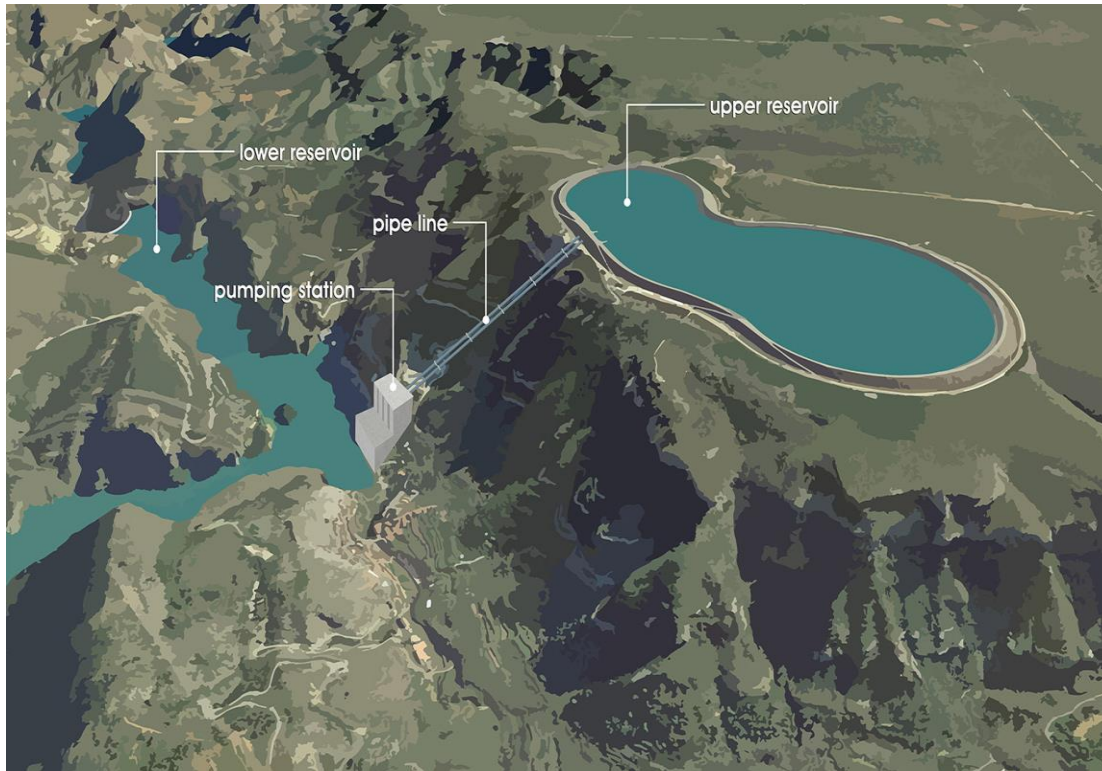
‘양수발전’이란?

The principle:

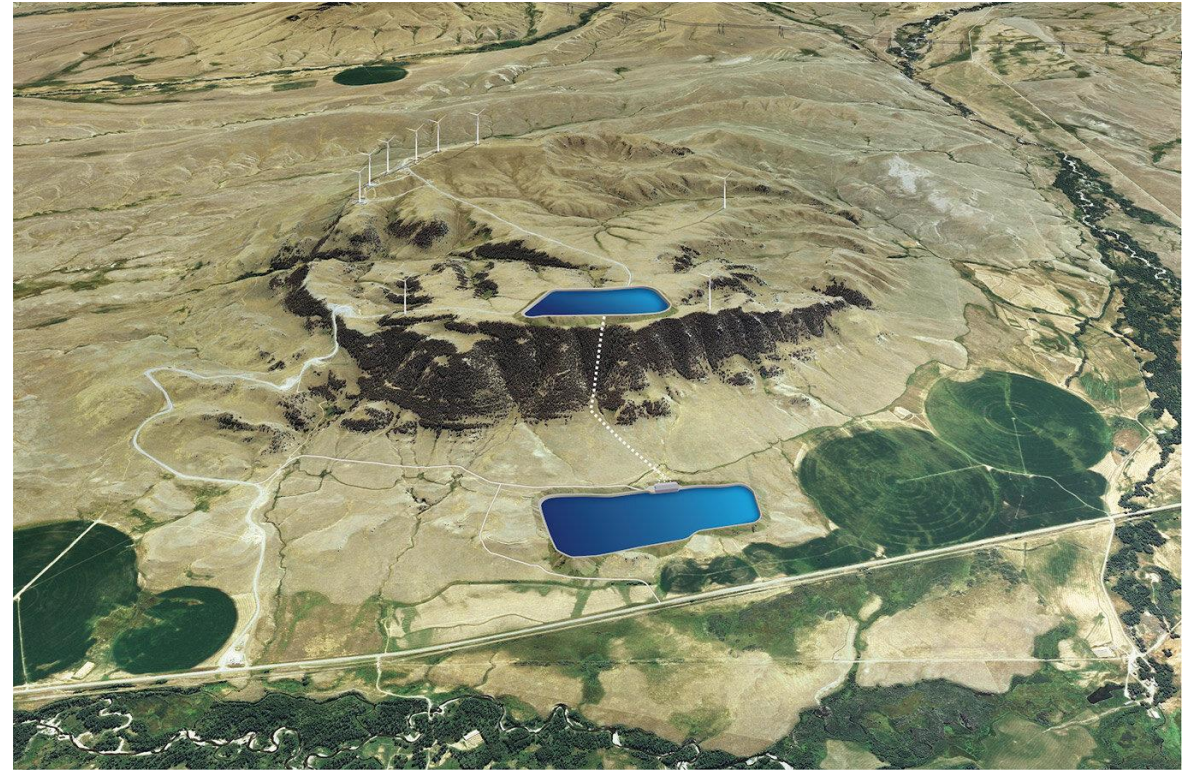


- 1907년 세계 최초
 - 스위스 Engeweiher PSH*
 - 1929년 미국 최초
 - Rocky River PSH
 - 1980년 국내 최초
 - 청평양수(400MW)
- * PSH : Pumped Storage Hydro
(PHS, PHES도 같은 의미)

■ Open-Loop PSH(개방형)



■ Closed-Loop PSH(폐쇄형)



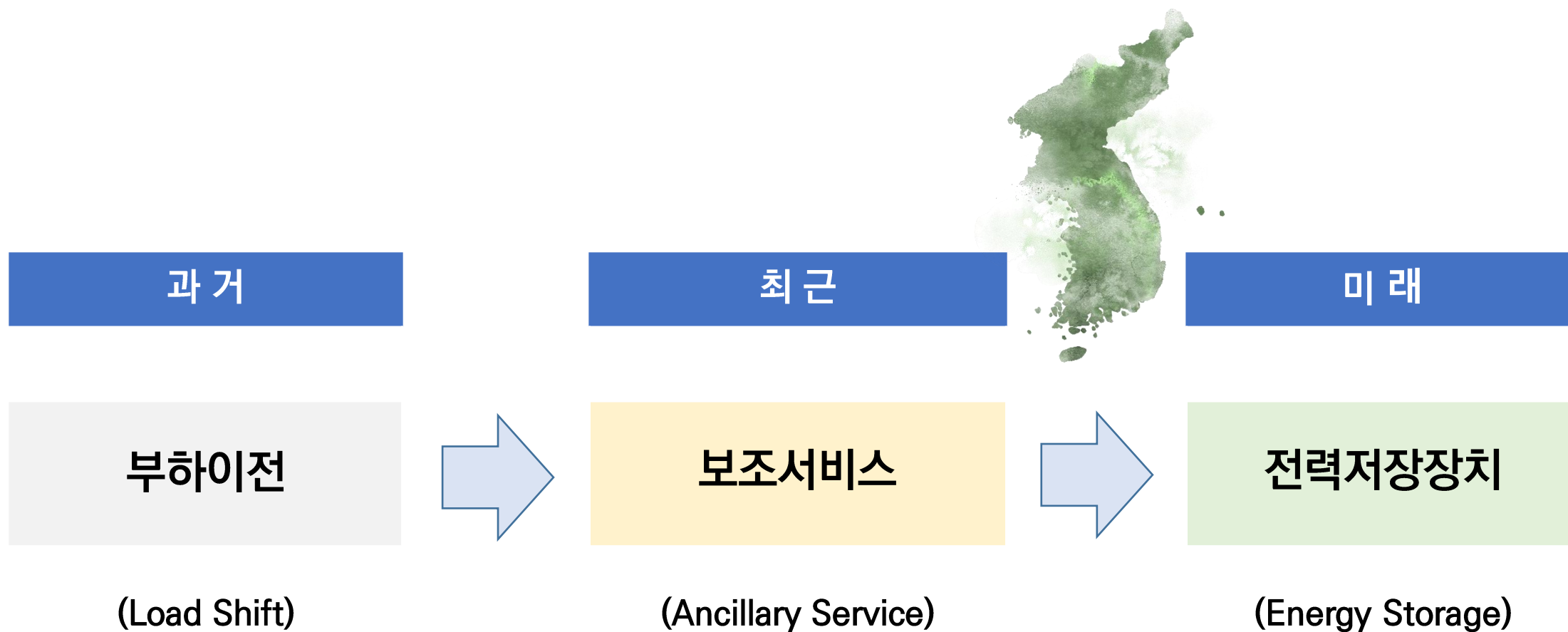
구 분		정속 양수	가변속 양수	비 고
기동시간	(정지→발전) (정지→양수)	1.5분 약 6분	약 1.5분 약 4분	가스터빈 20~40분
출력범위	(발전모드) (펌핑모드)	50%~100% 100% (일정)	30%~100% 70%~100%	주파수 조정
증감발율	(발전모드) (펌핑모드)	100%/분 불가	100%/분 20MW/0.1초*	*배터리 수준 응답 속도
모드전환	(양수→발전) (발전→양수)	약 3분 4~7분	약 3분 4~7분	
전환효율	(출력/입력)	75~85%	정속보다 1~3% 높음	

(미국 국립 아르곤 연구소)

No	PSH Contribution	설명
1	Inertia response	계통관성
2	Governor response, frequency response, or primary frequency control	1차 주파수 조정
3	Frequency regulation, regulation reserve, or secondary frequency control	2차 주파수 조정
4	Flexibility reserve	유연성 예비력
5	Contingency spinning reserve	운전예비력
6	Contingency non-spinning reserve	운영예비력
7	Replacement / Supplemental reserve	대체예비력
8	Load following	부하추종
9	Load leveling / Energy arbitrage	부하평활화/차액거래
10	Generating capacity	발전용량
11	Reduced environmental emissions	환경오염감축
12	Integration of variable energy resources	재생에너지 계통수용
13	Reduced cycling and ramping of thermal units	화력발전기 기동/출력조절 감소
14	Other portfolio effects	전력공급다양화
15	Reduced transmission congestion	송전제약 완화
16	Transmission deferral	송전망 건설 지연
17	Voltage support	전압유지
18	Improved dynamic stability	동적안정도 향상
19	Black start capability	자체기동
20	Energy security	전력안정성

- **대용량 전력을 장시간 저장·공급(Bulk Energy Service)**
 - 대용량의 **발전기**이면서 대용량의 **전력부하**
- **전력계통 보조서비스 제공(Ancillary Service)**
 - 주파수 조절, 전압조정, 예비력 제공
 - 계통관성 및 자체기동서비스 제공 등
- **송전 및 전력계통 안정운영 확보(Congestion Management & Security)**
 - 송전혼잡 해소, 송전망 건설 이연, 계통 안정도 유지

구분	발전소명	설비용량	준공시기	비고
현재	청평양수	400MW	1980. 4월	
	삼랑진양수	600MW	1985.12월	
	무주양수	600MW	1995. 5월	
	산청양수	700MW	2001.11월	
	양양양수	1,000MW	2006. 8월	250MW×4
	청송양수	600MW	2006.11월	
	예천양수	800MW	2011.11월	
	(7개소)	4,700MW	(16기)	
계획	영동양수	500MW	2030년 (예정)	가변속 양수
	홍천양수	600MW	2032년 (예정)	〃
	포천양수	700MW	2034년 (예정)	〃



☞ 양수발전은 전력부문 탈탄소화에 가장 유용한 저장수단



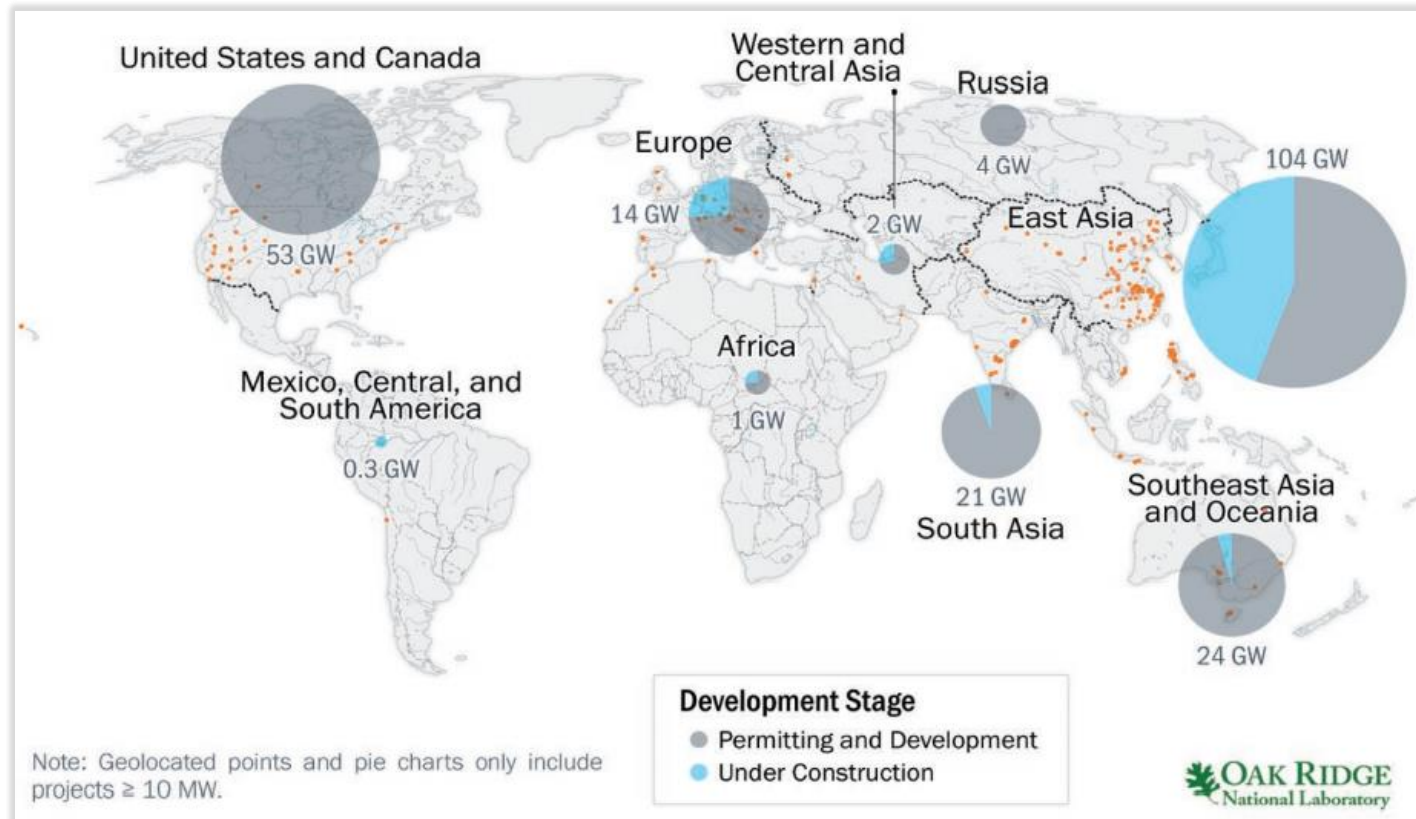
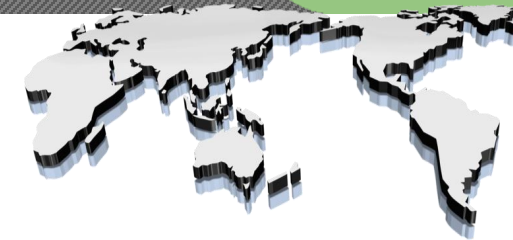
양수발전 해외 동향



순위	국가	설비용량(MW)
1	중국	31,490
2	일본	27,637
3	미국	22,855
4	이탈리아	7,685
5	독일	6,364
6	스페인	6,117

순위	국가	설비용량(MW)
7	프랑스	5,837
8	오스트리아	5,596
9	인도	4,786
10	한국	4,700
나머지 국가		36,427
전세계 Total		159,494

※ 총 저장용량은 약 9,000GWh



- 2030년까지 78GW 추가 전망 (IEA, IHA)
- 2050년까지 현 설비용량의 3배, 420GW까지 증가 예상 (IRENA)
- 전 세계에서 60여개의 양수발전 설비가 건설되고 있음
- 중국, 호주 등 재생e 선도국을 중심으로 건설 활성화

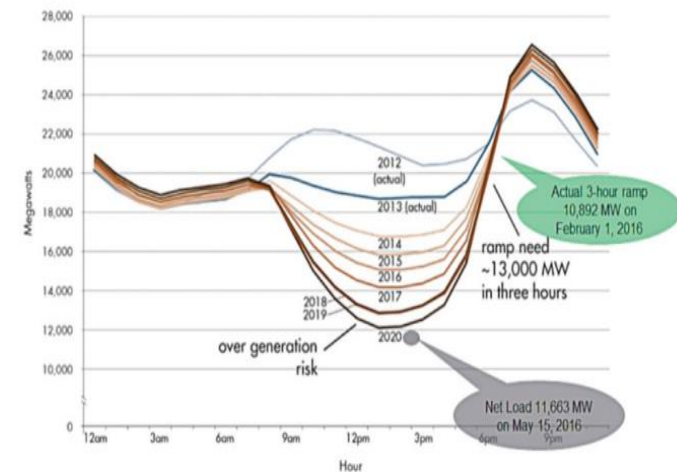
- 2020년 재생에너지 발전비중 20%
- 2035년 전력부문 탈탄소화 완료 목표(바이든 행정부)
 - 향후 양수발전 투자비에서 ITC 혜택 제공 예정(Build Back Better 법안)
 - 에너지부(DOE)에서 인터넷을 통해 최적입지 선정을 도와주는 SW 제공
- ※ 2050 RE 80%시 130~680GW 저장장치 필요, 탄소중립 시 최대 920GW 필요(NREL)
- 양수설비 관련현황
 - 2020년 22.9GW 보유(43개) → 2030년 40GW → 2050년 최대 150GW 까지 확대 예상
 - 2022년 4월 현재 92개 프로젝트(79.8GW)가 인허가 신청 중 (허가완료 3개)
- 10개 주에서 에너지저장장치 설치목표 운영
- FERC는 Closed-Loop 양수에 대해 3년내 허가 완료 절차를 검토 중





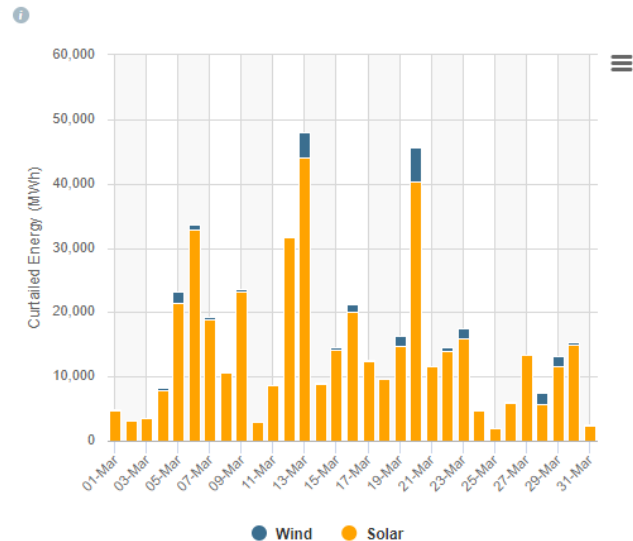
캘리포니아 추진 사례

- 발전설비(81.7GW), 재생에너지(설비 48%, 발전량 41%)
- 4/20(수) 순수요 3~23GW(전력수요 20~27GW)
 - 3시간 내 출력증발 필요량 : 16.6GW
- '22.3월 풍력·태양광 출력제한량 463.3GWh
 - 다양한 출력제한 해소방안 강구 중(storage, DR, EV 등)
- 저장장치 확보 정책
 - 전력회사에 2026년까지 11.3GW의 저장장치 확보 요구(CEC)
 - 2045년까지 약 50GW의 저장장치 필요(CA에너지저장연대)



CAISO DUCK CURVE GRAPHIC ILLUSTRATING POTENTIAL DAILY FUTURE SCENARIOS OF NET LOAD CURVES.

Daily Economic Curtailment in the 5-minute Market (RTD) by Resource Type





West Kauai Energy Project



- 위치 : 호놀룰루 북서쪽 섬(인구 7만)
- 설비 : 20MW/240MWh(12시간)
 - 태양광(35MW)으로 양수 · 배터리(70MW) 충전
 - 공사비 2억 달러(태양광, 배터리, 관개시설 포함)
 - 3개의 기존 저수지 활용
- 진도 : 2022년 착공, 2025년 준공 예정

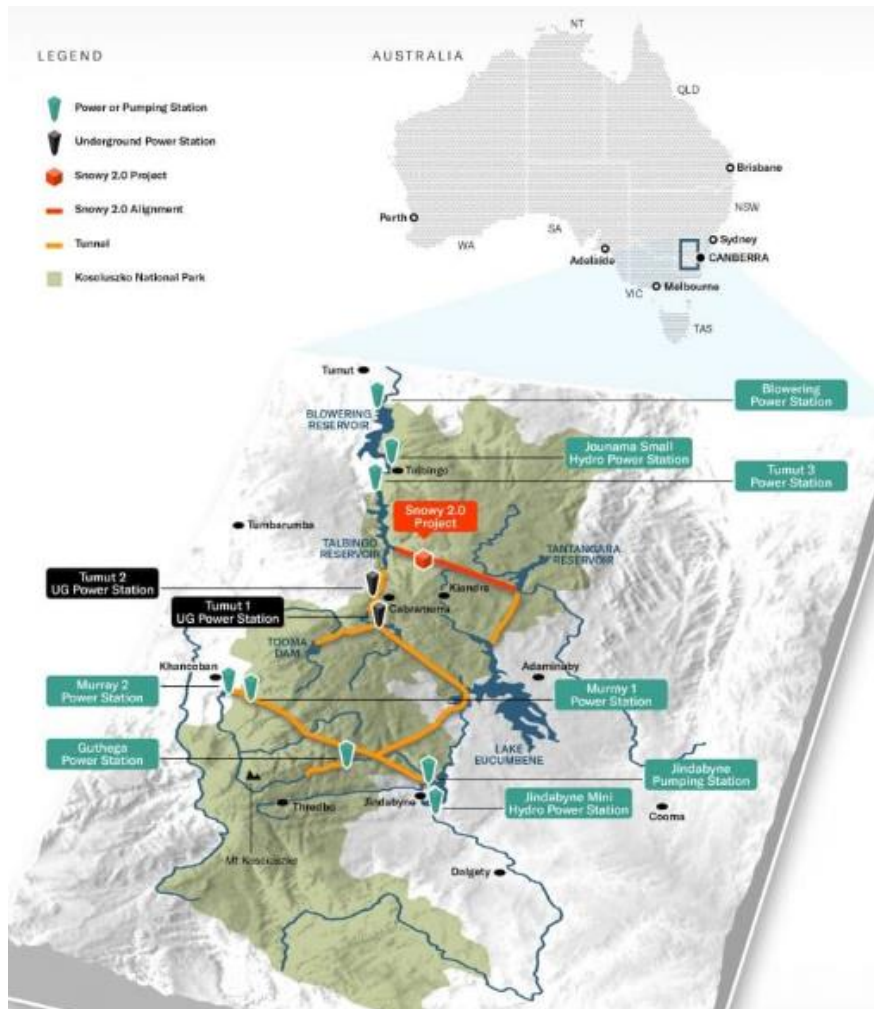
☞ 2030 재생에너지 70% 달성을 위해 추진
(현재 화석연료 발전비중 70%)



- 재생에너지 발전비중 2020년 30% → 2030년 100% 전망
 - 남호주는 2020년 70%, 2025년 100% 도달 전망
 - ※ 세계에서 가장 빠른 보급속도 (미국의 3배, 세계평균의 10배)
- 재생에너지 100% 도달 시 저장장치 필요량 45GW (AEMO)
 - 호주의 총 발전설비 59GW
- 정부 차원에서 양수발전 적극 개발 중
 - Snowy 2.0 PSH, Kidston PSH, Battery of the Nation 프로젝트 등 (건설 중 2개, 개발 중 10개 이상)



Snowy 2.0 PSH Project

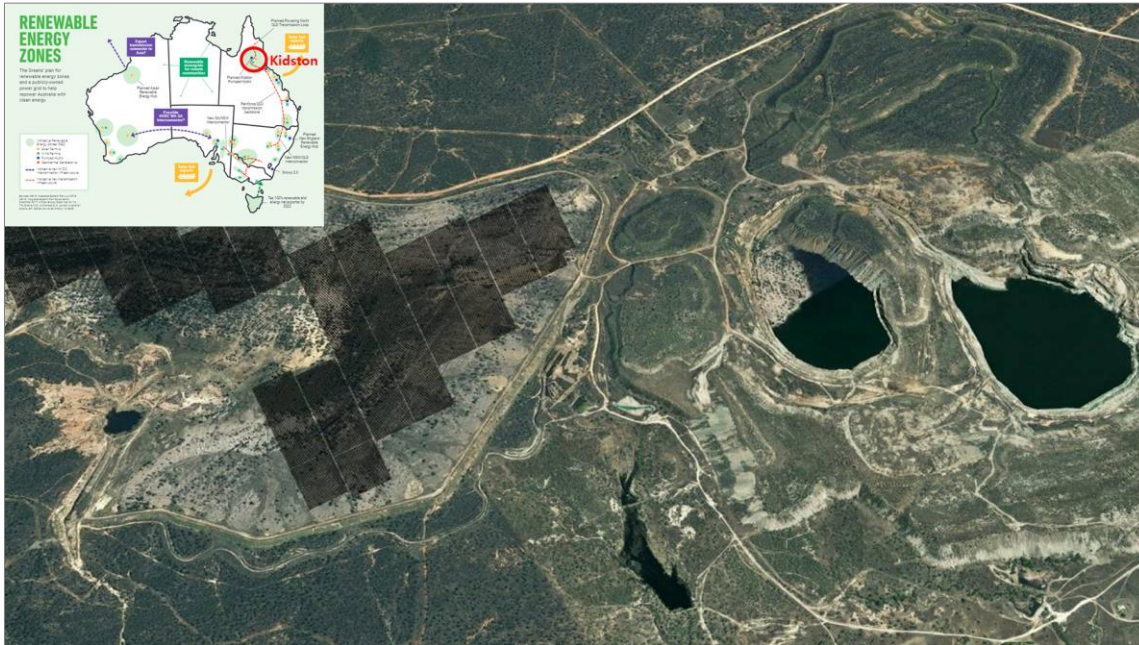


- 위치 : 뉴사우스웨일즈 주
- 용량 : 2GW/350GWh(175h)
 - 펌프/수차 6대(가변속 3대)
 - 설계수명 100년
- 두 개의 기존 저수지 활용(연결)
- 진도 : 2020년 착공, 2026년 준공
- 예산 : 51억 달러
 - 정부 지분 13.8억 달러 투자

👉 2018년, 말콤 턴불 총리 주도로 추진



Kidston PSH Project



- 위치 : 퀸즐랜드 주 소재 폐금광
- 용량 : 250MW/2GWh(8시간)
- 형식 : Closed-Loop
- 진도 : 2021년 착공, 2024년 준공

☞ 최초의 Solar farm 연계형 양수



Battery of the Nation Initiative



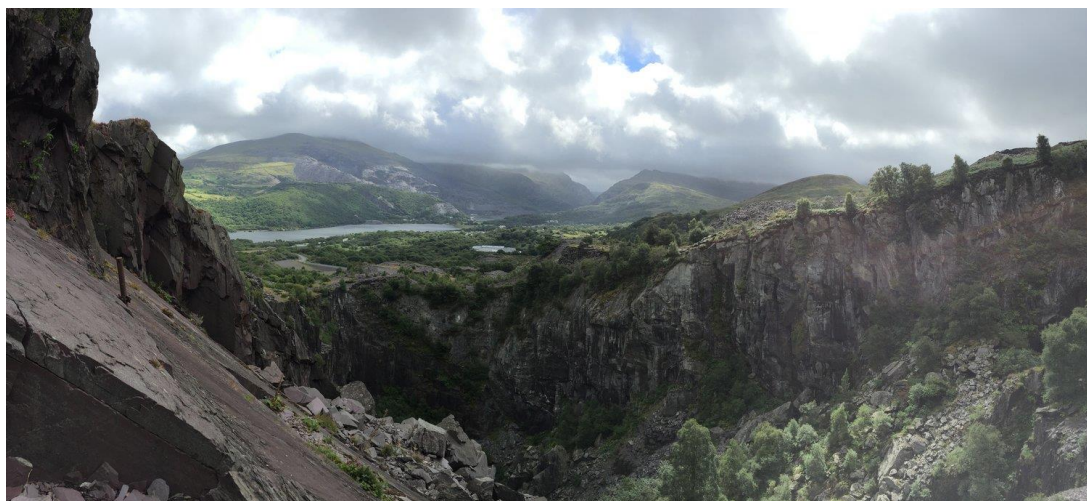
- 태즈매니아주의 풍부한 재생e 전력을 개발해 본토에 공급하려는 구상
 - 기존 수력발전 현대화 및 신규 수력개발 지원
 - 14개 양수입지 개발(3개 프로젝트 집중 지원)
 - GWs급 풍력자원 개발 등
- Marinus Link (본토 연계선 건설)
 - 1,500MW(750x2) 규모의 연계선 추가 건설(2027/2028)

👉 **호주의 에너지전환을 선도하는 대표적 사업**



- 재생에너지 발전비중 2020년 40% (VRE 발전자원 46GW)
- NG-ESO, 미래에너지 시나리오에 2050년 저장장치 필요량 전망
 - 2050 저장장치 필요량 24~63GW 중 양수발전 최대 4.8GW(79GWh)
- ※ 민간연구소(Aurora)는 2035년까지 24GW의 장주기 저장장치 필요 전망
- 정부차원에서 장주기 저장장치 개발 필요성 검토 및 실증 중
 - Call for Evidence 및 저장장치 실증사업 지원 등
- 스코틀랜드 등지에 5GW 이상의 신규 양수 프로젝트 개발 중

Wales, Glyn Rhonwy PSH Project



- 용량 : 100MW/700MWh
 - 낙차 250m, 저장효율 81%
 - 설비수명 125년
- ※ 폭탄 폐기처리장으로 쓰던 2개의 채석장을 양수발전용 저수지로 활용
- 순수 민간자본 투자사업(£1억)
- 진도 : 정부허가(17), 공사 인가 준비중
 - 2024. 3월 이전 착공 예정

👉 영국에서 30년 만에 재개된 양수프로젝트



- **재생에너지 발전비중 2020년 27%**
 - * 총 발전설비 2,377GW (재생에너지 1,026GW)
- **양수 확대 계획 : 21년 36GW ▶ 25년 62GW ▶ 30년 120GW**
 - 현재 30개 이상의 양수발전소 건설 중
- **장기적으로 500개 680GW의 양수발전소 건설을 검토 중**
- **양수발전 설비를 송배전 자산으로 간주**
 - 에너지는 시장가격으로 판매, 고정비(용량요금)를 송배전요금에서 회수

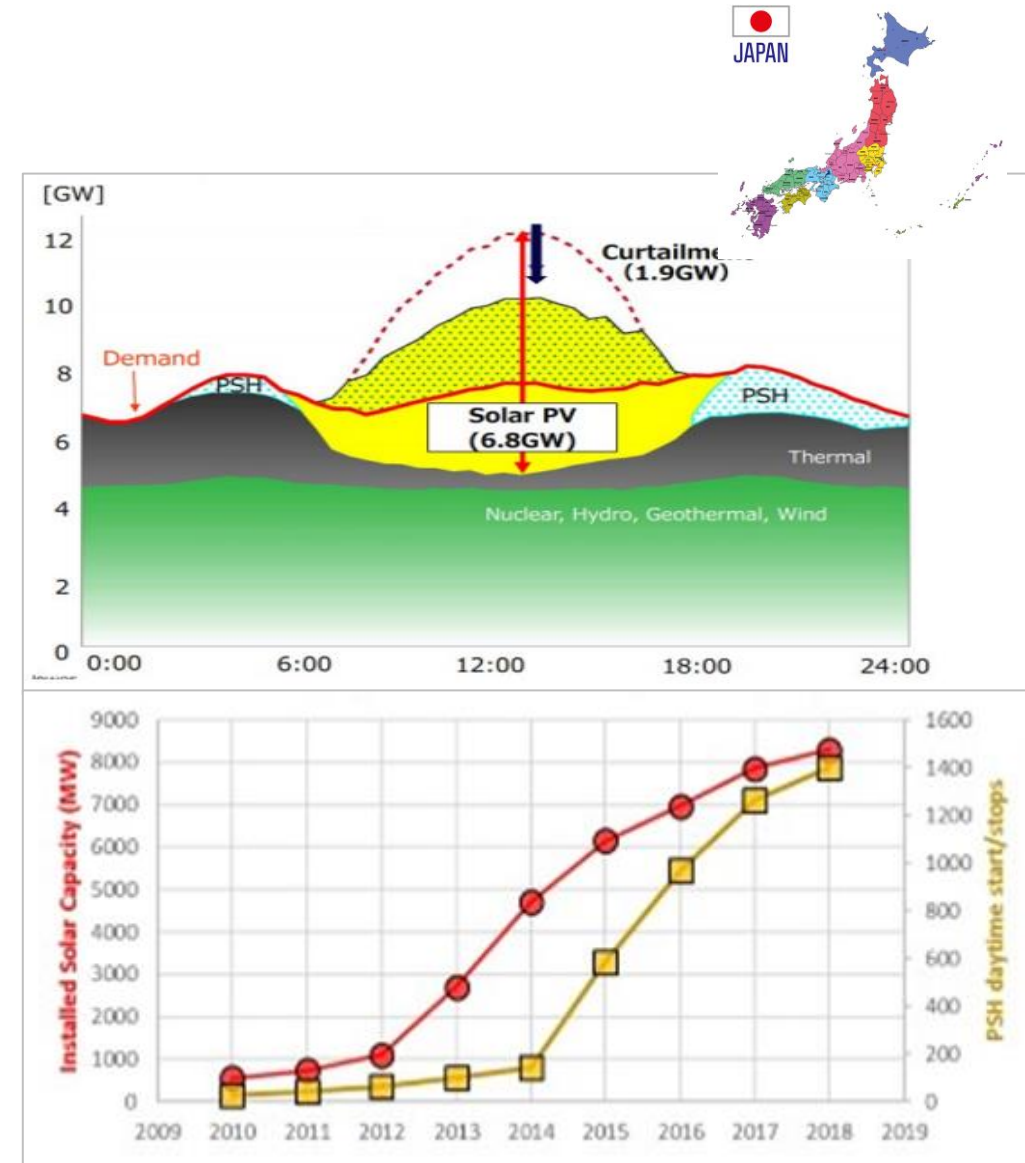


No	Station	Capacity (MW)	Expected Completion
1	Meizhou Pumped Storage Power Station	2,400	2022
2	Changlongshan Pumped Storage Power Station	2,100	2023
3	Wendeng Pumped Storage Power Station	1,800	2021
4	Qingyuan Pumped Storage Power Station	1,800	2024
5	Jinyun Pumped Storage Power Station	1,800	2026
6	Tai'an-2 Pumped Storage Power Station	1,800	2029
7	Tiantai Pumped Storage Power Station	1,700	2027
8	Dayahe Pumped Storage Power Station	1,600	2019
9	Hunyuan Pumped Storage Power Station	1,500	2028
10	Luoning Pumped Storage Power Station	1,400	2026
11	Pingjiang Pumped Storage Power Station	1,400	2025
12	Xiamen Pumped Storage Power Station	1,400	2024
13	Ninghai Pumped Storage Power Station	1,400	2024
14	Zhen'an Pumped Storage Power Station	1,400	2023
15	Jurong Pumped Storage Power Station	1,350	2024
16	Yangjiang Pumped Storage Power Station	1,200	2023
17	Fukang Pumped Storage Power Station	1,200	2024

No	Station	Capacity (MW)	Expected Completion
18	Baiyun Pumped Storage Power Station	1,200	2023
19	Zhouning Pumped Storage Power Station	1,200	2022
20	Huanggou Pumped Storage Power Station	1,200	2022
21	Jinzhai Pumped Storage Power Station	1,200	2021
22	Panlong Pumped Storage Power Station	1,200	2022
23	Funing Pumped Storage Power Station	1,200	2027
24	Qujiang Pumped Storage Power Station	1,200	2025
25	Jiaohe Pumped Storage Power Station	1,200	2026
26	Weifang Pumped Storage Power Station	1,200	2026
27	Hami Pumped Storage Power Station	1,200	2026
28	Tianchi Pumped Storage Power Station	1,200	2021
29	Yimeng Pumped Storage Power Station	1,200	2022
30	Yixian Pumped Storage Power Station	1,200	2026
31	Zhirui Pumped Storage Power Station	1,200	2025
32	Yuanqu Pumped Storage Power Station	1,200	2028
33	Pan'an Pumped Storage Power Station	1,200	2028
34	Wuyue Pumped Storage Power Station	1,000	2026
계	34개소	47,450	

출처: <https://en.wikipedia.org/wiki/> 에서 발췌

- 재생에너지 비중 2020년 20.8%
 - 2030년까지 36~38%가 목표
 - 세계 2위의 양수설비 보유국(27.6GW)
 - 총 3.3GW의 가변속 양수설비 보유
 - 태양광이 크게 증가하면서 양수설비의 역할 증가
 - 2021년 규슈지역 피크수요의 65%~85%를 차지
- ☞ 태양광 증가에 비례하여 양수의 기동정지 횟수 증가
(2012년 대비 30배)





- **재생에너지 비중 2021년 46%**
 - 총 발전설비 93GW중 재생에너지 34GW
- **2050년 저장장치 확보목표 30GW**
- **양수발전설비 총 6.1GW 보유**
 - 2GW/24GWh Cortes-La Muela PSH 등
 - 도서지역에도 양수발전소 건설 추진



👉 (MIT 연구)스페인은 재생에너지의 지속 확대로 양수발전 추가설치 필요



Salto de Chira Project



■ 200MW/3,500MWh(17.5시간)

- 지역 피크의 36% 공급가능 용량
- 낙차 400m, 공사비 3.2억 유로

■ 기존댐 저수지 2개를 연결 시공

- 담수화 설비로 수자원 보충 후 활용

■ 2022년 착공, 2026년 준공예정

☞ 지역 재생에너지 확대를 위한 기반 확충
(현재 RE 21%수준)

※ 그랜드 카나리 섬 인구 87만, 면적 1,560km²
(제주도 인구 70만, 면적 1,846km²)

- **오스트리아** : 5.6GW의 양수설비 보유, 유럽 전역의 AS시장 공략
- **아일랜드** : 292MW 양수설비로 43%의 재생에너지 비율 관리
- **뉴질랜드** : 최초의 양수 건설을 검토 중(Lake Onslow PSH)
- **인도** : 통합재생에너지프로젝트 (양수1.2GW+태양광2+풍력0.4) 추진 중
- **인도네시아** : 1GW급 양수 프로젝트에 WorldBank 대출 승인
- **필리핀** : 두번째 양수프로젝트 추진 중(루손 120MW Aya PSH)
- **태국** : 1GW급 양수 보유, 800MW급 신규양수 건설 중

- **우즈베키스탄** : 프랑스 EDF와 200MW 신규양수 개발 중
- **아랍에미리트연합** : 최초의 250MW Hatta PSH 건설 중
- **이스라엘** : 2020년 300MW Gilboa PSH 상업운전 개시
- **남아프리카공화국** : 양수 2.9GW보유, 폐금광지역 양수 설치 가능성 조사 중
- **칠레** : 태양광 단지 연계 300MW 해수양수 개발 중(Tarapacá)
- **이란, 모로코, 이집트** 등의 국가에서도 신규 양수 개발 중



양수의 비용 경쟁력

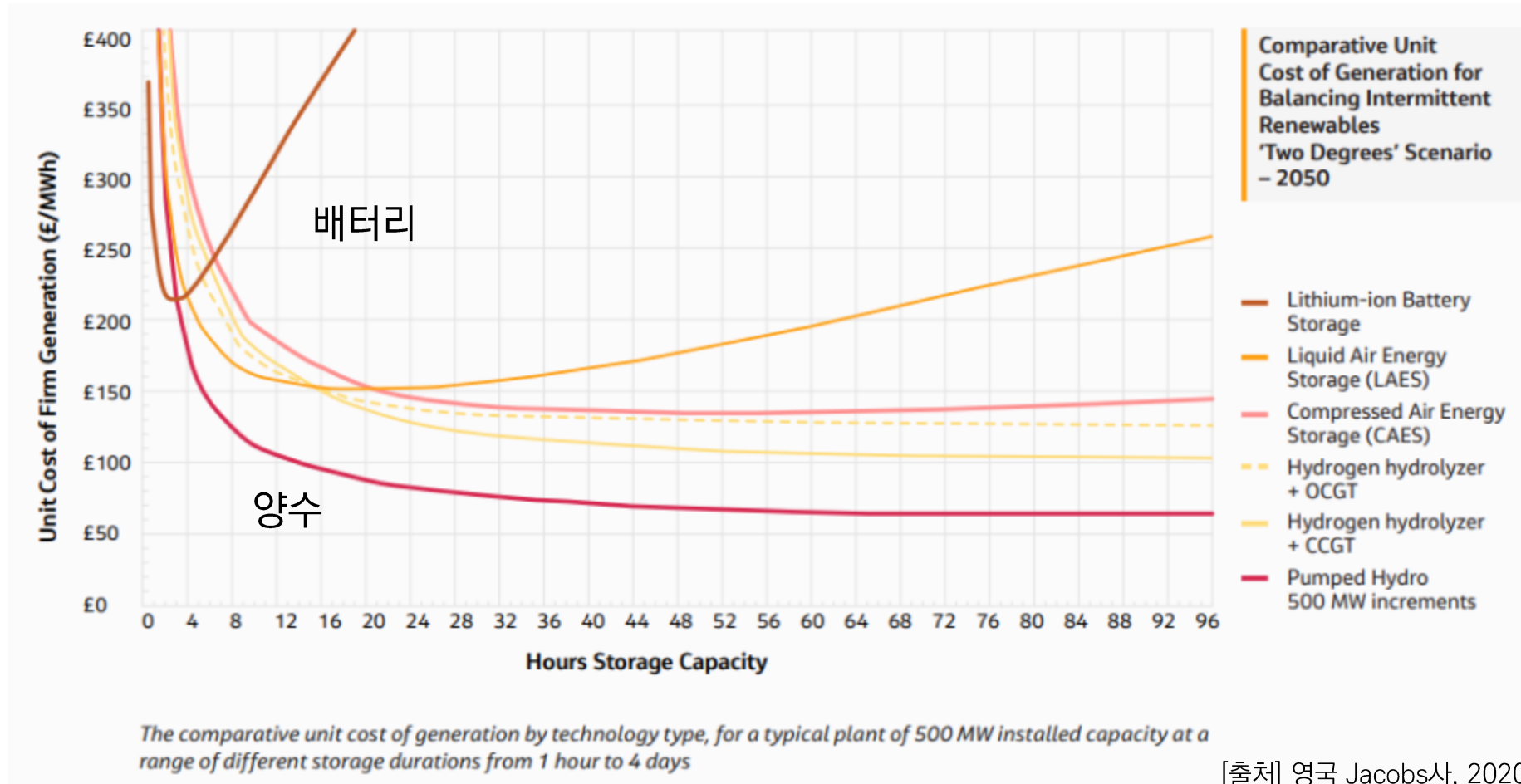


기술	비용	기준설비	Capex		설비수명	저장효율	비 고
			(USD/kW)*	(USD/kWh)			
양수발전		1,000MW/10hr	2,910	220	40년	80%	가장 저렴
리튬이온B		100MW/10hr	8,130	247	10년	86%	
납축전지		100MW/10hr	9,050	305	12년	79%	
VRFB		100MW/10hr	9,450	319	15년	68%	
압축공기		1,000MW/10hr	3,110	109	30년	52%	입지제약
수소저장		100MW/10hr	4,600	161	30년	35%	

* (USD/kW) : 80년(양수발전소 실제수명)동안 저장장치를 설치·운영한다는 조건 하에서 소요되는 건설비

※ IFPSH는 미국DOE, 국제수력협회, 전력회사, 설비공급사 등 13개 기관이 참여한 '양수발전 국제포럼'임

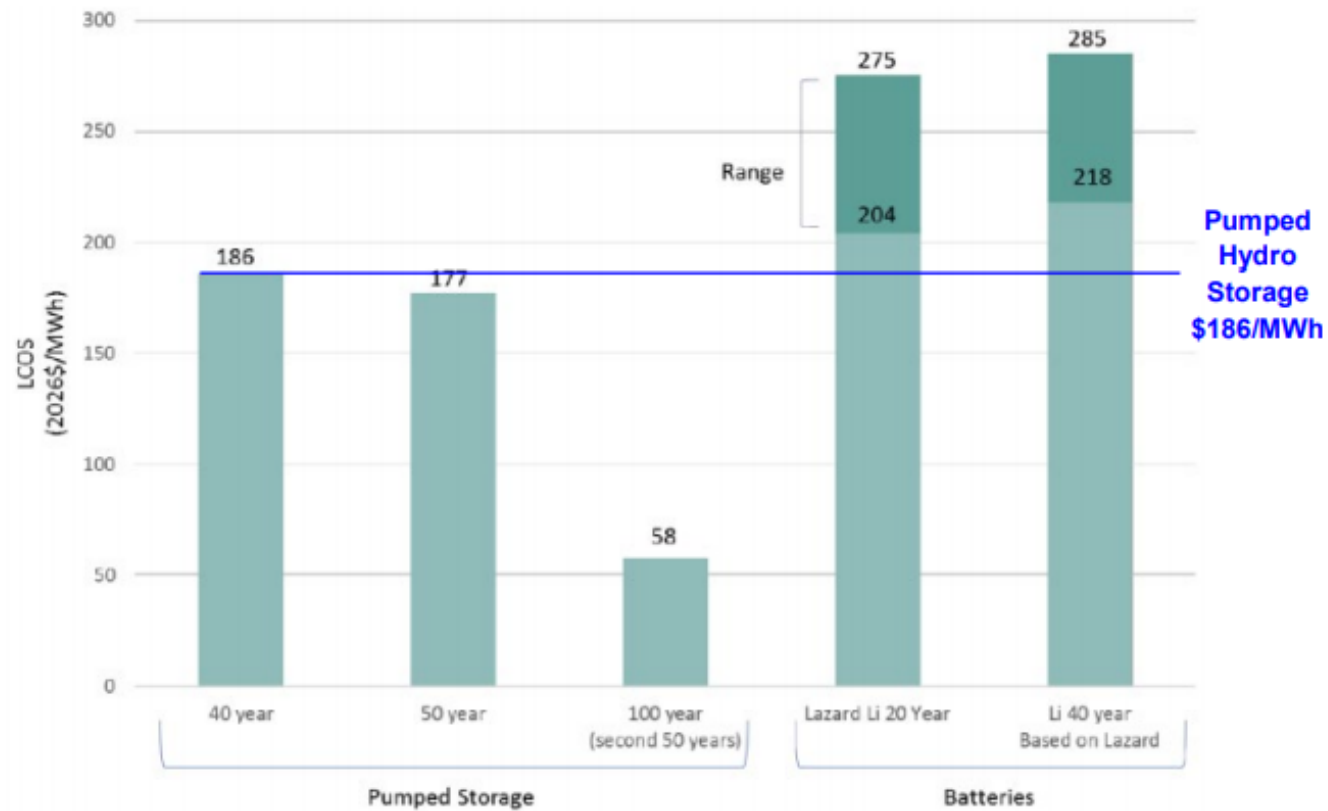
👉 장주기 대규모 에너지 저장기술 중 양수발전이 가장 저렴



[출처] 영국 Jacobs사, 2020

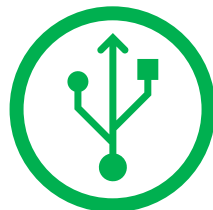
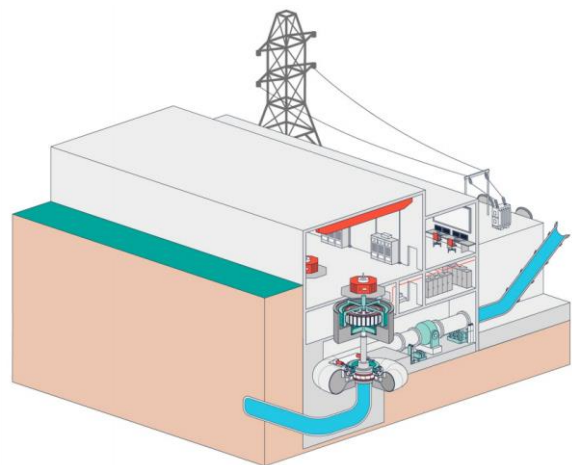
👉 리튬이온 배터리는 단주기, 양수는 장주기 저장에 가장 적합

Levelized Cost of Storage Comparison, Pumped Hydro Storage versus Li-ion Batteries



(Source: Lazard and San Diego County Water Authority)

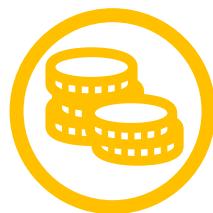
☞ 양수발전은 수명이 길어 매우 경제적인 저장장치임



기술적
Technical



정책적
Policy



경제적
Economic



기타
Misc.

- 100년 이상의 검증을 거친 기술적 안정성
- 전력공급 안정, 전기품질을 위한 폭넓은 기능
- 비상시에도 신뢰할 수 있는 최후의 급전자원
- 세계 대부분의 지역에서 적극 확대 중
- 도시지역의 핵심 에너지 저장수단으로 채택
- 산업과 환경문제를 동시에 해결할 수단
- 수명이 길어 매우 경제적인 전력 저장장치
- 출력제한을 대폭 감소시켜 사업자 수익증대
- 시간별 전력가격 편차를 줄여 시장 안정화
- 화석연료 피크발전기의 기동 최소화
- 전력계통 복원력 확보의 핵심수단
- 도시지역 물관리 정책과 시너지 가능



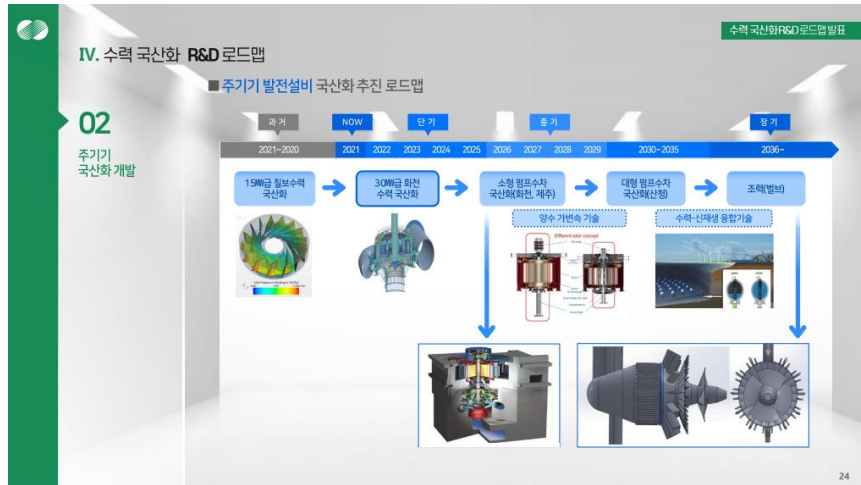
제주 CFI 달성을 위한 준비사항





Global Pumped Hydro Atlas 중

- **우리나라는 양수발전 입지가 많음**
 - 호주국립대 Andrew Blakers 교수팀 연구결과 “Global Pumped Hydro Atlas” 개발(2017년)
 - Closed-loop 형식의 양수발전 설치가능 입지는 전세계 60만개, 국내에도 100개 이상 존재
 - **한수원, 국내 소규모양수 입지조사 시행**
 - 시기 : 2021. 5 ~ 2022. 7
 - 조사 : 기존 저수지 활용 등 환경영향 최소화
 - 결과 : 50~150MW급 예비후보지 15개 확인
- 👉 제주도 내 양수발전 설치 가능한 곳 3개소

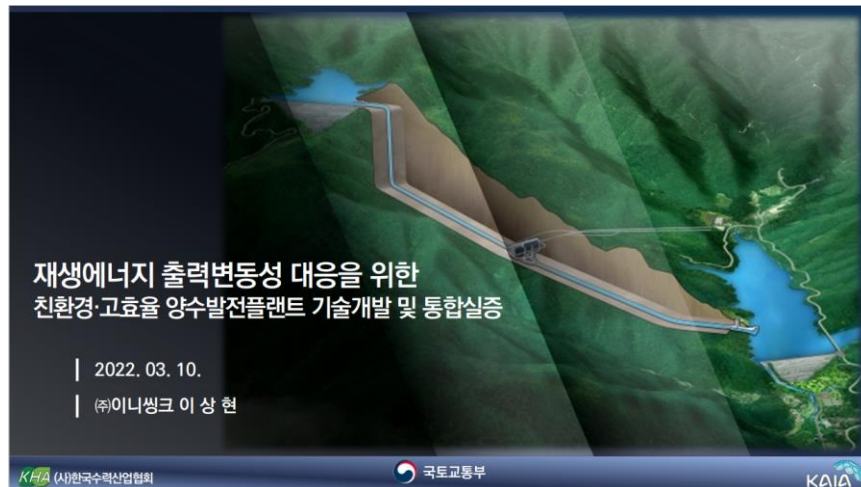


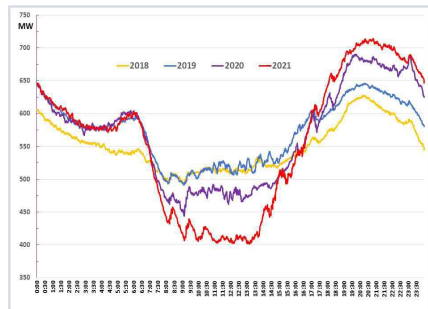
■ 소형 양수 핵심설비 국산화 노력

- 한수원, 양수발전 기술 국산화 로드맵 발표('21.11)
- 에기평, 소형 가변속 양수설비 개발 연구과제 기획('21~'22)
- KAIA, 소형 양수발전플랜트 실증 연구과제 기획('21~'22)

■ 한수원, 소규모 양수 특성 및 역할 연구

- 소규모 양수 계통기여도 및 최적형식 분석('21.6~'22.7)
- ☞ 제주지역 소규모양수 적용시 전력계통 기여도 분석 (형식별 이용률, 기여도, 운영방안 등)





■ CFI 제주 달성을 위한 핵심적 에너지 저장장치

- 풍력, 태양광 출력제한 완화 및 제주계통 안정 운영 도모
(참조사례: 미국 하와이, 스페인 카나리섬 등)

■ 제주도내 대규모 용수관리 수단 확보

- 집중호우시 양수발전용 저수지를 이용한 홍수피해 완화
- 가뭄 시 양수발전용 저수지에 저장된 물을 공유

■ 양수설비의 관광자원화 및 지역경제 활성화

- 양수발전 저수지 및 터널의 관광자원화
(청평양수 연 25만명 방문, 무주양수 작업터널 와인저장고)
- 발전소 건설 및 운영을 통한 지역경제 발전에 기여

Conclusion

1

양수발전은 가장 저렴하고 기술적으로 신뢰할 수 있는 저장장치

2

제주 CFI 달성을 위해 양수발전소 설치 매우 필요

- 양수발전은 제주의 넷-제로와 전력계통 안정운영의 가장 확실한 수단

3

환경파괴 우려, 투자환경 미흡 등 어려움 있지만 극복 가능



Conclusion

당국의 의지 + 업계의 노력 + 지역사회 호응

제주양수 가능



경청해 주셔서 감사합니다!

대한민국 수력산업 도약의 디딤돌



(사)한국수력산업협회
KOREA HYDRO POWER INDUSTRY ASSOCIATION