

2021 추계 한국원자력학회 여성지부 워크숍

탄소중립과 원자력 융·복합기술

일시 : 2021년 10월 20일 (수)

주최 : 한국원자력학회 여성지부



사단 한국원자력학회
KOREAN NUCLEAR SOCIETY

KNS(P)-006-2021 추계학술발표회 워크숍 발표자료집

CONTENTS

- I. 탄소중립과 원자력의 역할, 임인철 (한국원자력연구원, 미래전략본부)
 - II. 원자력선박 : 3%를 위한 해답, 김지희 (한국원자력연구원, 혁신SMR계통개발부)
 - III. 반영구적사용이 가능한 베타전지 개발, 최병건 (한국전자통신연구원, 지능형반도체연구본부)
 - IV. 여성지부 소개
-

[KNS 2021 추계학술발표회]

탄소중립과 원자력 융·복합 기술

탄소중립과 원자력의 역할

2021. 10. 20.(수)

임 인 철

한국원자력연구원

한국방사선산업학회 회장/원자력협의회 회장



(사)한국방사선산업학회
Korean Society of Radiation Industry

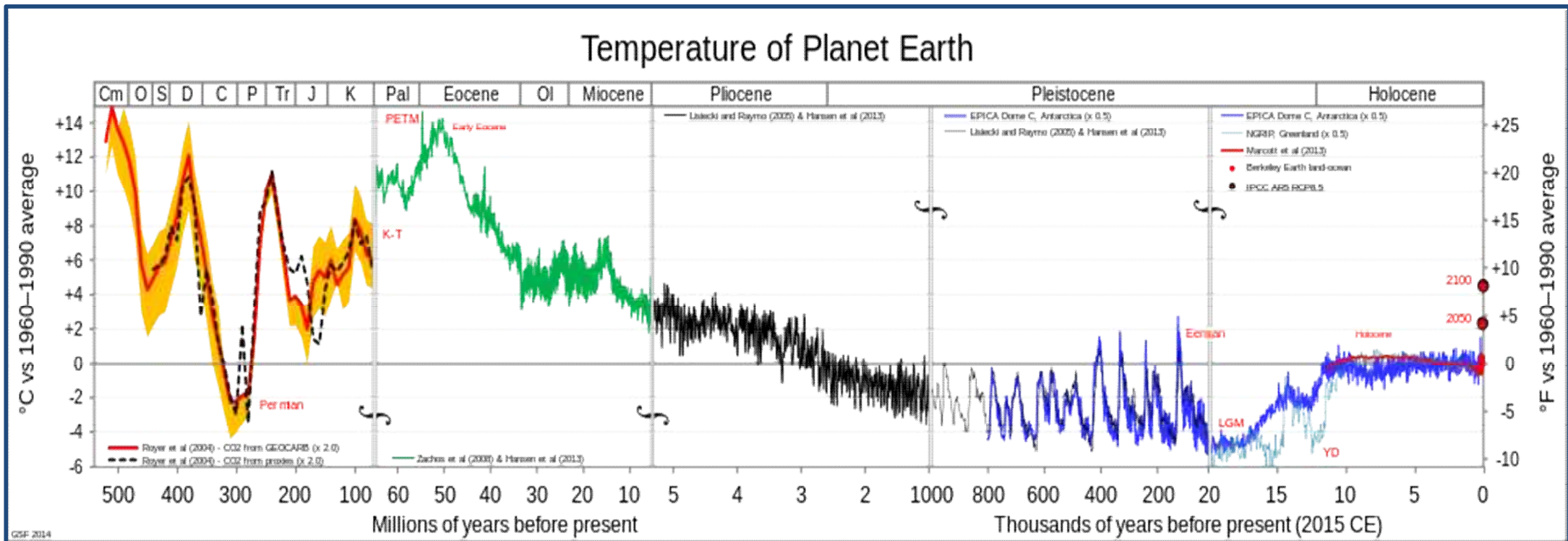
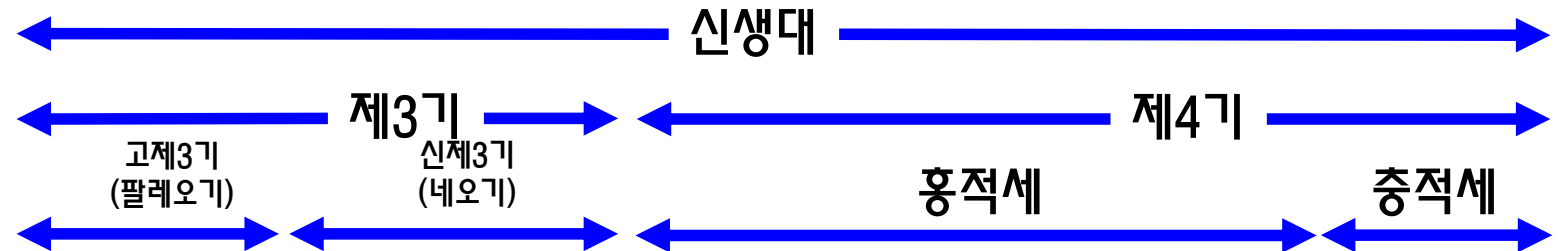
- 기후 변화 관련 국제적 논의
- 주요국의 탄소중립 정책
- 우리나라의 탄소중립 정책
- 원자력과 융복합 기술의 기여
- 우리가 할 일

기후 변화 관련 국제적 논의

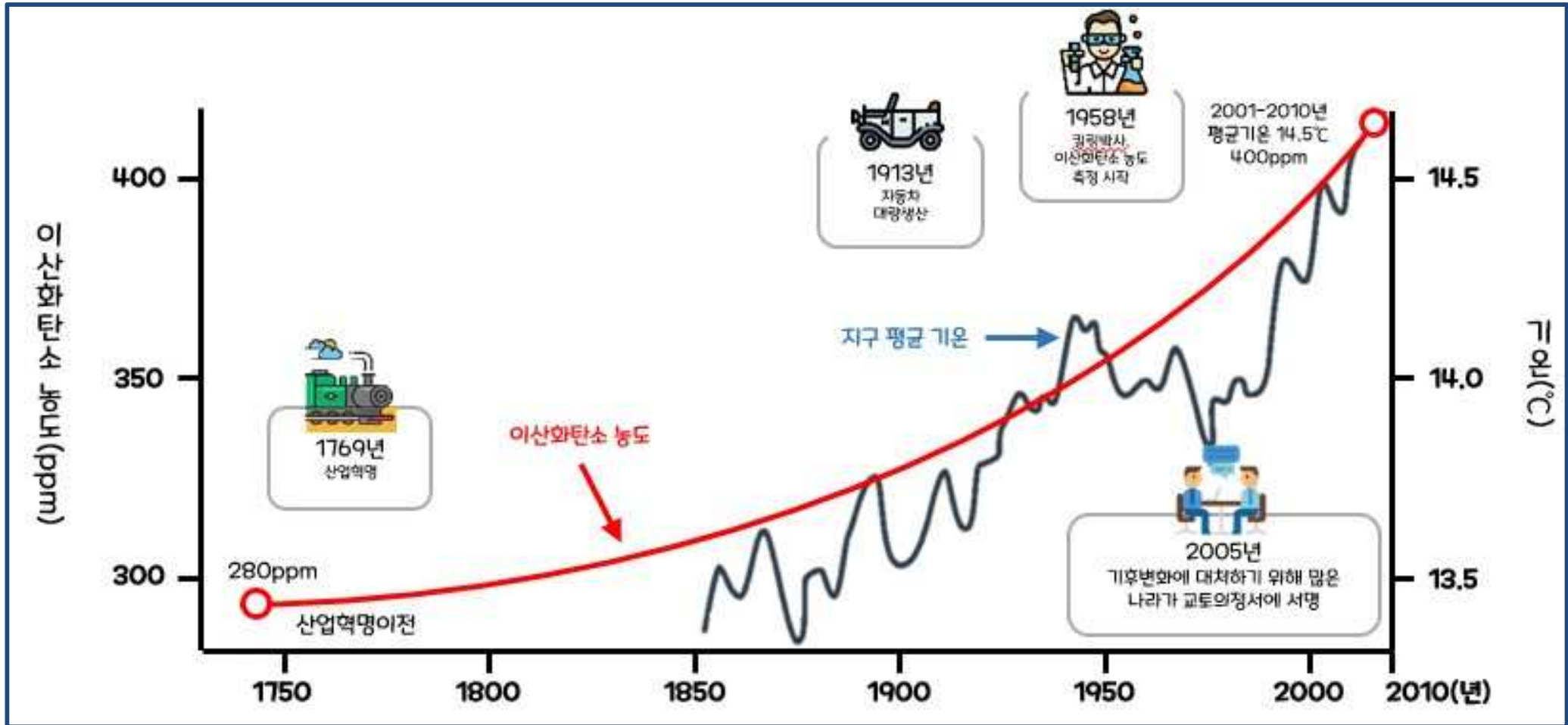


2015년 9월, UN Sustainable Development Summit(지속성장 정상회의)에 채택

- 스티븐 호킹(비즈니스 인사이더, 2016.01.20)
 - 핵전쟁
 - 지구온난화
 - 바이러스
 - 로봇
- 빌 게이츠(뮌헨 안보컨퍼런스, 2017.02)
 - 기후변화
 - 핵전쟁
 - 바이러스
- 노벨상 수상자 50명(THE(The Times High Education), 2017)
 - 인구 증가 혹은 환경 악화
 - 핵전쟁
 - 전염성 질병
 - 이기심, 부정직함, 인간성 상실
 - 트럼프 등 무지한 지도자



출처 : 위키피디아



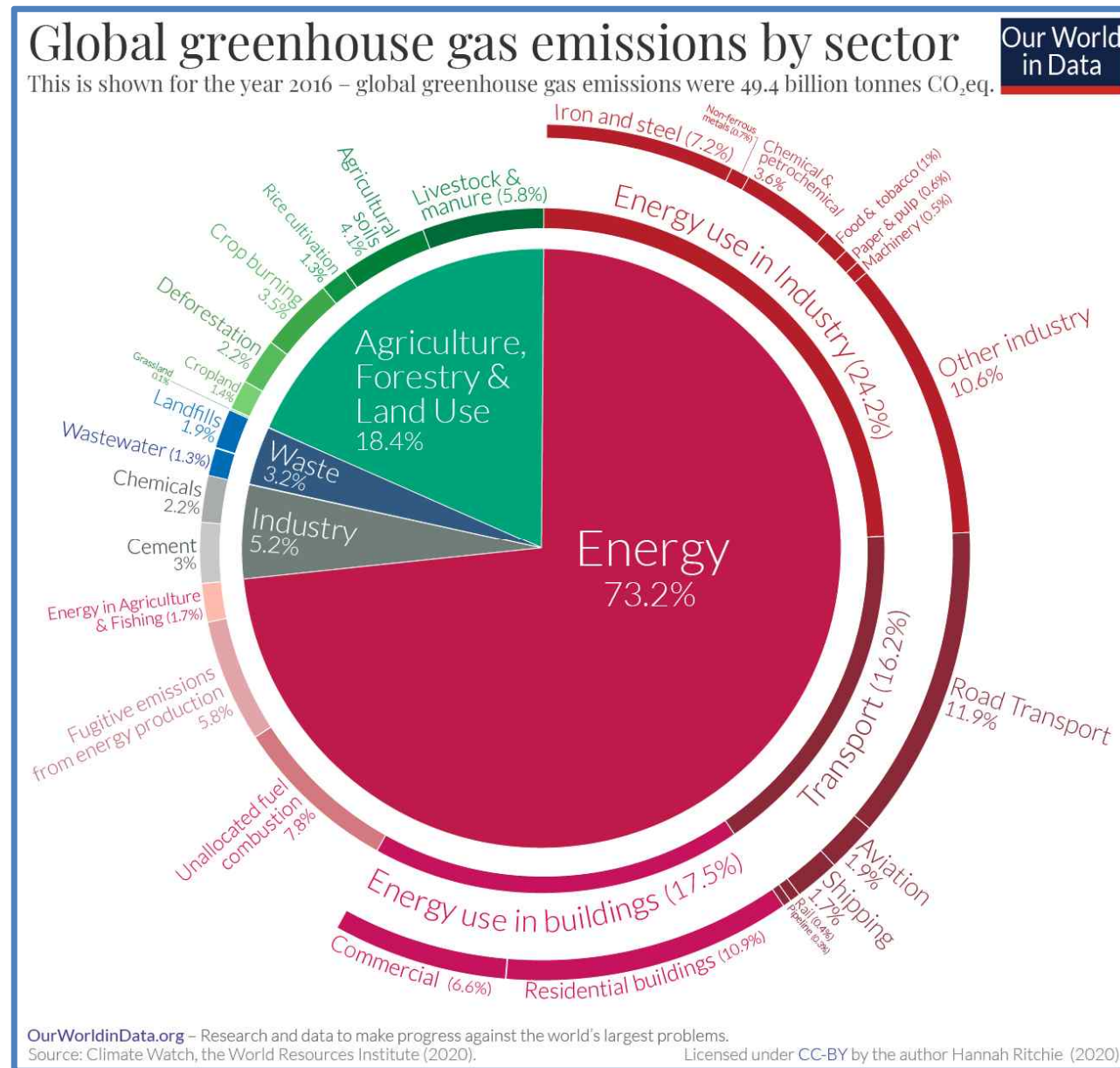
출처 : 국립전북기상과학관 블로그

- 로마클럽 : 성장의 한계(1972)
 - 1968년에 결성(서유럽의 과학자, 경제학자, 교육자, 경영자)
 - 인류의 위기에 대응할 수 있는 길을 조언하는 활동
 - 성장의 한계(1972) : “지금과 같은 추세로 세계 인구와 산업화 오염, 식량 생산, 자원 약탈이 계속된다면 지구는 앞으로 100년 안에 성장의 한계에 도달할 것
- UN 기후변화정부간협약체(IPCC) 발족(1988)
 - UN 산하 정부간 기후 변화 협약체
 - 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)가 공동으로 설립
 - 기후변화 관련 국제협약 관련 문제에 대한 특별보고서 작성
- 국제 협약
 - 유엔기후협약(리우 협약) : 1992
 - 교토의정서 : 1997
 - 파리기후변화협약 : 2015
- 기후변화 당사국 총회(COP) : 1995~
 - 기후변화 국제협약의 이행 방안을 논의하기 위해 개최
 - COP1(1995, 베를린)..... COP26(2021, 글래스고)

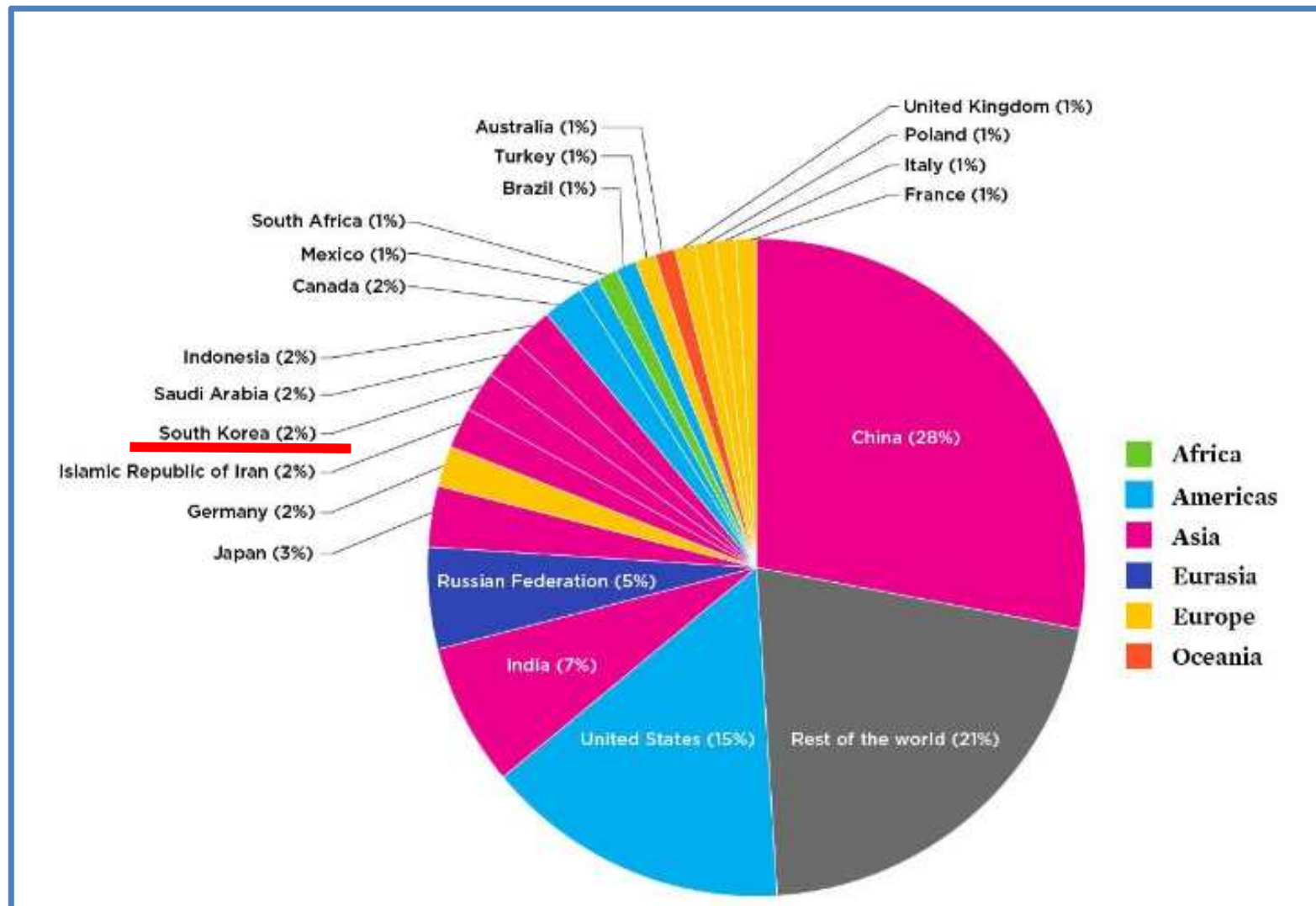
구분	UN기후변화협약	교토의정서	파리협정
설립 /기간	채택: 1992.06 발효: 1994.03	채택: 1997.12 발효 : 2005.02~2020	채택: 2015.12 발효: 2016.11 시행: 2021.01 (종료시점 없음)
의의	기후 변화 대처 관련 최초 국제협약	기후변화협약에 대한 선진국 감축목표 및 구체적 이행방안 결정	모두가 참여하는 포괄적 체제
목표	온실가스농도 안정화	온실가스 배출량 감축 -1차: 90년 수준의 5,2% 감축 -2차: 90년 대비 18%감축	지구 평균 온도를 산업화 이전 대비 +2°C로 제한
주요 내용	선진국과 개도국에 다른 종류의 기후변화 대응 의무 부과	선진국에만 온실가스 감축의무 부여	자발적 감축목표 설정(NDC) 및 이행 수단 포괄 제시 요구
국가	192개국	선진국 37개국(온실가스 배출 기준 상위 15% 국가)	협약 당사국 195개 (온실가스 배출기준 상위 87% 국가)

- 2021. 10. 31 ~ 11. 12
- 영국 글래스고
- Pre-COP Forum(2021-09-17, 미국 주도)
- 회의 논의 주제
 - 2030년까지의 탄소 배출량 감축 계획
 - Global Methane Pledge(2030년까지 2020년 배출량 기준 30% 감축)
 - 친환경 자동차로의 전환
 - 석탄 발전 단계적 감축
 - 나무 벌목 줄이기

주요국의 탄소중립 정책



<https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>



<https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions>

The 20 countries that emitted the most carbon dioxide in 2018

Rank	Country	CO ₂ emissions (total)
1	China	10.06GT
2	United States	5.41GT
3	India	2.65GT
4	Russian Federation	1.71GT
5	Japan	1.16GT
6	Germany	0.75GT
7	Islamic Republic of Iran	0.72GT
8	South Korea	0.65GT
9	Saudi Arabia	0.62GT
10	Indonesia	0.61GT
11	Canada	0.56GT
12	Mexico	0.47GT
13	South Africa	0.46GT
14	Brazil	0.45GT
15	Turkey	0.42GT
16	Australia	0.42GT
17	United Kingdom	0.37GT
18	Poland	0.34GT
19	France	0.33GT
20	Italy	0.33GT
21	Kazakhstan	0.32GT

All emissions from 2018. Fuel combustion only. GT = Metric gigatons

<https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions>

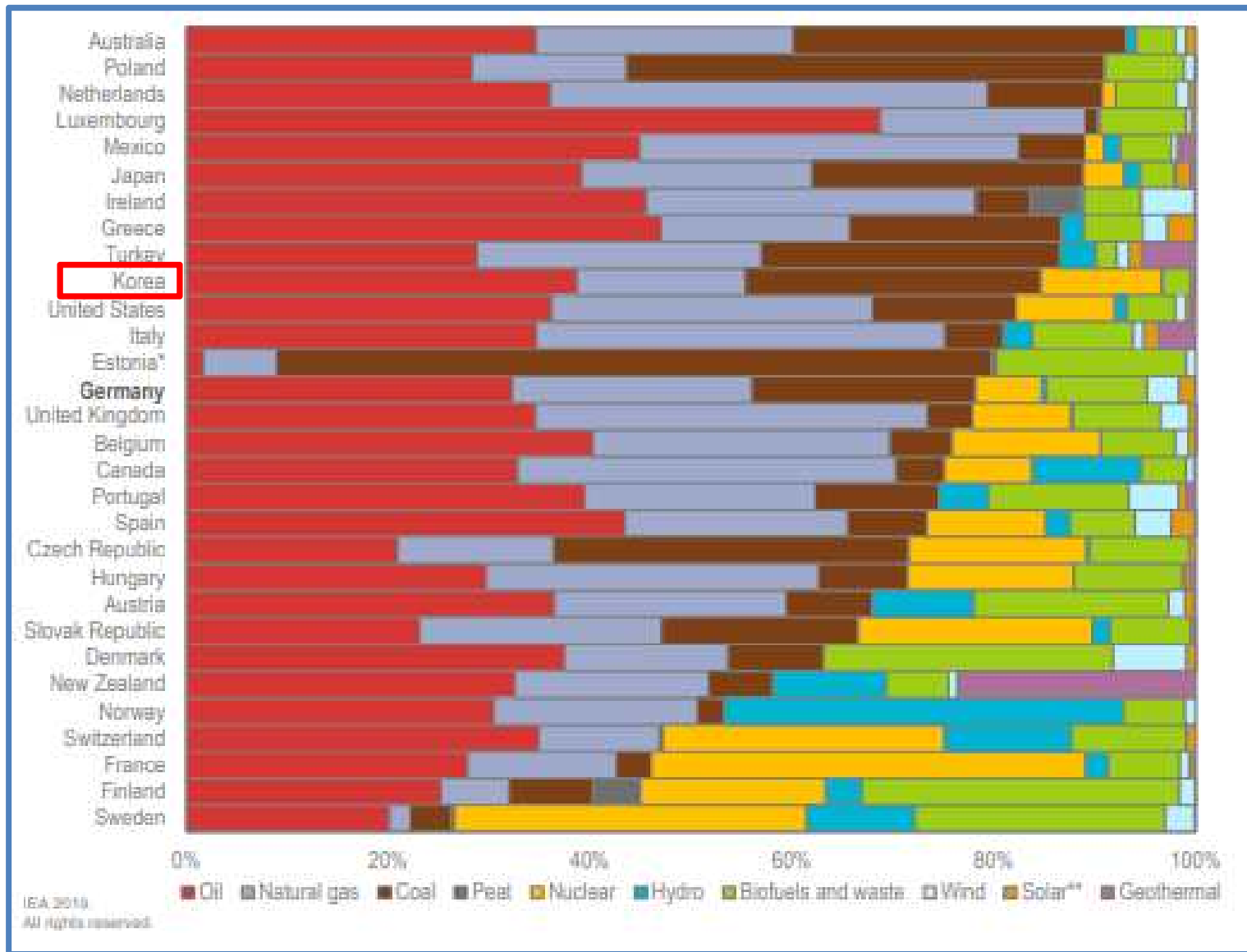
2018 rankings by per capita emissions

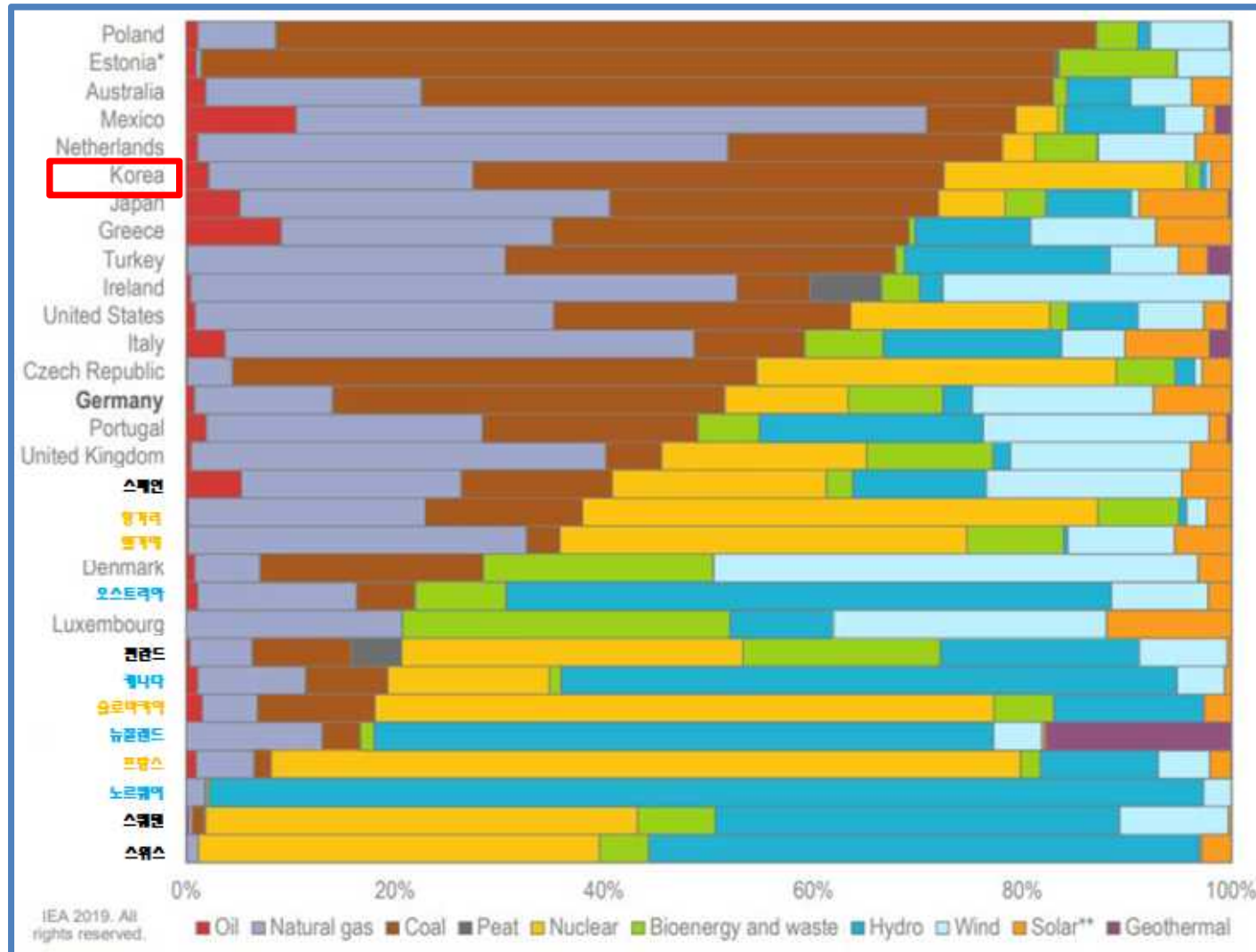
Ton/person

Rank	Country	CO ₂ emissions (total)
1	Saudi Arabia	18.48T
2	Kazakhstan	17.60T
3	Australia	16.92T
4	United States	16.56T
5	Canada	15.32T
6	South Korea	12.89T
7	Russian Federation	11.74T
8	Japan	9.13T
9	Germany	9.12T
10	Poland	9.08T
11	Islamic Republic of Iran	8.82T
12	South Africa	8.12T
13	China	7.05T
14	United Kingdom	5.62T
15	Italy	5.56T
16	Turkey	5.21T
17	France	5.19T
18	Mexico	3.77T
19	Indonesia	2.30T
20	Brazil	2.19T
21	India	1.96T

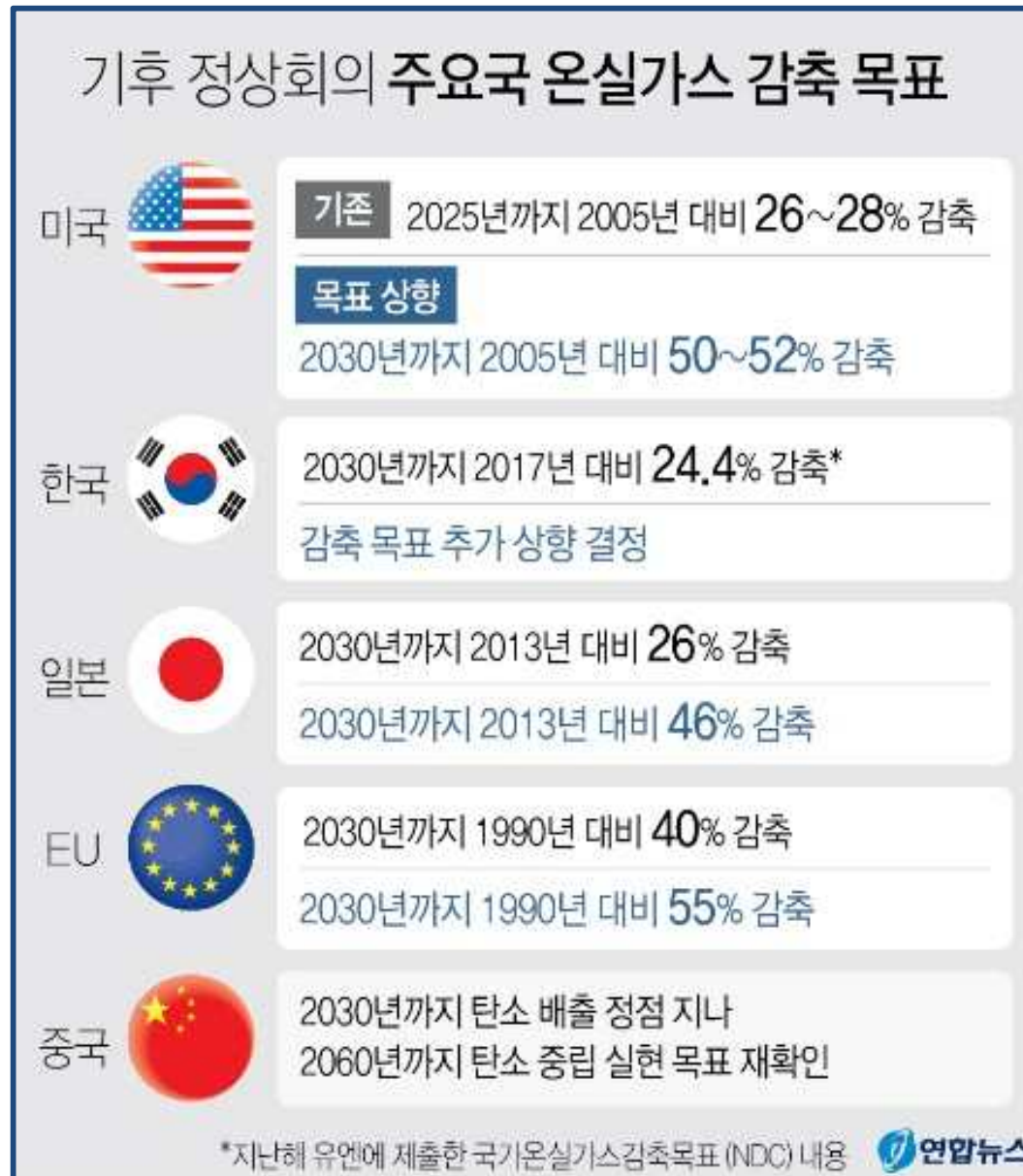
<https://www.ucsusa.org/resources/each-countrys-share-co2-emissions>

각국의 1차 에너지원 구성(IEA, 2019)





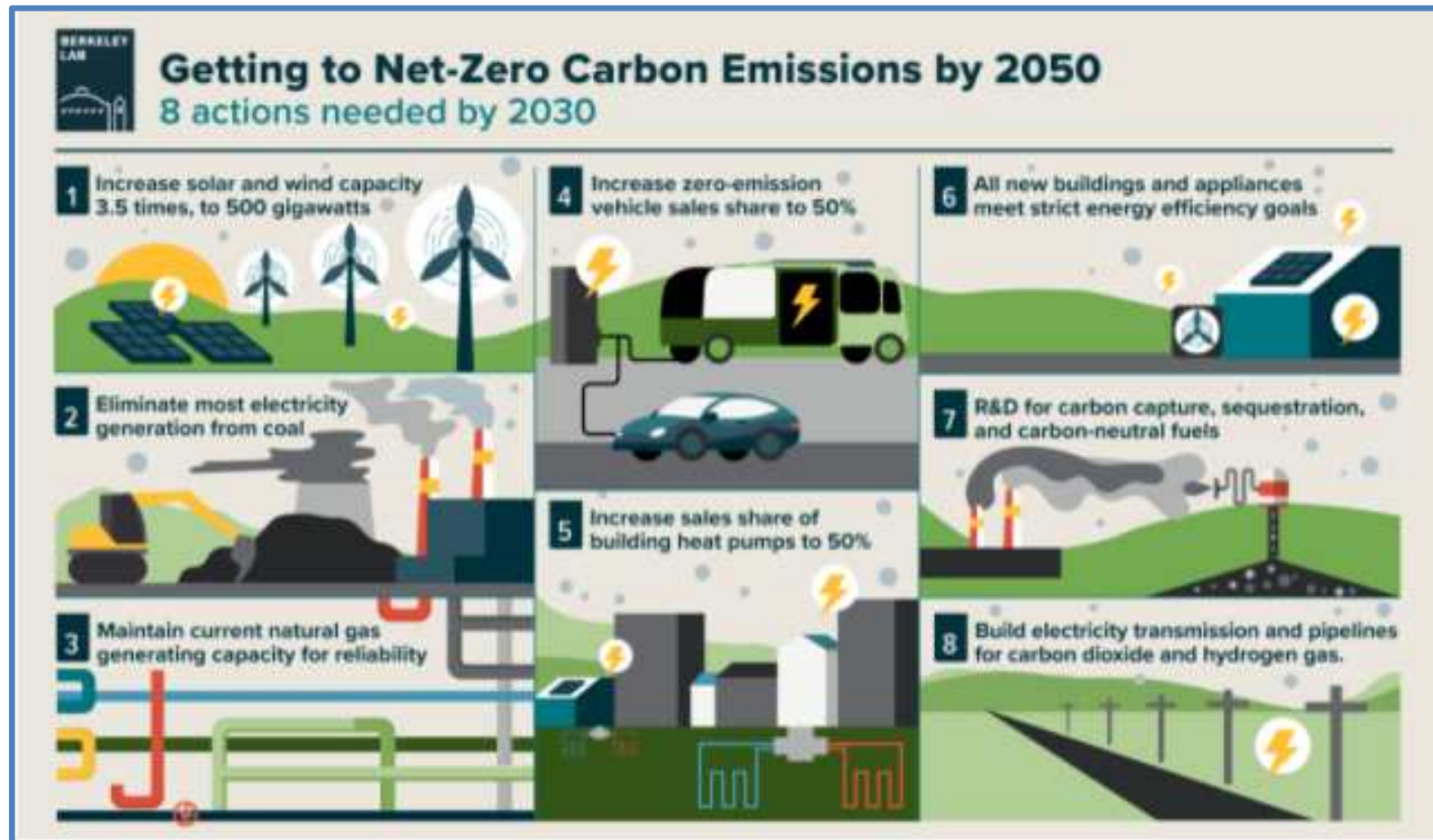
수력 : 노르웨이, 뉴질랜드, 캐나다, 오스트리아
 원자력 : 프랑스, 슬로바키나, 벨기에, 헝가리
 원자력+수력 : 스위스, 스웨덴, 핀란드, 스페인



→ **최근 : 2018년 대비 40% 감축으로 목표 수정**

- 2030년에 전력부분 탄소 중립 달성, 2050년에 완전 탄소중립 달성
- 5개 시나리오 제시
- 1차 에너지 구성
 - 화석 에너지 : 85%(2020) -> 30% 이하(2050)
 - 무탄소 전원 : 37%(2020) -> 98~100(2050)
- 6대 중점 수단
 - 수요부문 에너지 효율화 및 전기화(전기로, 전기차, 히트펌프 등)
 - 청정 전력(풍력, 태양, **원자력**, CCS, 유연성 자원)
 - 바이오에너지 및 기타 무탄소 연료·원료(수소, 합성연료)
 - CO₂ 포집, 이용 및 저장
 - 비CO₂ 배출량 감축(CH₄, N₂O, F-가스)
 - 토지 흡수원 향상(농업, 산림 관리)
- E+(높은 전기화 비용, 최소 에너지 공급) 시나리오 경우
 - 2021~2030 기간에 2.5조 달러 소요 예상

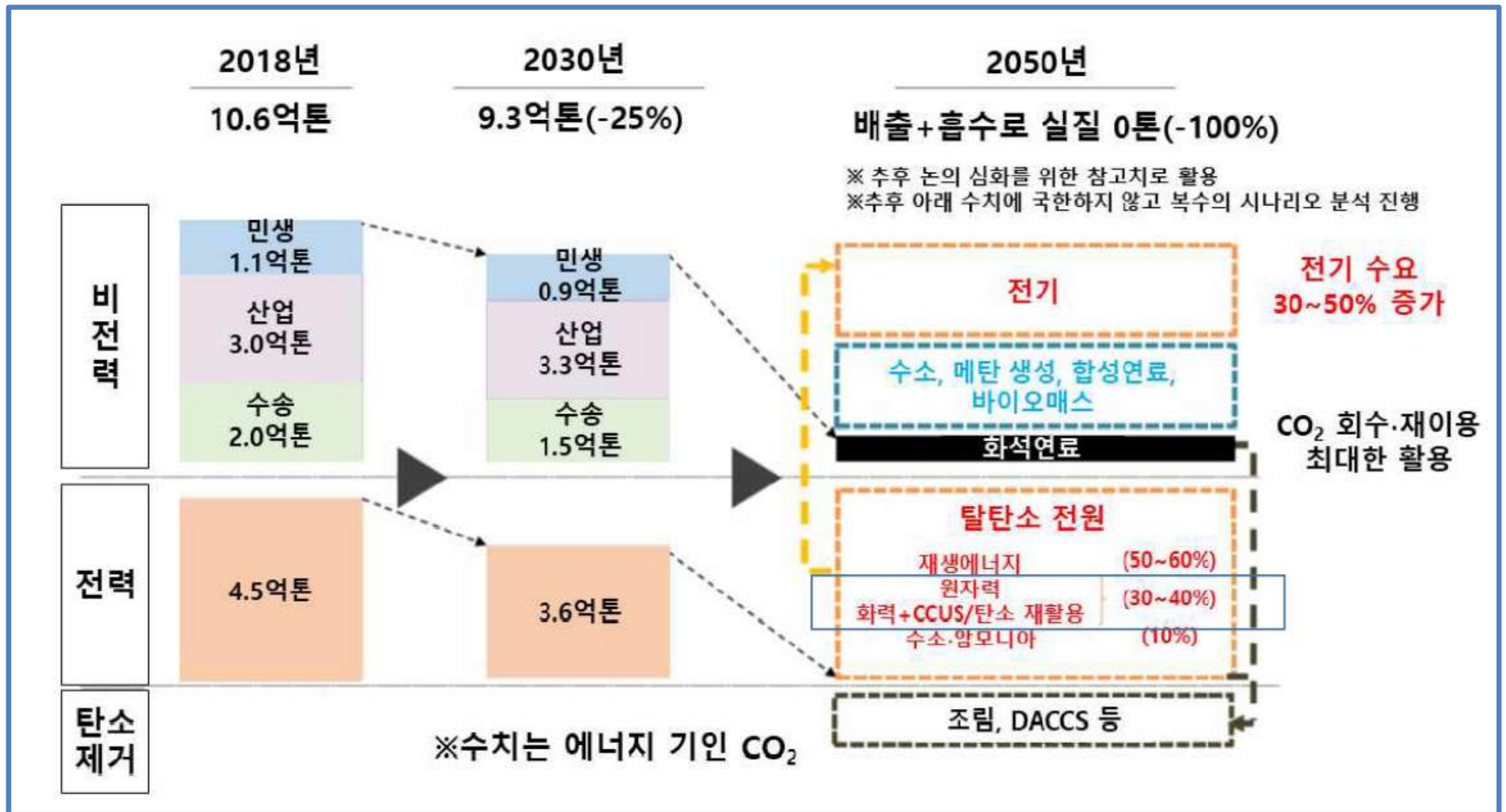
박년배, “EU, 미국, 일본, 중국의 탄소중립 시나리오와 주요 감축 기술“, 한국에너지기술연구원PD 이슈리포트(2021)



Julie Chao, LBNL(2021)

- 전 세계 배출량의 13% 차지하나 2050년까지 탄소 중립 달성 예상
 - 전력부분 : 2040년대 달성
 - 건물 부분 : 2040년대 하반기
 - 산업부분 : 2050년에 95% 저감
 - 농업부분 : 2050년에 40% 저감
- 발전 부분
 - 재생에너지 : 2030년 62%(태양광 14%, 육해상 풍력 33%)
-> 2050년 91%(태양광 32%, 육해상 풍력 53%)
- Taxonomy에 원자력 포함 논의 중 : 2021년말 결론
- 신규 원전 건설 추진
 - 6월 EU가 불가리아의 원전 2기 건설 계획 승인
 - 프랑스 : EPR 6~8기 건설 검토 중
 - 영국 : 10기의 원전 건설 추진 중

박년배, “EU, 미국, 일본, 중국의 탄소중립 시나리오와 주요 감축 기술“, 한국에너지기술연구원PD 이슈리포트(2021)

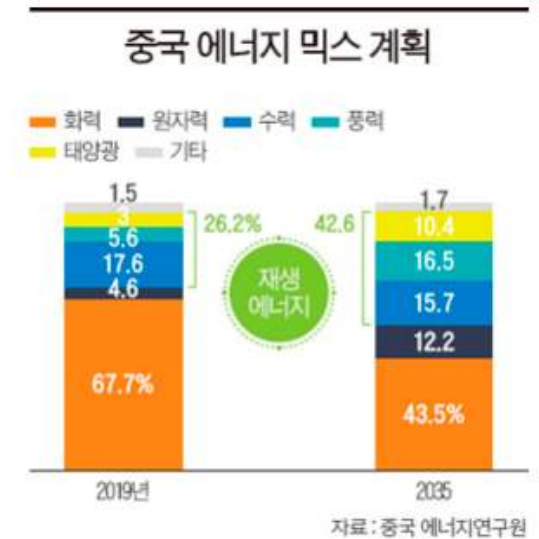


박년배, “EU, 미국, 일본, 중국의 탄소중립 시나리오와 주요 감축 기술“, 한국에너지기술연구원PD 이슈리포트(2021)

- 2050년 전력부분 탈탄소화 달성
 - 재생에너지 : 50~60%
 - 원자력, 석탄화력+CCS : 30~40%
 - 수소/암모니아 : 10%
- 14대 투자 분야 실행 계획 수립
 - 해상풍력, 암모니아 연료, 수소, 원자력, 자동차+축전지, 반도체/정보통신
 - 선박, 물류/이동/토목인프라, 식품/농림수산업, 항공기
 - 탄소재활용, 주택건축물/차세대 태양광, 자원순환, 라이프스타일
- 민간이 보유한 240조엔의 투자 유도
 - 2030년에 연간 90조엔, 2050년에 연간 190조엔 경제효과 예상

박년배, “EU, 미국, 일본, 중국의 탄소중립 시나리오와 주요 감축 기술“, 한국에너지기술연구원PD 이슈리포트(2021)

- 2060년 탄소 중립 목표(구체적 실행 계획 미수립)
- 1차 에너지 구성
 - (2016년) 1차 에너지 43.6억tce. 비화석에너지(수력, 원자력, 기타) 13.3%
 - (2050년, 1.5℃ 시나리오) 1차 에너지 약 50억tce. 비화석에너지 85% 이상
- 2060년 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 2020~2050년에 90~100조 위안의 누적 투자 (누적 GDP의 2% 수준) 필요
- 전원 믹스
 - 2016년 비화석 28% (수력 20%, 태양·풍력 5%, 원자력 4%), 석탄화력 72%
 - 1.5℃ 시나리오에서 2050년 비화석 90% 이상, 석탄화력 5% 이하
 - 전기화 비율 : 현재 25% → 2050년 68%



박년배, “EU, 미국, 일본, 중국의 탄소중립 시나리오와 주요 감축 기술“, 한국에너지기술연구원PD 이슈리포트(2021)

● 감축 기여도

- 전기화(27%), CCUS(18%), 행동 및 수요회피(16%), 풍력 및 태양광(12%)
- 수소(11%), 기타연료 전환(7%), 에너지 효율(6%), 바이오에너지(3%)

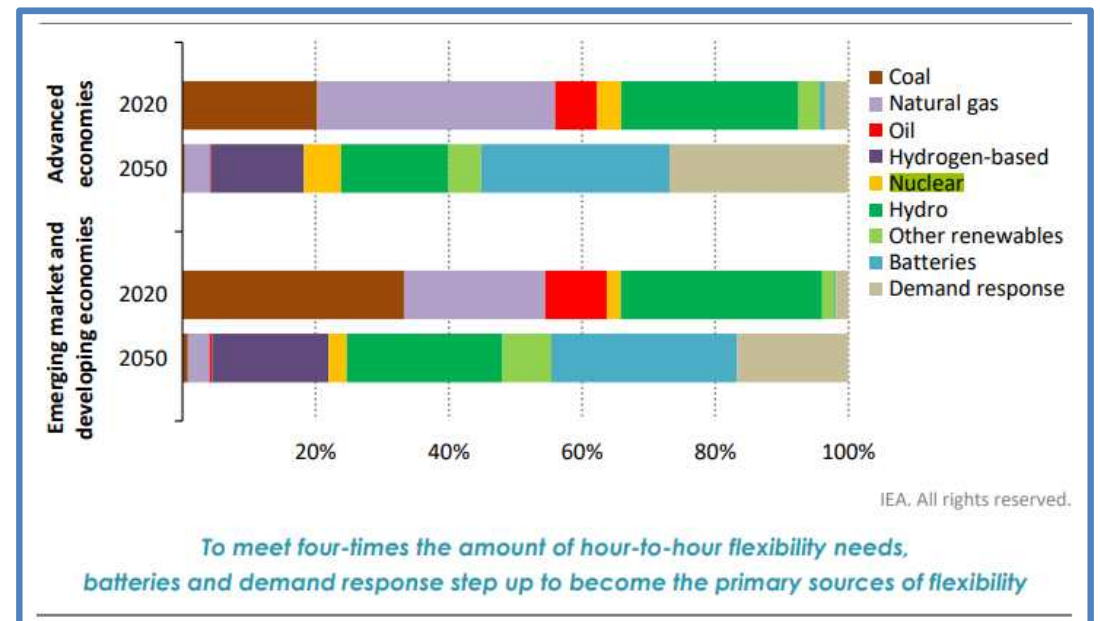
● 세계 1차 에너지 공급량 : 587 EJ(2020) -> 543 EJ(2050)

● 최종 에너지 소비

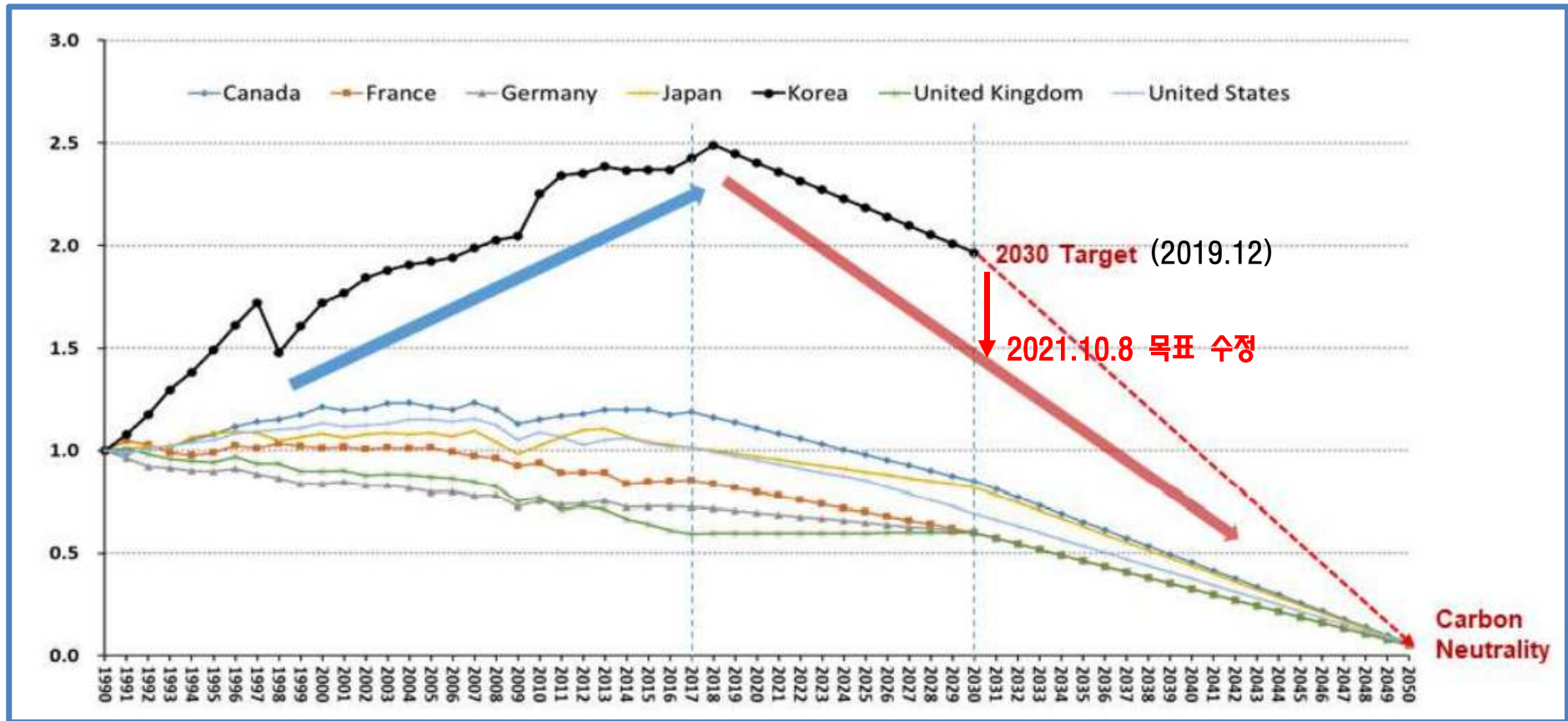
- 전기화 비율 : 20%(2020) -> 49%(2050)
- 재생에너지 : 12%(2020) -> 67%(2050)
- 원자력에너지 : 5%(2020) -> 11%(2050)

● 재생 에너지 간헐성 극복

- 배터리 사용,
- 사용 시간 조절
- 수소
- 원자력



우리나라의 탄소중립 정책



임재규(한국에너지경제연구원), 2021 원자력연차대회, 2021-05-11, 경주

• NDC (Nationally Determined Contribution)

- 2015.6 : 2030년 BAU 대비 37% 감축(국내 25.6%, 국외 11.3%)
- 2018.7 : 2030년 BAU 대비 37% 감축(국내 32.5%, 산림/국외 4.5%)
- 2019.12 : 2017년 대비 24.4% 감축(녹색성장 기본법 시행령)
- 2021.8.31 2018년 대비 35% 이상(탄소중립기본법 제정)
- **2021.10.8 : 2018년 대비 40% 감축(탄소중립위원회)**

전환 부문

재생에너지 발전 비율 확대



수송 부문

친환경차 보급 대폭 확대



산업 부문

연·원료 대체 산업공정 스마트화



건물 부문

제로에너지 건축물, 그린리모델링

- 신축건물**
제로에너지 건축물 신규 100%
- 기존건물**
그린리모델링 이행 100%



농축수산 부문

농기계·어선 연료의
전력화·수소화,
저탄소 가축관리



폐기물 부문

폐기물 발생 25% 감축 및
재활용 90%,
바이오플라스틱 대체



(단위 : TWh 괄호안은 %)

구분	원자력	석탄	LNG	재생E	연료 전지	동북아 그리드	무탄소 신전원	부생 가스	합계	배출량 (백만톤)
1안	89.9 (7.2%)	19.1 (1.5%)	101.1 (8.0%)	710.7 (56.6%)	121.4 (9.7%)	33.1 (2.6%)	177.2 (14.1%)	3.9 (0.3%)	1,256.4 (100%)	46.2
2안	86.9 (7.2%)	0.0 (0.0%)	92.2 (7.6%)	710.6 (58.8%)	121.4 (10.1%)	33.1 (2.7%)	159.6 (13.2%)	3.9 (0.3%)	1,207.7 (100%)	31.2
3안	76.9 (6.1%)	0.0 (0.0%)	0.0 (0.0%)	891.5 (70.8%)	17.1 (1.4%)	0.0 (0.0%)	270.0 (21.4%)	3.9 (0.3%)	1,259.4 (100%)	0

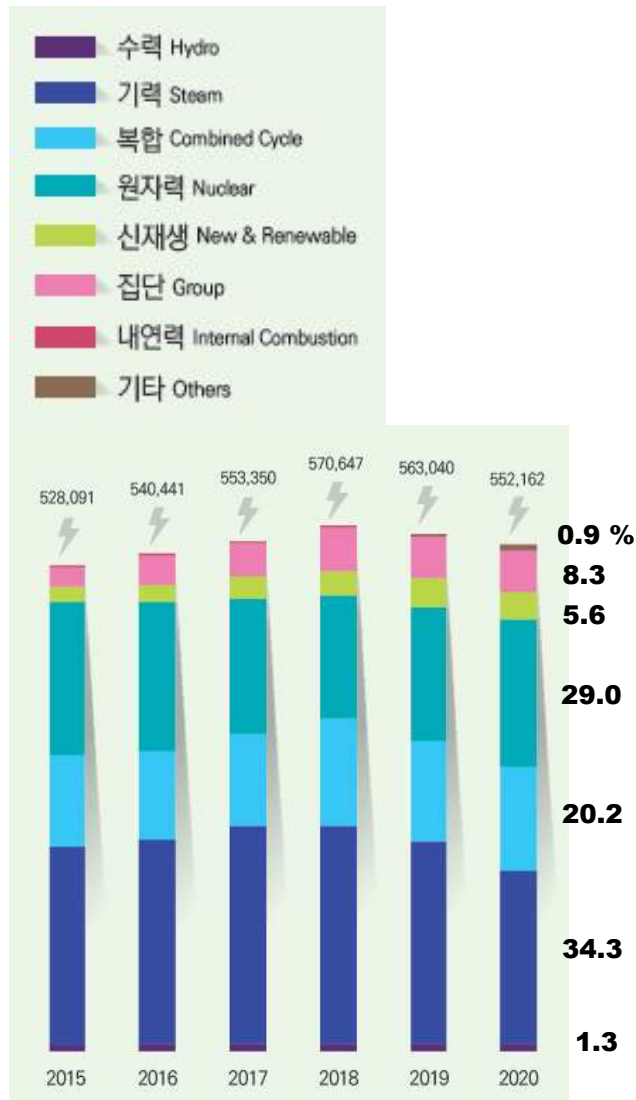
(단위 : 백만톤 CO₂eq)

구분	2018년	2050년 배출량		
		1안	2안	3안
합계(순배출량)*	727.6(686.3)	25.4	18.7	Net-Zero
전환	269.6	46.2	31.2	0.0
산업	260.5	53.1	53.1	53.1
수송	98.1	11.2(-9.4)	11.2(-9.4)	2.8
건물	52.1	7.1	7.1	6.2
농축수산	24.7	17.1	15.4	15.4
폐기물	17.1	4.4	4.4	4.4
탈루 등	5.6	1.2	1.2	0.7
흡수원	-41.3	-24.1	-24.1	-24.7
CCUS	-	-95.0	-85.0	-57.9
수소	-	13.6	13.6	0.0

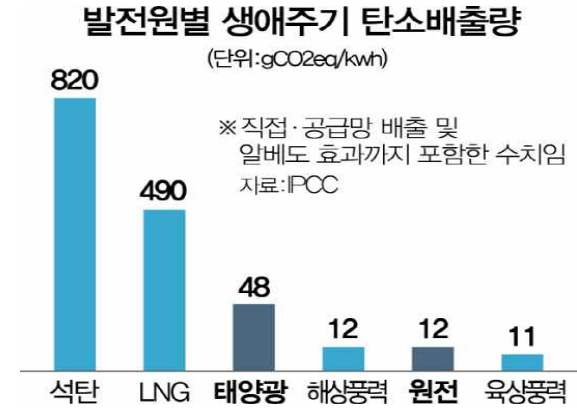
• 시나리오

- 1안 : '50년에 기준수명(30년)를 다하지 않은 석탄발전소 7기에 한하여 유지, CCUS 기술 적용으로 순배출 제로화
- 2안 : 석탄발전소 7기 중단, LNG 발전은 유연성 전원으로 활용하되 CCUS 기술 적용으로 순배출 제로화
- 3안 : 석탄발전소 7기 중단 및 LNG 발전 전량 중단
- 2018대비 전력 수요는 204.2~212.9%로 증가
- **재생에너지 중심으로 전력 공급, 원전은 잔여 원전만 활용(탈원전 정책 유지)**

- 탈원전 정책 유지
- 매우 낙관적인 재생에너지 확대 전망
 - 1 GW 설비당 부지 면적 : 4 km²(원자력), 7(풍력), 10~13(태양광)
 - 480 GW 태양광 설치(2050 시나리오) : 서울시 면적 10배(우리나라의 6%)
- 재생에너지 간헐성 문제 해결책 미제시
- 무탄소 신전원, 동북아 그리드의 불확실성
- 구체적인 산업경쟁력 유지 방안 수립 필요
- 탄소중립위원회의 편향성
 - 위원 중에 원자력 전문가 없음
 - 시민위원회 속의 과정에 원자력 전문가 참여 없음
- 경제성은 미래를 위한 선택에 있어 중요한 요소
 - 탄소중립 시나리오 수행에 필요한 비용 추산 없음
 - 2050년 발전비용은 200% 증가(한국원자력학회, '21.8.5)
 - 탈원전 시 450조의 발전 설비 비용 추가됨(한국경제, '21.07.18)
 - ESS 마련에 787~1248조 소요(조선일보, '21.09.28)



우리나라 발전량 통계(2015~2020), (한국전력, 2021)



지난해 기준 신재생에너지의 생산비용이 원자력의 5배에 달했다. 이에 따라 발전사들은 전력을 1kWh 판매할 때마다 185원가량을 손해 보는 것으로 조사됐다.

에너지원별 발전 원가

단위: 원

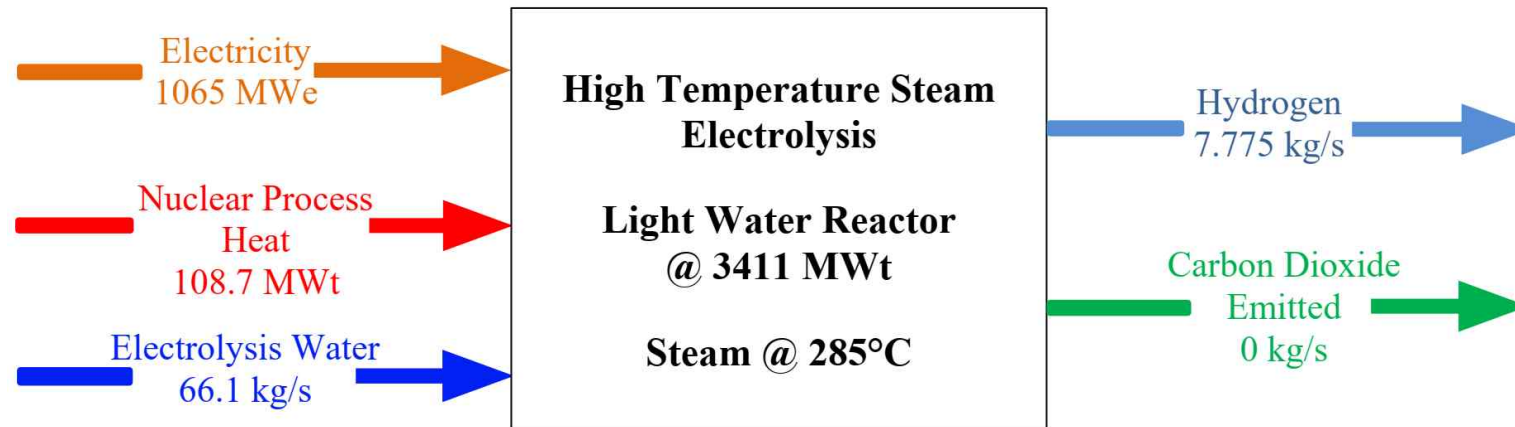
※2020년 기준 전력 1KWh를 생산하는데 드는 비용



자료: 국회예산처

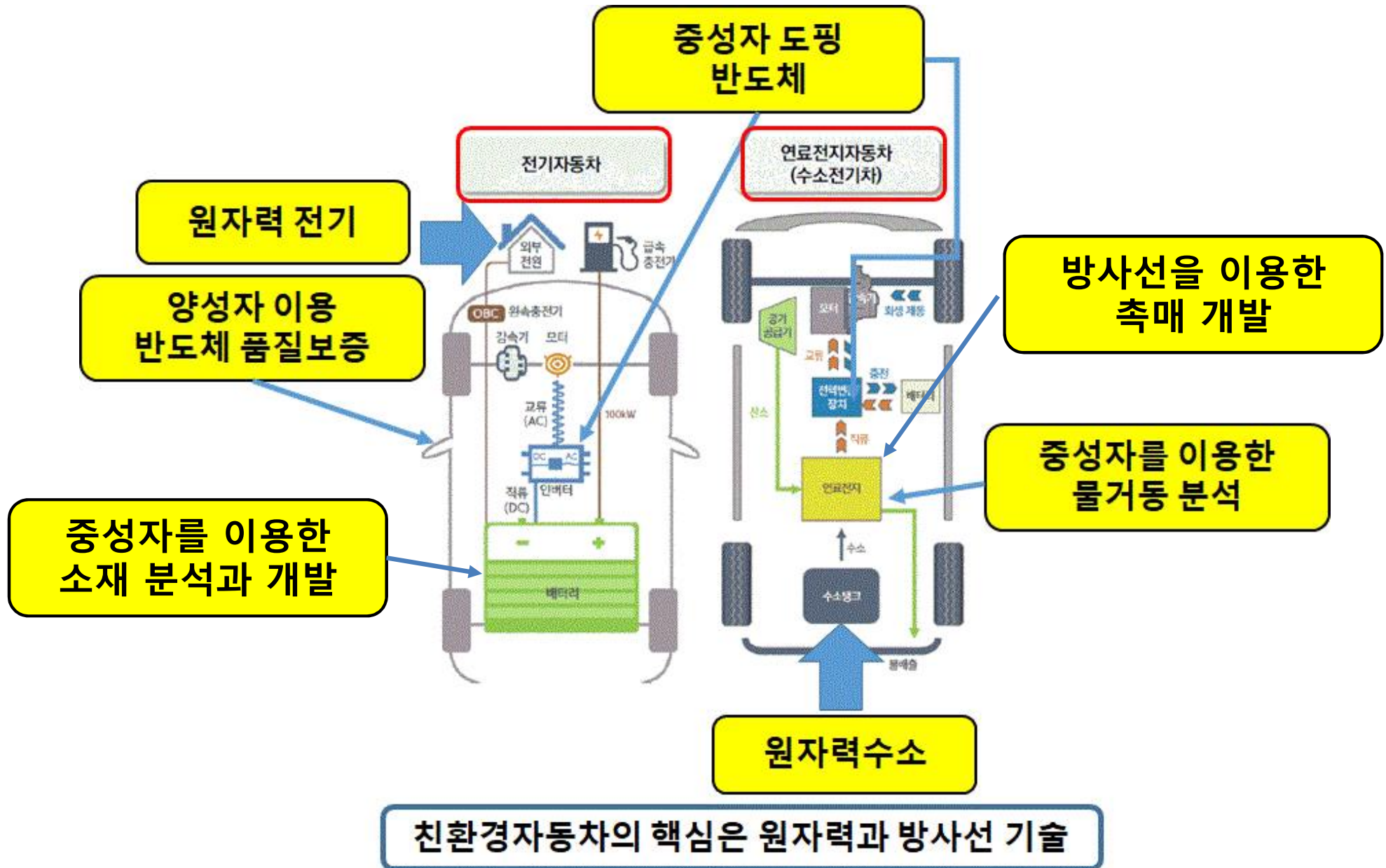
The JoongAng

원자력과 융복합 기술의 기여



미국 INL의 타당성 연구

- 수소 경제의 확립은 우리나라 주요 산업인 자동차 산업, 제철산업을 위해 중요
- 원전 전력+알칼리 수전해 : 3,500원/kg(수소 로드맵 2040 목표 : 3,000원/kg)
- (원전 전기+원전 증기>고온증기) 수전해 수소 생산 : 1100 MW 원전 이용시 연 22만톤 생산 가능(1.7~2.6\$/kg) (수소 로드맵 526만톤/년 필요)
- 초고온 가스로와 S-I 열화학 분해를 통한 수소 생산 구현



전자빔 이용 제조 및 감마선공명/양전자소멸 분석 활용

기술 난제

비귀금속-탄소중합체

1. Fe-N/C 촉매의 철종분석
2. 활성점 유도 제조
3. 제조공정 스케일 업(scale-up)
4. MEA내 촉매활성 분석

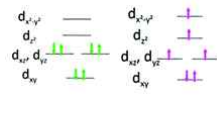
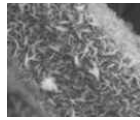
코어-셸

1. 코어셸 촉매의 나노구조 분석
2. 촉매층의 삼상계면 구조 분석
3. 촉매층의 매크로 구조 제어

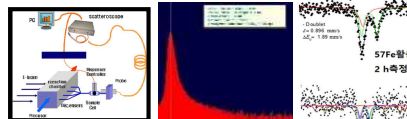
컨소시엄활용

연구내용

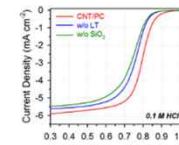
1. 감마선공명 메카니즘 분석을 위한 안정동위원소 ^{57}Fe 치환 촉매 제조 및 활성점 규명
2. 탄소중합체 Fe-N/C 제조기술 개발
3. 촉매 제조공정 양산화를 위한 전자빔 조사 기술 개발
4. MEA 내 촉매활성 분석을 위한 양전자소멸 (positron annihilation) 분광 분석 활용



U. I. Kramm Phys. Chem. Chem. Phys.
14, (2012) 11673



S. T. Thompson Nat. Catal.
2 (2019) 558



S. Joo J. Am. Chem. Soc. 138
(2016) 15046

1. 메카니즘규명: 감마선공명(뫼스바우어) 분광기술, 양전자소멸 분광기술 (한국원자력연구원)
2. 전자빔 조사기술 활용 촉매제조: 대학/기업체 협업
3. 멤브레인 전극 제조 평가: 출연연/대학 협업

기술혁신 아이디어

자료 제공 : 임영랑(KAERI)

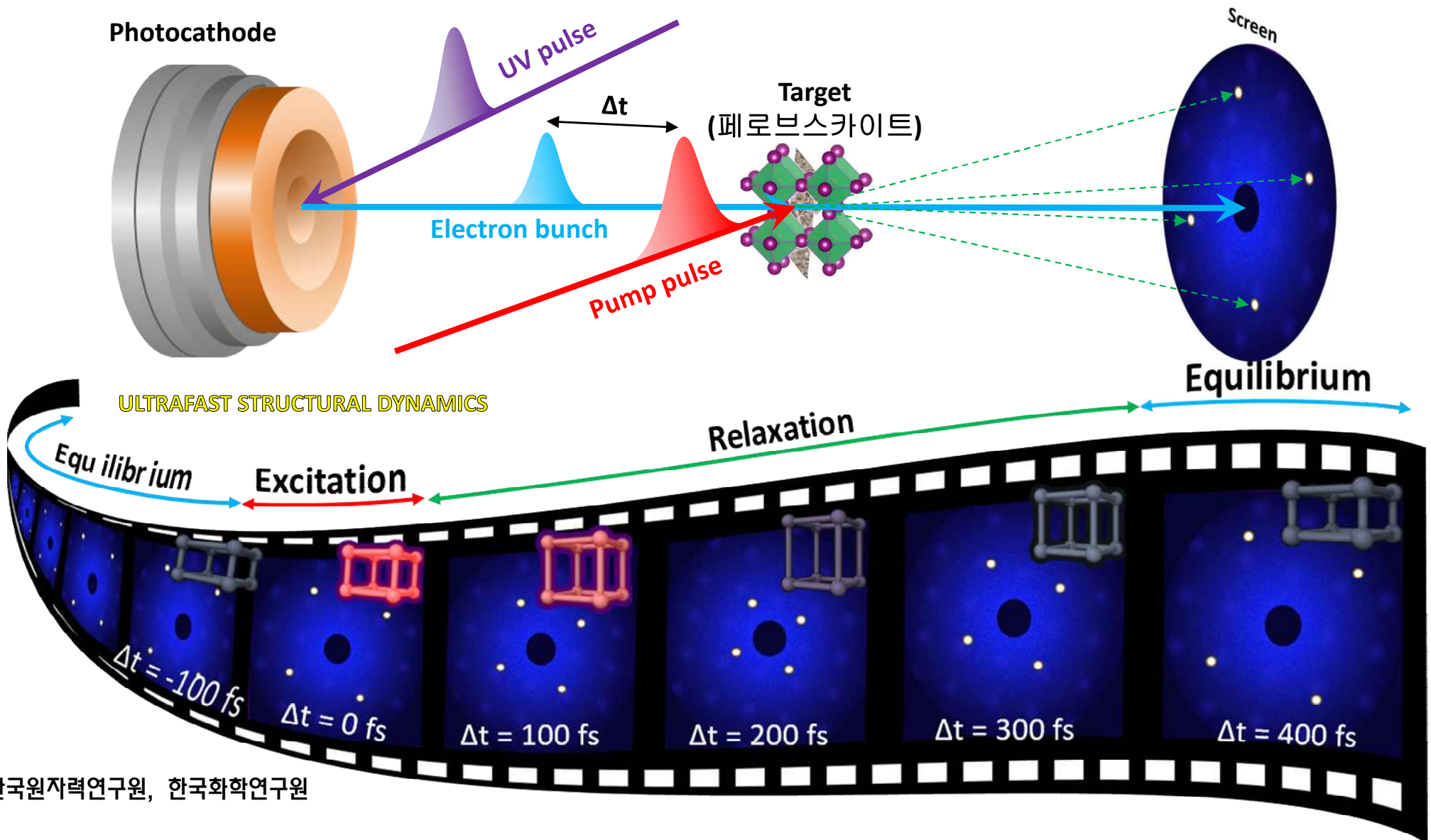


자료 제공 : 김형섭(KAERI)

초고속 전자 회절

펌프-프로브 측정 방식

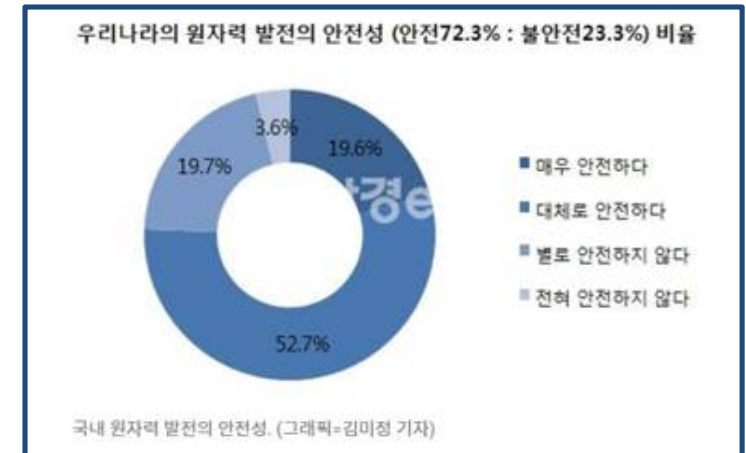
외부 광여기에 의해 변하는 구조를 회절 패턴 측정을 통해 물질의 미세구조 동역학 연구



한국원자력연구원, 한국화학연구원

우리가 할 일

- 원자력의 안전성과 사용후 핵연료 처분에 대한 국민 공감 확보
- 규제 개선 추진
- 원전 생태계 재건
 - 신한울 3·4호기 건설 추진
- 가동 원전의 계속 운전 추진
- 가동 원전의 부하 추종 능력
- 원전 생태계 재건을 통한 원전 수출 추진
 - 탄소 중립을 위한 전기화로 2050년까지 원전 시장 2배 성장 예측
 - 2030년까지 세계 원전 시장 규모는 570~840조(미국 상무성)
 - UAE 수출(4기, 20조) APR 1400 : 유럽과 미국의 인증 취득 완료
- SMR(Small Modular Reactor) 활용과 개발
 - SMR은 재생에너지의 간헐성 해결에 좋은 수단
 - 2035년까지 65~85 GW의 SMR 건설 예상(영국 원자력연구소)
 - 한국(한국원자력연구원, 현대 Engineering) 캐나다 소형원전 사업에 참여 중
 - 미국 NuScale 건설에 투자(두산, 삼성물산, GS 미국 법인)



원자력학회의 여론조사 (산경e뉴스, 21.09.14)

감사합니다.



원자력선박 : 3%를 위한 해답

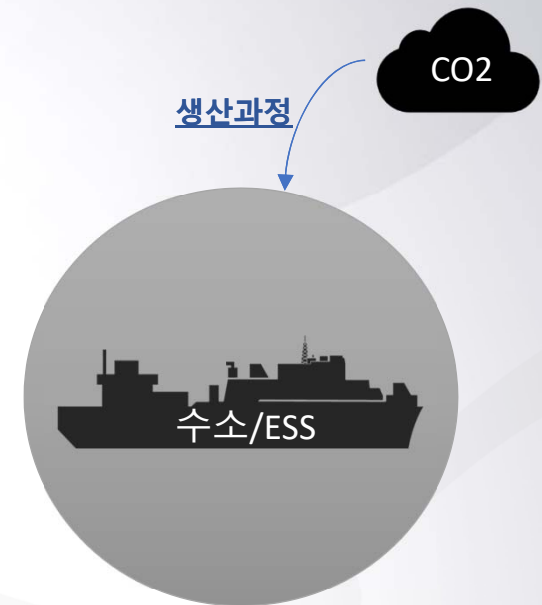
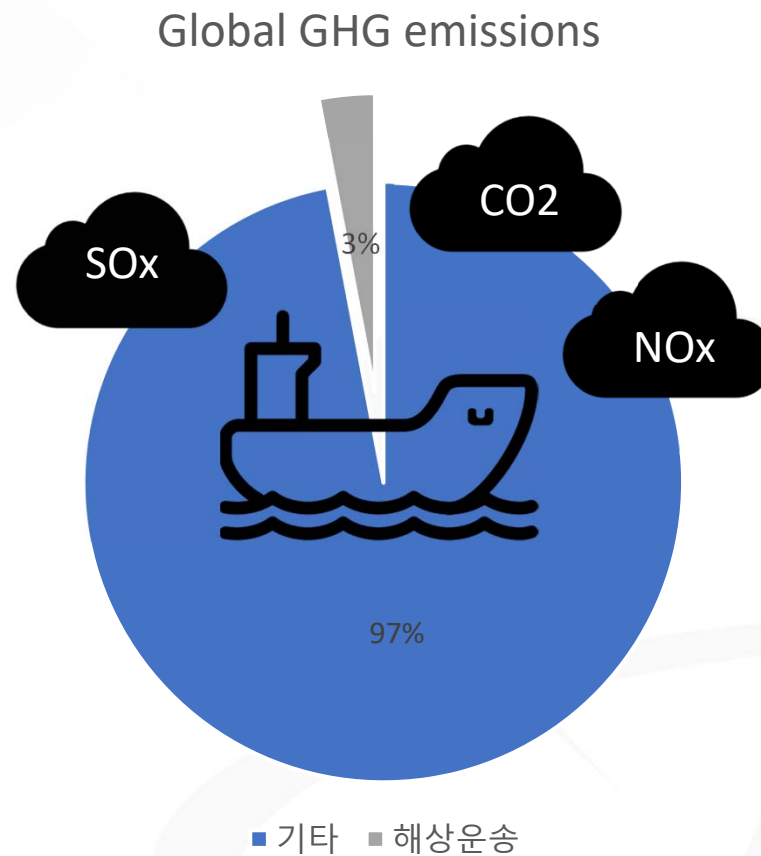
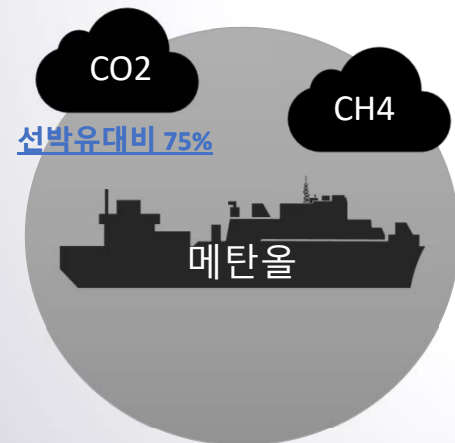
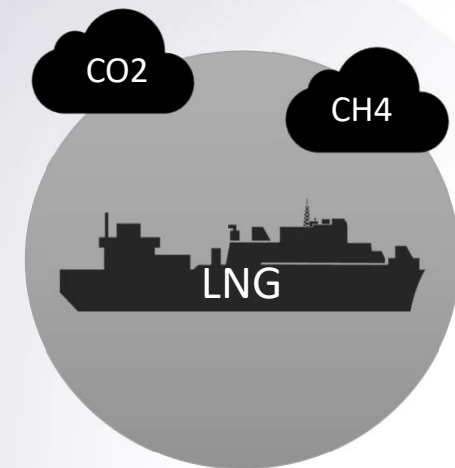
한국원자력연구원

2021. 10. 20

혁신SMR계통개발부

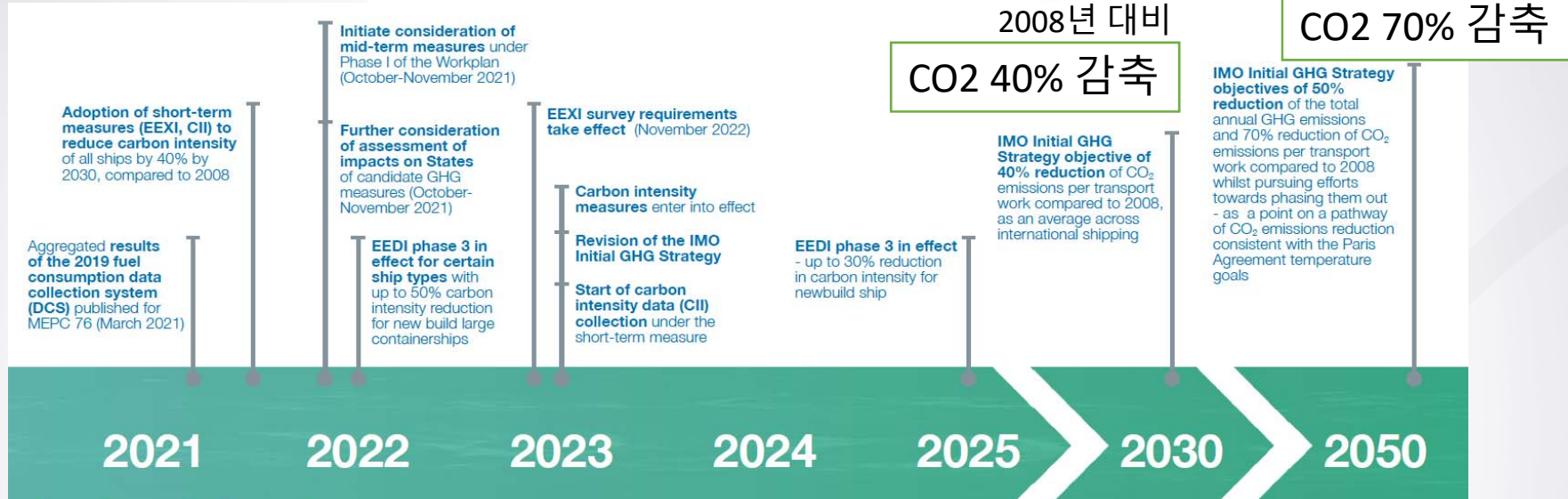
김지희

해상운송으로 인한 온실가스 배출과 대체선박기술

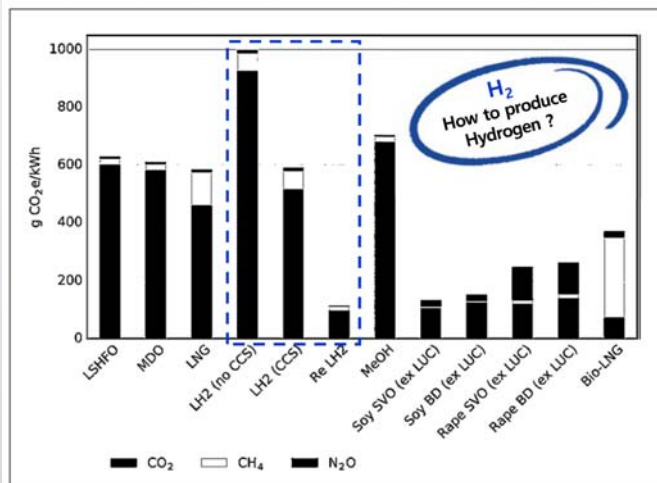


규제는 높고 공간은 좁고 출력은 모자라

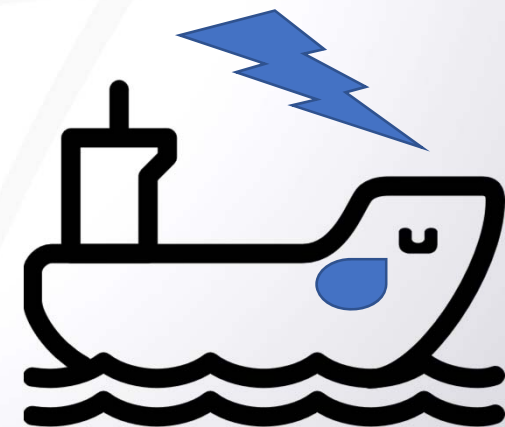
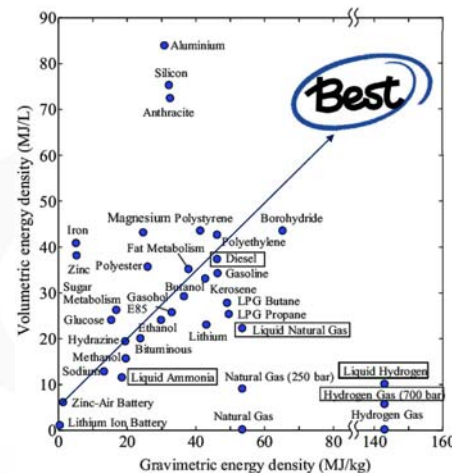
IMO GHG Strategy (매년 2% 감축)



선박연료원별 생애주기 배출량



Density vs. Volume



(Source: P. Gilbert (Manchester University, 2018 – Assessment of full life-cycle air emissions for alternative shipping fuels))

(Source: Science and technology of ammonia combustion, (Hideaki Kobayashi/2018))

원자력선박 : 단점은 하나 뿐

- 선박용 원자로는 국제적으로 700기 이상의 건조/운용 경험 보유
(미국, 러시아, 프랑스, 영국, 중국, 인도, 독일, 일본 등)



Public
Acceptance

원자력선박

상용 원자력선박 개발사례



NS Savannah
미국



Otto Hahn
독일



Mutsu
일본



Lenin
러시아



Yamal
러시아



50 Let Pobedy
러시아

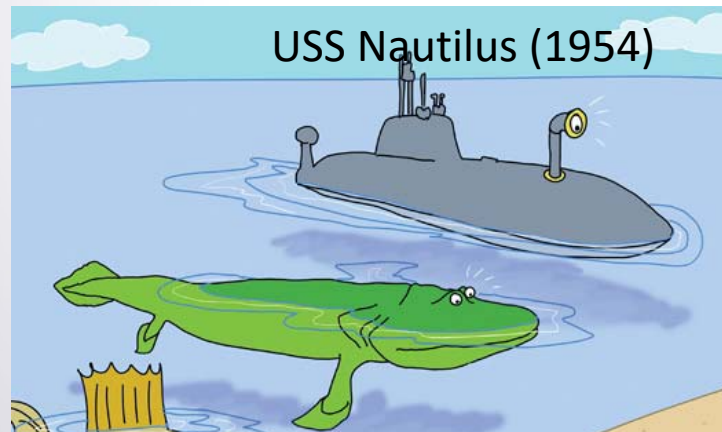
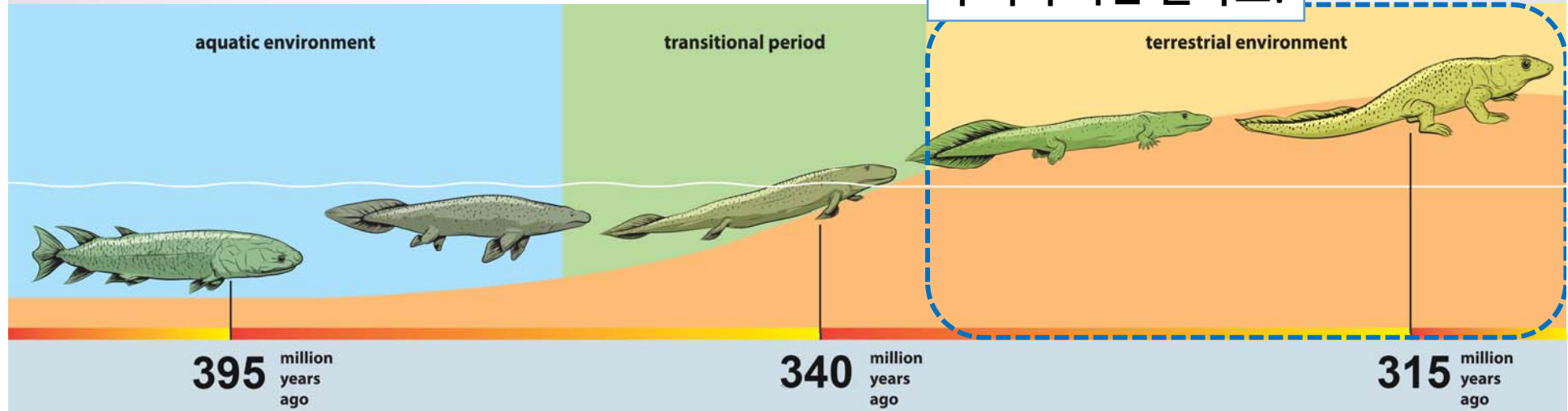


A. Lomonosov
러시아

안녕, 나도 바다에서 왔어

□ 가압경수로의 원형은 육상원전이 아닌 해양추진용

우리가 아는 원자로!



Shippingport Power Station (1958)



원자력의 해양 활용 분야

무공해 신도시 에너지공급
신재생 에너지와 연계,
부하추종 전력공급



해양 원자력 플랜트
도시지역 전력공급



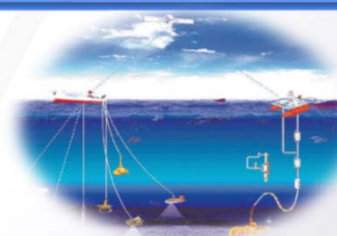
쇄빙선 추진용 엔진
북극 항로 개발



컨테이너선 추진용 엔진
친환경 초대형 초고속 선박



해양 플랫폼 전력 공급
고에너지가 필요한
심해저 광물 채광/양광/제련



선박용 원자로 설계특성

□ 러시아 RITM-200 설치과정



선박용 원자로 설계특성 : 성능

□ KA-130 (쇄빙선용 일체형가압경수로)

CEDM

미세조정용 구동장치

1. 선박출력추종을 위한 제어봉 미세조정력
2. 외부충격에 성능유지
3. 일축 소형화로 헤드 위 다수설치 가능

일체형

일체형가압경수로

1. LBLOCA 원천배제
2. 설치공간 소형화
3. 선박설치과정 간소화
4. 차폐능력 강화

무붕산

Boron-free Core

1. 신속한 부하추종 능력
2. 대형 CVCS 없어 선내 공간확보 액체폐기물 감소

MCP

Canned Motor Type

1. Seal Leakage 배제
2. 소형화, 저전력

경사요동

1등급 기기 성능유지

At Static list 30°, Roll 45°, Pitch 10°

SG

Once-through SG

1. 과열증기 생산으로 이차측 구조 간소화
2. 급수량에 따른 신속한 출력조절 가능

연료

고내구성 장주기 연료

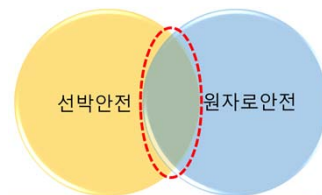
1. 잦은 연료교체 배제
2. 어떤 해양사고상황에서도 내구도 유지



선박용 원자로 설계특성 : 안전

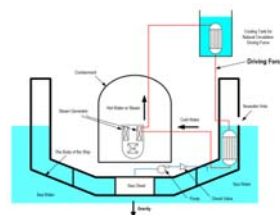
안전개념

- 선박용 원자로의 안전 개념은 **선박과 원자로의 안전성을 동시에 확보**해야 함
- 선박의 전력상실은 선박의 안전성을 심각히 저해함 (쇄빙 중 전력상실, 침수 중 전력상실, 항해 중 재기동 불가 등)
- 따라서 선박의 안전을 고려한 원자로 비상운전전략이 필요



무한열침원

- 해양환경이라는 무한열침원을 이용한 잔열제거 및 중대사고 대처설계 가능
- 해수를 이용한 장시간 자연순환 피동냉각설계 가능
- 발라스트 탱크 등의 선박 구조물 등의 이용



인명우선 안전설계

- 선박용 원자로 안전설계의 최우선은 **탑승자**
- "With the threat of its wreck, the NPP must be operated with the implementation of all the technical and organizational measures necessary to rescue the crew members, special personnel and the public (passengers)" (러시아 인허가규정 NP-022-17)
- 선박사고 상황에서 원자로가 탑승자의 안전을 지킬 수 있는 안전설계가 필요

지속운전성 강화

- 선박 안전을 위해 **운전지속**을 우선시 하는 설계와 운전전략이 주요
- 일부 주기기 고장 등의 초기사건 발생 시에도 운전지속을 할 수 있는 운전모드 제공 필요
- NS Savannah도 1 RCP (1 of 4), 1 Loop (1 of 2) Mode 등의 Infrequent Operation 방식을 보유

해외 연구동향

영국

- 원자력 추진 LNG carrier (Babcock, 2010)
- 소형 원자로 Hyperion 을 이용한 선박 추진 연구 (Lloyds, 2010-12)
- A Super-System Concept 연구 (Lloyds, 2017)
- Emission zero 원자력 추진 선박 검토 (Lloyds & Rolls-Royce, 2019)



중국

- 탐사용 원자력 쇄빙선 웨룽2호 진수 (2018)
- 산둥반도 부유식원전 진수 (2021 예정)



러시아

- 일체형가압경수로 RITM-200을 기반 Arktika 급 쇄빙선 제작 (ROSATOM, OKBM)
- 향후 33,000톤 및 55,000톤급 쇄빙선 건조, 2035년까지 13척 운용 (ROSATOM, OKBM)
- 동일 노형으로 극지전력공급용 선박건조 (ROSATOM, OKBM)



기타

- IAEA : 원자력의 해상 동력원으로서의 역할 주목, 향후 선박 수요의 7~83%가 원자력을 사용할 것으로 예측 (2002)
- 일본 : 선박용 원자로 MRX 및 DRX 개발 완료, 선박 탑재 연구 (JAERI, 2000년대)
- 노르웨이 : 원자력추진선박 타당성 연구 (DNV, 2009-2011)



탈원전과 원자력선박

양립불가능한 미래

원자력선박의 시작은 탈원전 철폐

□ 상용원전을 유지하는 인프라 없이는 SMR 개발도 불가

- 미국의 경우 하드웨어 인프라가 붕괴하자 대형원전의 자체제작이 불가능해짐
- 하드웨어 인프라는 설계능력보다 붕괴가 빠르며 상실 시 복구가 어려움
- 제작 인프라가 유지되어야 SMR용 하드웨어도 신규개발이 가능

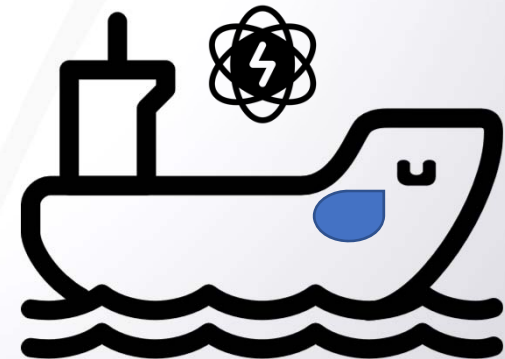
□ 대중이 상용원전을 수용해야만 원자력선박도 수용가능

- 과거 원자력선박에 대한 연구가 활발했으나 후쿠시마 사고 이후 침체기
- 기후위기 상황에서 선박업계에서도 원자력이 필요하나 대중수용성이 발목
- 대중이 올바른 원자력/방사선 상식을 가져야만 원자력선박도 진수가능

□ 기후위기 대응책은 원자력 뿐

- 전기생산, 냉난방을 원자력전기로 대체해야 안정적인 무탄소 전력공급이 가능
- 원자력수소와 원자력선박을 이용할 시 교통과 운송도 전주기 무탄소로 대체
- 원자력이 편견없이 사용될 수 있도록 업계의 지속적인 노력 필요

탈원전은 하지만
SMR 개발은 한다?



하드웨어 인프라 없이는 SMR도 원자력선박도 없다!

원자력선박 : 3 %의 해답

□ 원자력선박으로 전세계 탄소배출량의 3% 감축 가능

- 친환경 직접추진 기술 중 유일한 무탄소 추진기술, 검증 완료
- 수소/ESS 등 간접추진 기술에도 원자력전기를 사용해야만 무탄소 가능

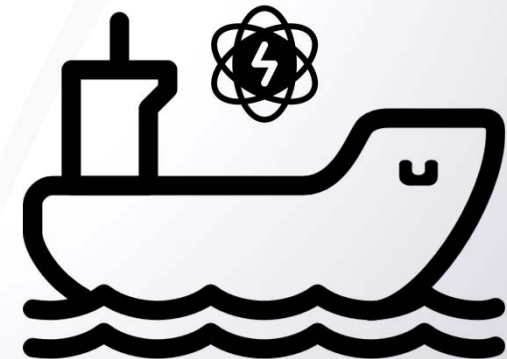
□ 대체추진기술 중 유일한 “플러스” 기술

- 타 대체추진기술은 기존 디젤엔진보다 추진효율에서 마이너스
- 원자력선박은 더 높은 효율로 초대형, 초고속 선박으로 건조 가능 -> 경제성 상승
- 쇄빙선/극지전력 공급 등 특수목적으로도 사용 가능

□ 타 원자력 선진국은 이미 보유한 기술

- 미국, 러시아, 프랑스, 영국, 중국, 인도, 독일, 일본은 이미 추진용 SMR 기술 보유
- 국내 원자력, 조선산업의 미래를 위해 확보해야만 하는 기술
- 적극적인 연구개발이 필요

THANK YOU



반영구적 사용이 가능한 베타전지 개발

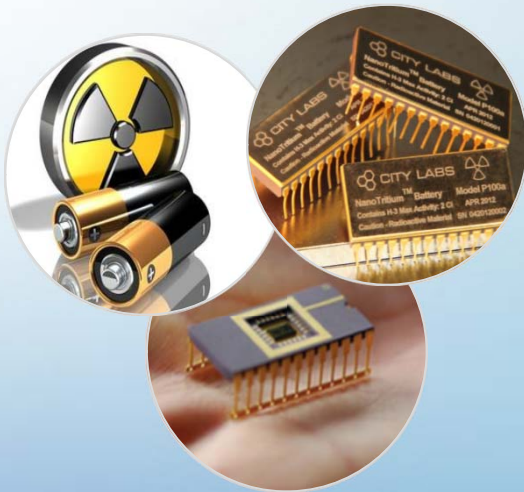
2021. 10. 20.

한국전자통신연구원

최 병 건

ETRI

ETRI 한국전자통신연구원
Electronics and Telecommunications
Research Institute

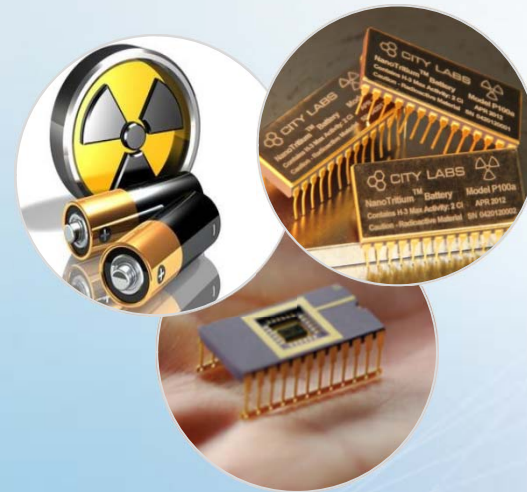


01 _ 기술 개요

02 _ 기술 개발 내용

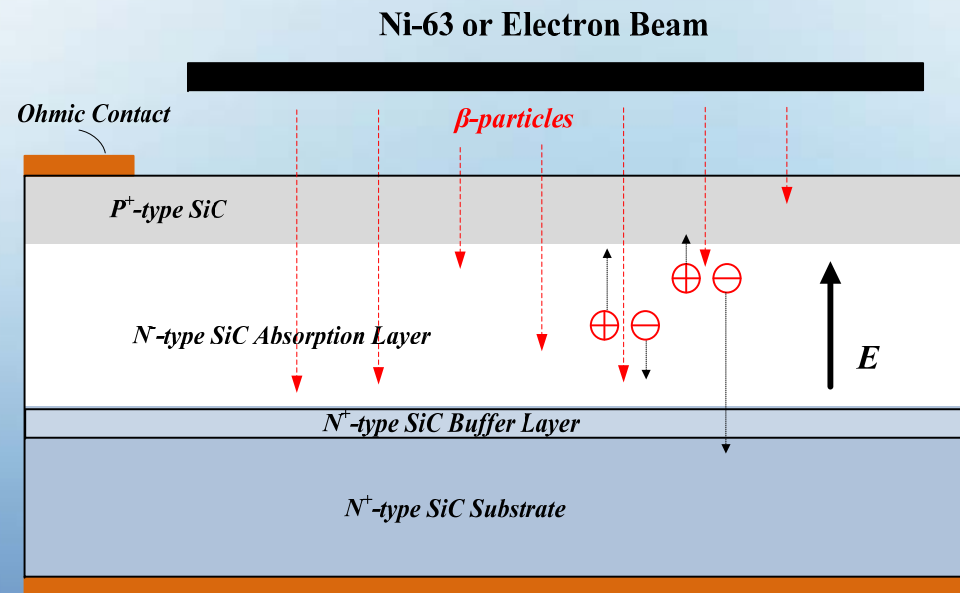
01

기술 개요



베타전지는 베타입자(전자)를 방출하는 방사성동위원소로부터 PN접합 반도체 표면을 통해 베타선을 흡수하여 전기에너지를 생산하는 동위원소 전지

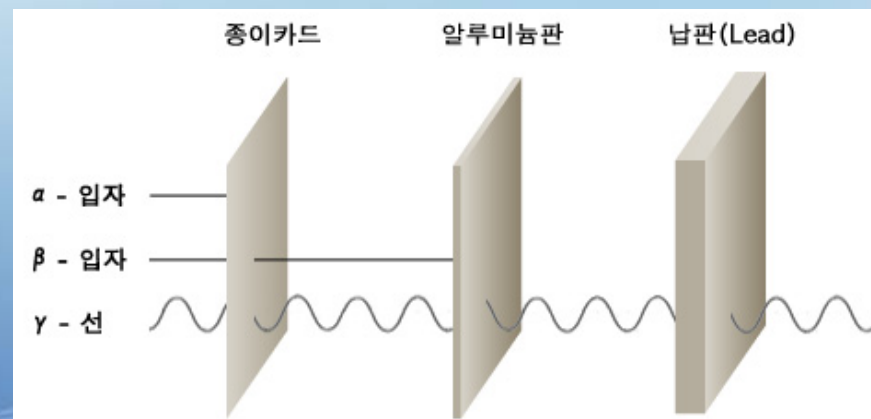
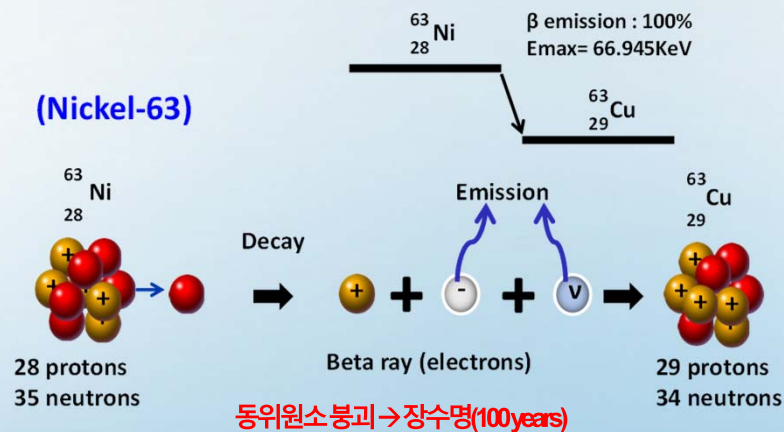
- 태양광발전의 태양광 대신 베타선이 에너지 source로 작용
- Beta-ray in → Electron/Hole out



베타선 (β -ray)이란?

▣ 베타 붕괴

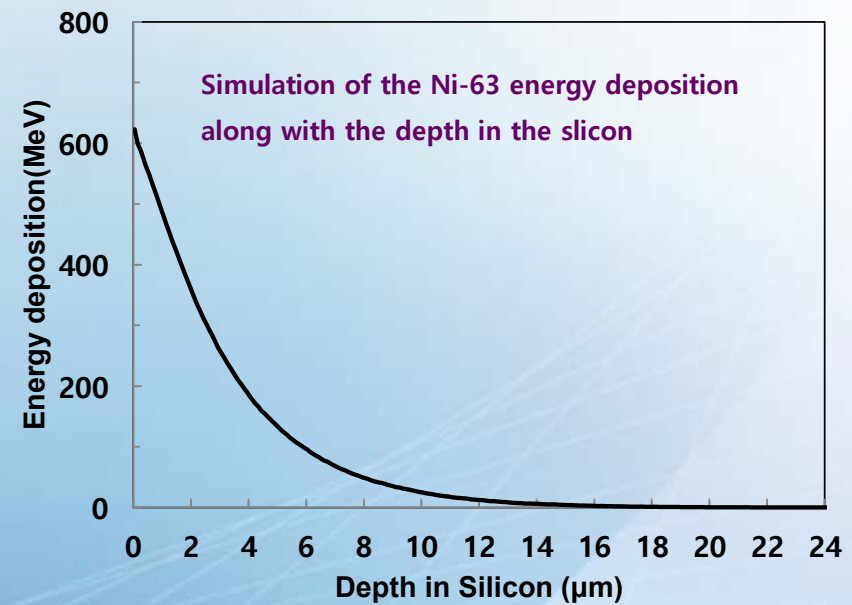
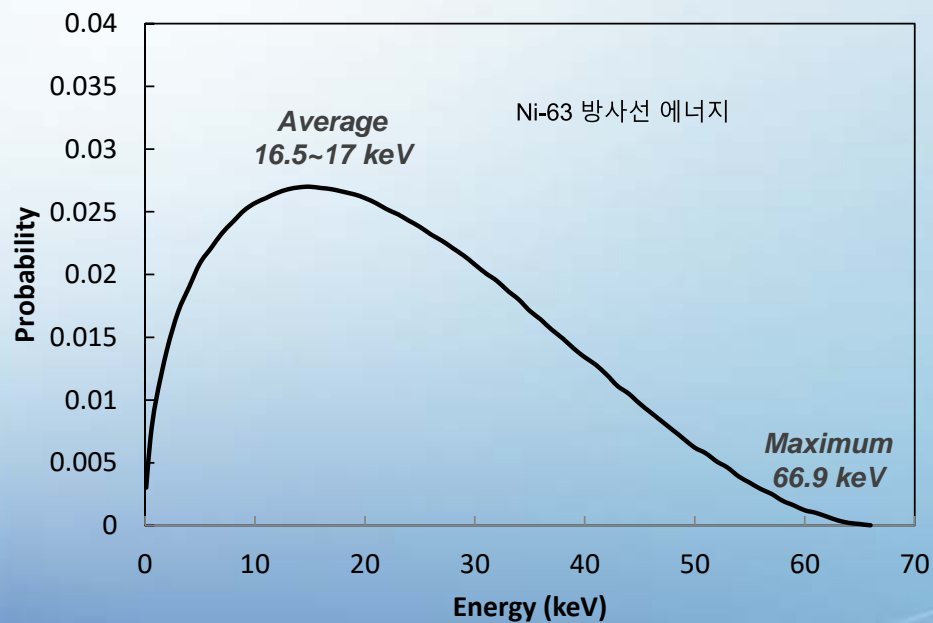
- 정의: 불안정한 핵 내부에서 중성자가 양자로 전환되면서 전자를 방출하는 현상
- 에너지는 연속 스펙트럼을 가짐



베타선 (β -ray)이란?

▣ 베타선원 에너지 스펙트럼 (Ni-63)

- 평균에너지 : 16.7 keV
- 최대에너지 : 66.9 keV
- Maximum Penetration Depth in Silicon : 16 μm



베타선, 베타전지 특징

- 베타선(전자)은 알파 입자에 비해 가벼워 대체로 반도체 격자에 손상을 미치지 않음
- 차폐가 용이하고 타 핵종(알파, 감마)에 비해 안전성 확보가 용이
- 폐기된 방사성 동위원소로부터 재처리가 가능하여 버려지는 에너지 재사용 가능
- 사용기간이 방사성 동위원소의 반감기에 비례하여 장시간 배터리 교체 없이 사용이 가능

Parent Nucleus	E_{\max} [keV]	Average Energy [keV]	Half life	Decay mode	Daughter Nucleus
H-3	18.59	5.69	12.32 y	β^- :100%	He-3
Ni-63	66.945	17.425	101.2 y	β^- :100%	Cu-63
Sr-90	546.0	195.8	28.79 y	β^- :100%	Y-90
Y-90	<u>2280.1</u>	933.7	64.1 h	β^- :100%	Zr-90
Pm-147	224.6	61.93	2.6234 y	β^- :100%	Sm-147
Sm-147	2310.5	2247.6	1.06E+11 y	α :100%	Nd-143
Po-210	5407.45	5304.33	138.37 d	α :100%	Pb-206
Pu-238	5593.20	5357.7 5456.3 5499.03	87.7 y	α :100%	U-234
Cm-244	5901.74	5762.64 5804.77	18.11 y	α :100%	Pu-240

Note: 145 keV is damage threshold for silicon.

후보 선원 : (H-3), Ni-63, Sr-90, Pm-147

▣ H-3

- 중수로를 냉각수로 사용하는 원자로의 발전 과정에서 생성
- 베타선의 에너지가 낮아 주로 분말이나 액상형태로 원자력전지 제작 공정 중에 포함되어 사용
- Power Conversion Density = 0.034 mW/Ci

1 Ci : 초당 3.7×10^{10} 번 핵분열 할 때 나오는 방사능

▣ Ni-63

- 자연계에 존재하는 Ni-62 에 중성자를 조사하여 생성 (ex. 하나로)
- Power Conversion Density = 0.1 mW/Ci

▣ Sr-90

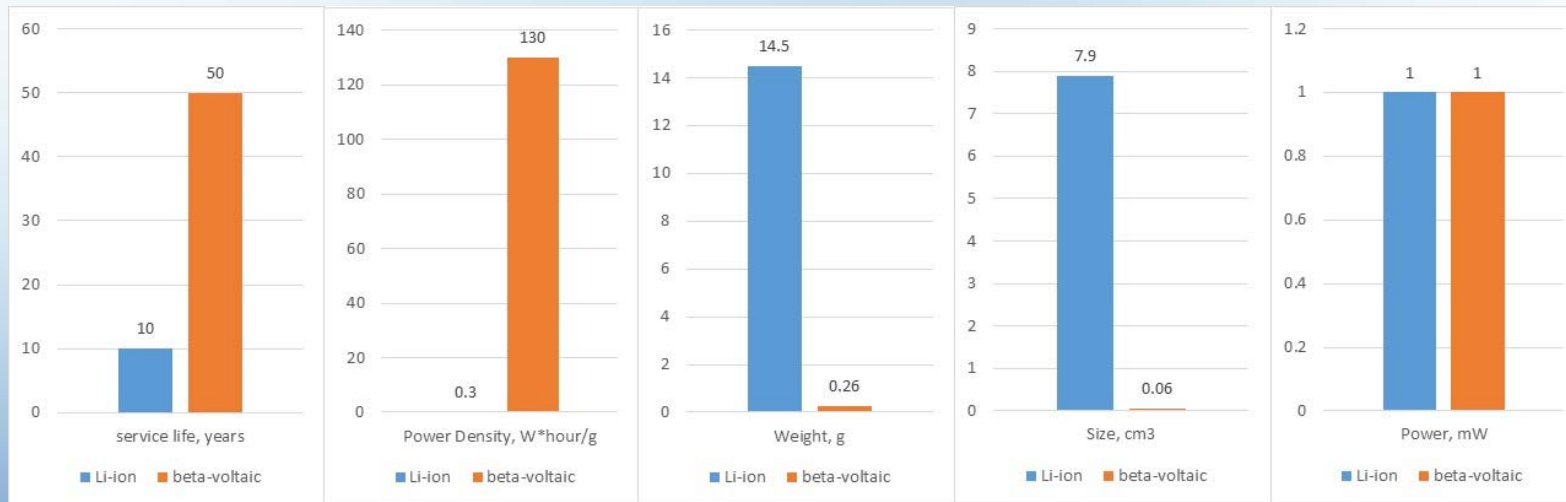
- 사용후핵연료에서 추출 가능 (U-235 의 5.7%)

▣ Pm-147

- 원자로 내에서 네오디뮴-147 의 베타붕괴를 통한 핵분열 생성물
- Power Conversion Density = 0.4 mW/Ci

■ 기존 화학전지와의 비교 (vs. 베타전지)

- 제한된 사용 기간 (years) : 10 ~ 12 (vs. >50 years)
- 낮은 에너지 저장 밀도 (W*hour/kg) : 0.3 (vs. 130)
- 좁은 동작 온도 범위 : -20 ~60 °C (vs. 주변 환경에 무관)
- 제한된 충/방전 사이클 및 자연방전 : ~1,500 회 (vs. 자가발전)



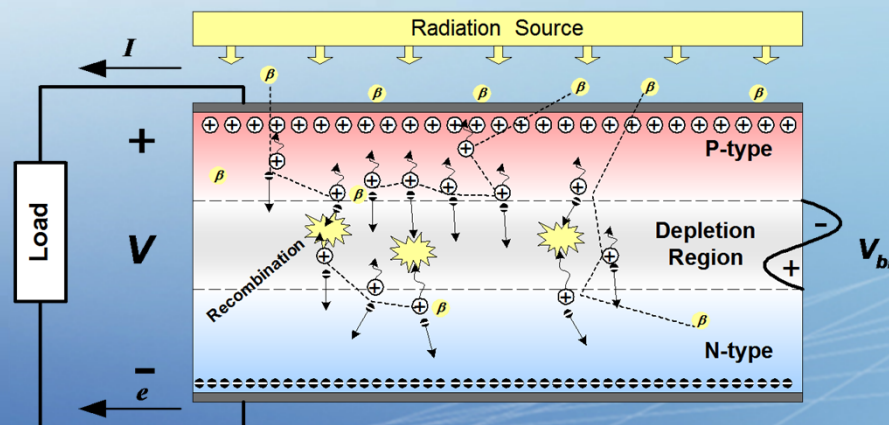
* Replotted from the source of "SRI SIA "LUCH, ROSATOM, Russia, ATOMEXPO 2019

왜 베타전지인가?_외부환경 독립, 반영구

□ 외부환경과 관계없이 발전, 10년 이상 장수명이 가능한 유일한 전지 → 미래형 전지

분류	화학전지			물리전지	
종류	일차전지	이차전지	연료전지	태양광/압전 등	베타전지
발전	충전 불가	충·방전 반복사용	연료공급 유지되면 지속적 발전	외부에너지 의존형	반감기 100년 (반영구)
특징	-	리튬 이온 이동	연료화학적E → 전기E	태양광 → 전기E 물리E → 전기E	방사선E → 전기E
장점	저압 안정성이 좋음	반복사용, 다양한 형태	발전효율 높음	외부에너지원 공급에 따라 사용 한계 없음	외부환경조건에 관계없이 반영구 사용 가능
단점	환경오염물질 함유	안전성 문제 (폭발 위험성)	지속적인 연료 공급 필요 (수소, 메탄올, 포도당 등) 고온열화, 재료부식, 열 파괴	환경적·공간적 사용제한	시장 형성 초기 단계, 높은 가격
외부환경 독립성	불가 (교체 필요)	불가 (외부 충전)	불가 (외부 연료 공급)	불가 (외부 에너지원)	가능 (자가 발전)

□ 베타전지: 방사성 물질이 붕괴하면서 방출되는 베타선(하전 입자)을 이용하여 전기에너지 발생



저 준위 방사성 동위원소 (^{63}Ni , ^{147}Pm , ^3H) 의 베타선 방출

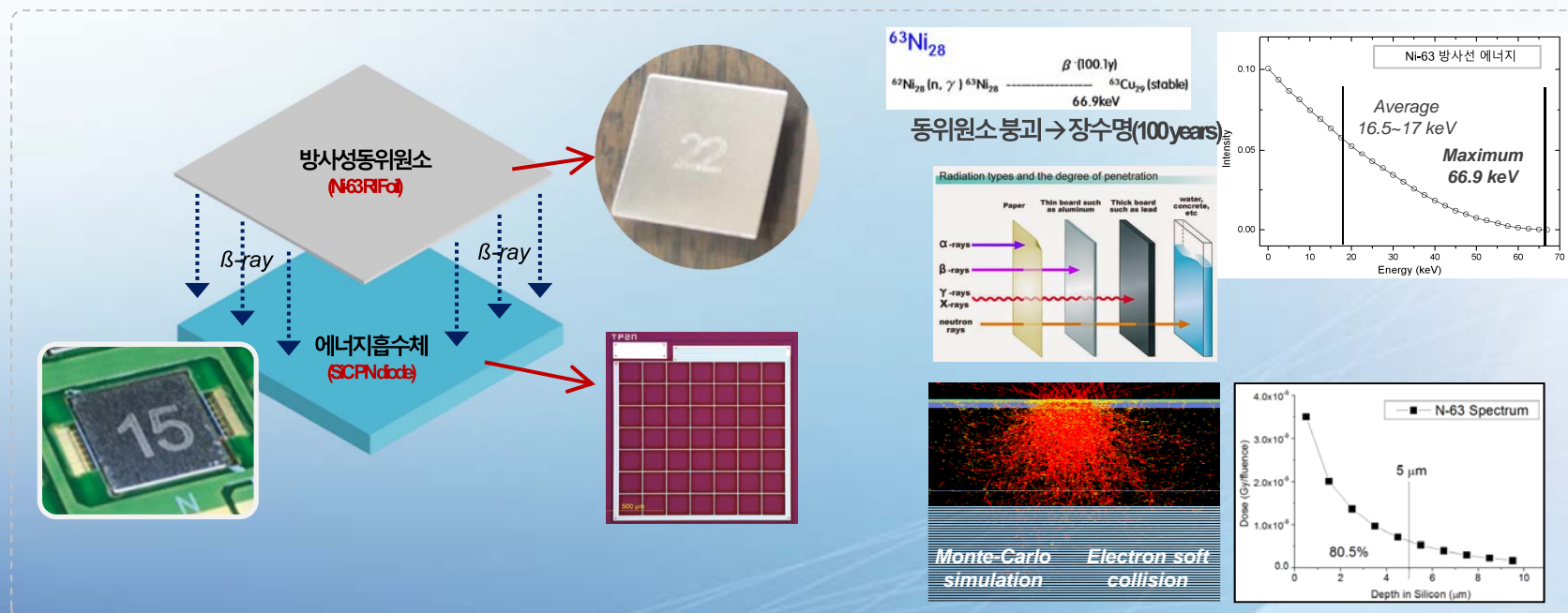
PN 접합영역(공핍층)에서의 전자-정공 쌍 (EHP) 생성

전력 생산

“외부의 에너지원 없이 반영구적 전력생산”








■ 베타전지는 방사선을 방출하는 방사성동위원소와 이를 전력으로 변환하는 에너지 흡수체로 구성

- Ni-63 방사성동위원소는 100% 베타선(하전 입자)을 반감기 약 100년 동안 방출
 - 최대 66.9keV, 평균 17keV의 방사선 에너지를 가지며, 경금속류(알루미늄 등)에 의해 쉽게 차폐 가능
- SiC PN diode 에너지 흡수체는 방출된 하전 입자를 가장 높은 효율로 전력으로 변환
 - 고 밴드갭 특성의 반도체 흡수체, Monte carlo simulation 이용 PN junction depth 도출 → 전력변환 효율 극대화
 - 고효율 에너지 흡수/변환 고 밴드갭 SiC 반도체 상용화 공정 기술 개발



“Ni-63 동위원소 및 고 밴드갭 SiC 반도체 → 장수명·고효율 베타전지”

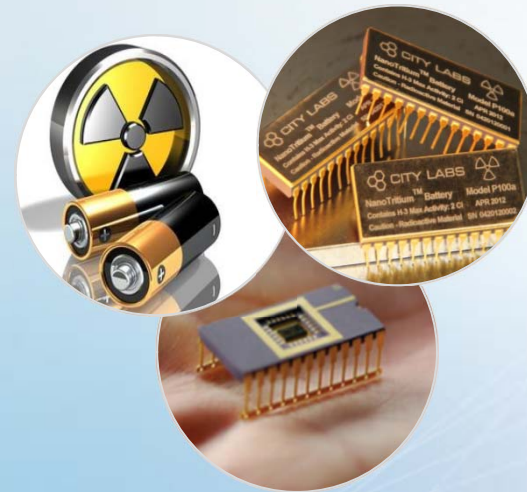
■ 미국·러시아의 주요 선진사들은 원천기술을 기반으로 **베타전지 상용화**에 본격 돌입

연구그룹	제품 사양	기술 수준
Widetronix 社 	방사성동위원소 : H-3(Tritium), Ni-63 베타선흡수체 : SiC 반도체 출력전력 : 10nW ~ 1uW/5nW ~ 500nW	H-3와 Ni-63을 적용한 세계 최초의 베타전지 상용화 성공, 록히드마틴社와 파트너십 체결 베타전지 단위 셀 적층 독자 기술 보유
City Labs 社 	방사성동위원소 : H-3(Tritium) 베타선흡수체 : Si 반도체 출력전력 : 120nW ~ 124uW	H-3를 적용한 Si기반 베타전지 상용화 성공, NASA, 록히드마틴 社와 파트너십 체결(미사일 암호 보안장치 적용 준비) 출력전력 향상 및 확장성을 확보를 위한 독자 규격 보유
BataBatt 社 	방사성동위원소 : H-3(Tritium) 베타선흡수체 : Si 반도체 출력전력 : 미확보	3차원 입체구조의 Si 반도체 구조를 적용해 상용화 전 단계 까지 연구 수행
Missouri Univ 	방사성동위원소 : Sulfur-35 베타선흡수체 : 셀레늄 반도체 출력전력 : 96nW	Sulfur-35를 액체 반도체인 셀레늄에 적용한 베타전지 원천기술 연구
Rosatom 社 	방사성동위원소 : Ni-63 베타선흡수체 : 미확인 출력전력 : 미확보	Ni-63 대량 생산해 50년 동안 사용 가능한 베타전지 생산 기술 연구 2018년 상용화 예정
MISIS Univ 	방사성동위원소 : Ni-63 베타선흡수체 : 미확인 출력전력 : 미확보	Ni-63 기반은 장수명(50년 이상) 베타전지 기술 연구, 2018년 베타전지 공개 예정
ANR 	방사성동위원소 : Ni-63 베타선흡수체 : GaN 반도체 출력전력 : 미확보	국가연구소(ANR: The French National Research Agency) 주도로 BATGAN Project 수행. Multi-Layer 흡수체 연구

“세계 최고수준의 국내원천기술을 활용하여 **베타전지 상용화**에 빠르게 대응 필요”

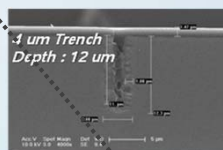
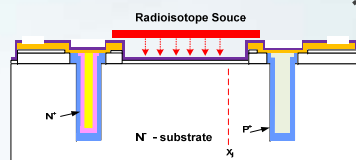
02

기술 개발 내용

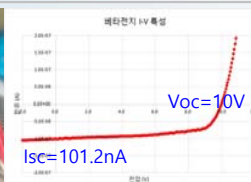
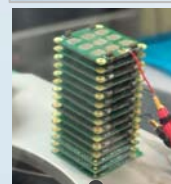


2015

- 3차원수직PN접합Si 흡수체 구조개발
- N-63선원제조기술개발 및실증

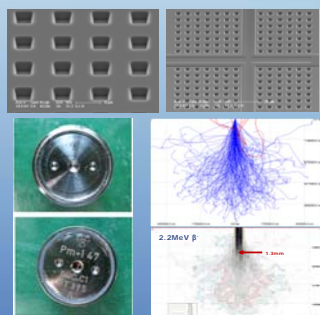


- 1 μ W급 Scalable 베타전지 모듈 개발
- 국내 최초 SiC 베타전지 설계/공정/제작 기술 확보



2010

- 베타소스를 이용한 극소형 전원기술 연구
- 트랜치 구조 Si 흡수체 구조 개발
- Sr, Pm, Ni 동위원소 베타선원 특성 연구



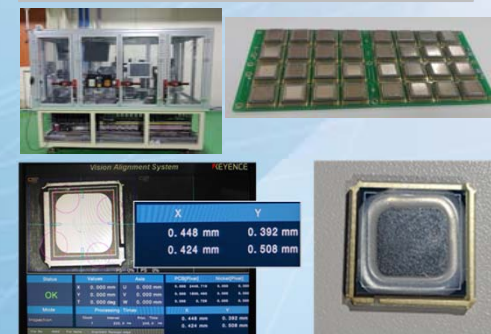
2016

- 고효율 SiC 베타전지 원천기술 확보

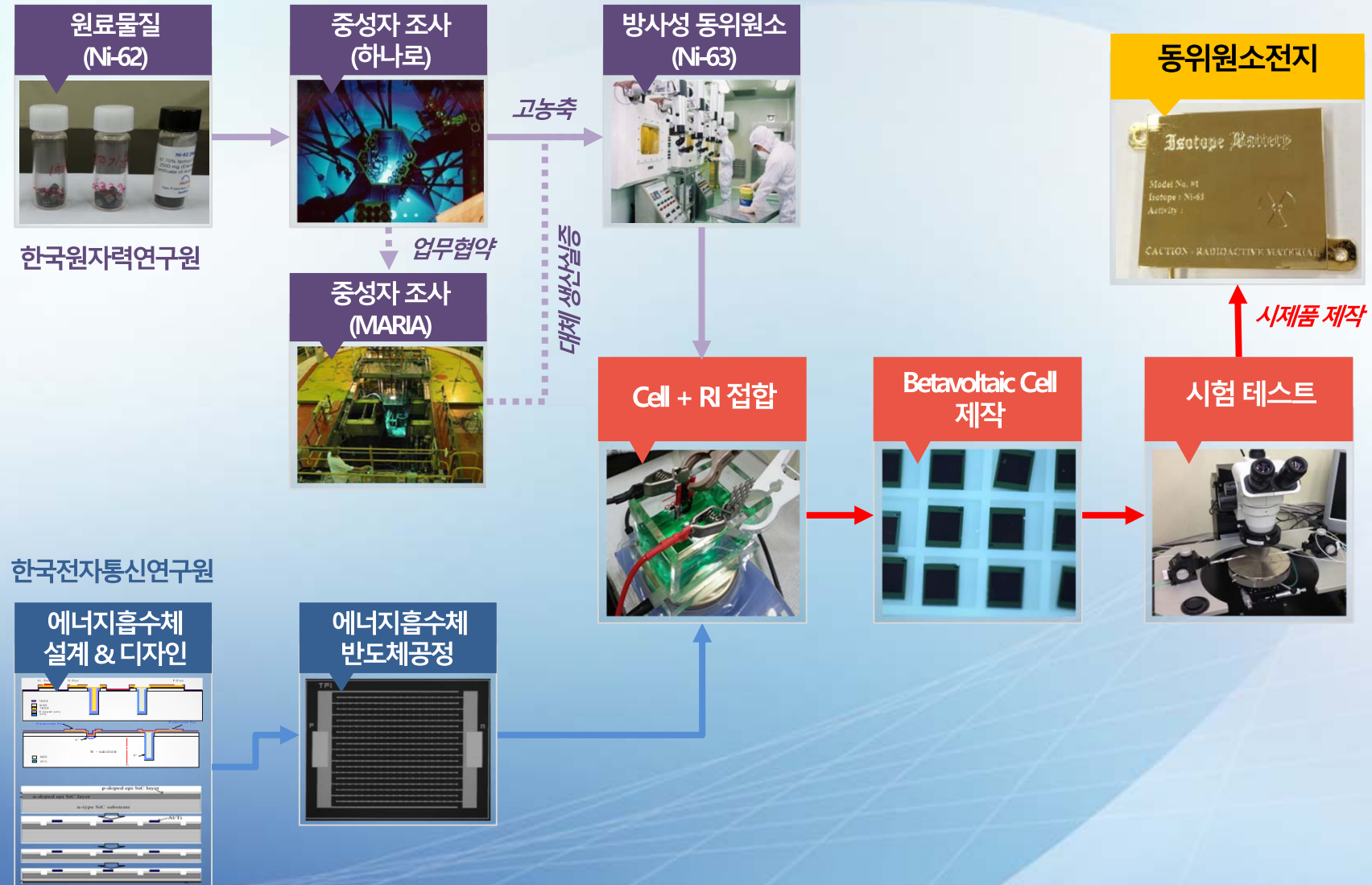


2020

- 베타전지 상용화 기술 개발
- 고집적 고효율 베타전지 SiC 반도체 양산 기술 개발
- 베타전지 모듈 양산 설비 개발



베타전지 제조 과정



148nW Betavoltaic Ver. 1 (BV1), 2016

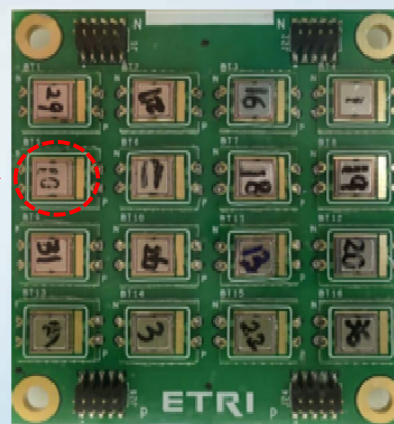
Ni-foil plated
with Ni-63



SiC PN junction

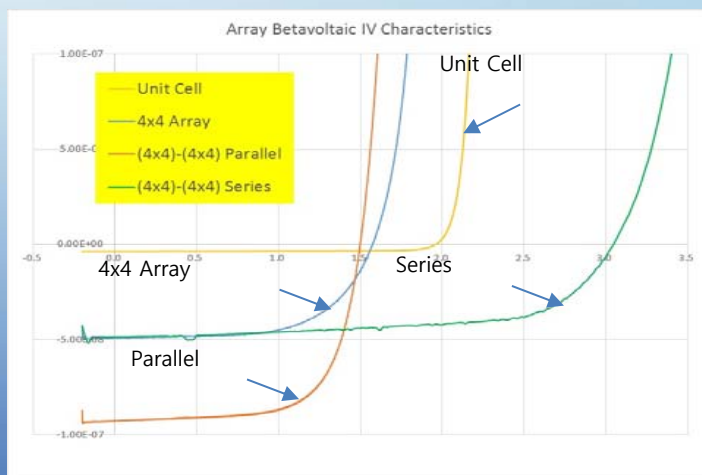
<Betavoltaic Unit Cell>

Unit Cell: 4mmx4mm



<4x4 Array -BV1 >

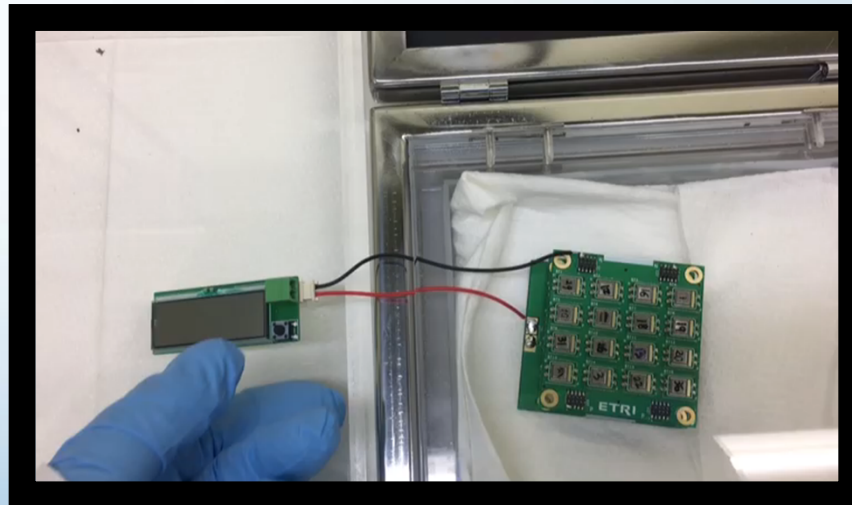
2x Stacking



Type	Voc	Isc	Pout
Unit Cell (4mmx4mm)	1.96V	3.73nA	7.31nW
4x4 Array x16 unit cell	1.57V	49.1nA	77.4nW
(4x4)-(4x4) Parallel x32 unit cell	1.5V	92.6nA	139nW
(4x4)-(4x4) Series x32 unit cell	3.06V	48.5nA	148nW

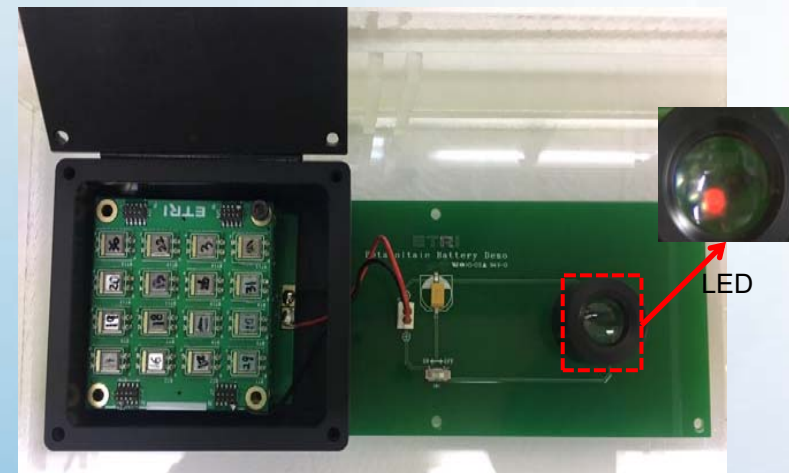
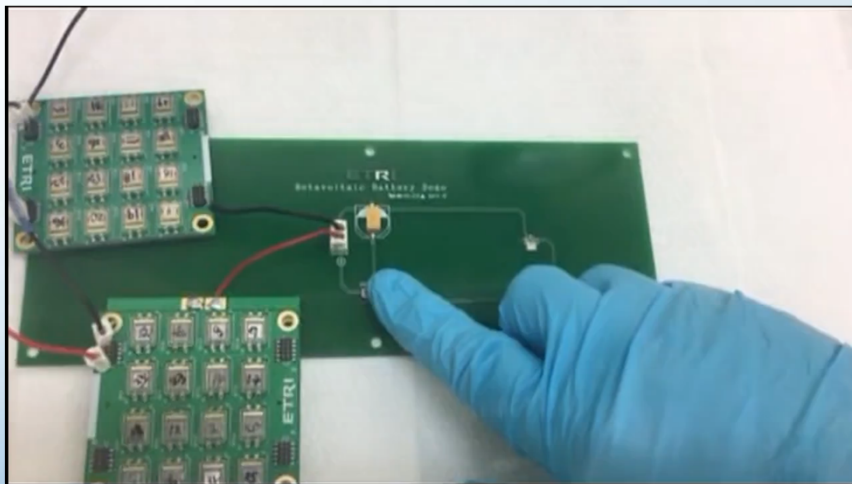
■ 148nW Betavoltaic Ver. 1 (BV1), 2016

LCD Direct Connecting

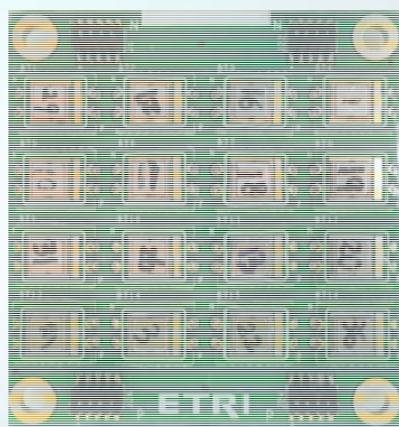


■ 148nW Betavoltaic Ver. 1 (BV1). 2016

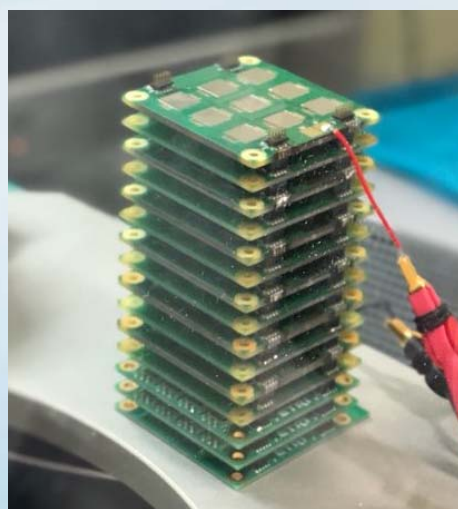
LED with 477uF Capacitor



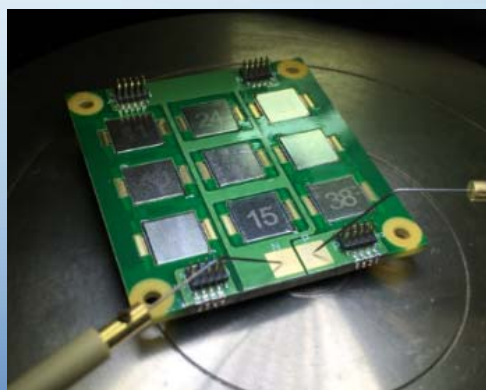
1 μ W Prototype Betavoltaic (2017)



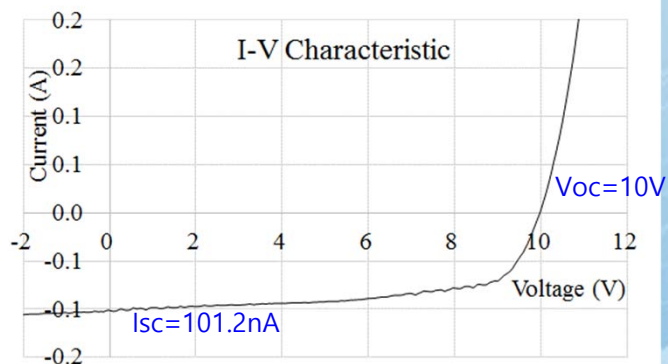
<4x4 Array -BV1 >
Unit Cell: 4mmx4mm



<BV1&2 array/stacking>
2x BV1, 6x BV2



<3x3 Array -BV2>
Unit Cell: 9mmx9mm

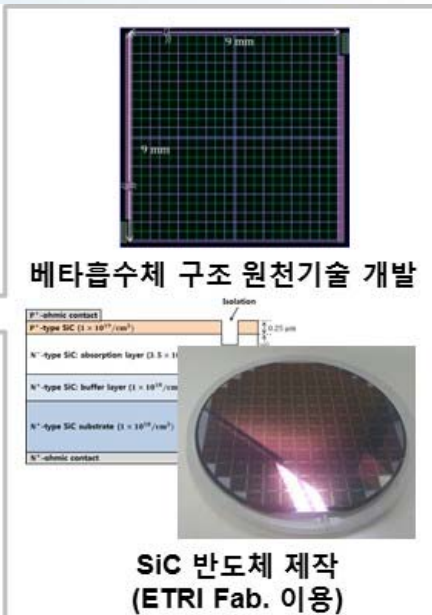
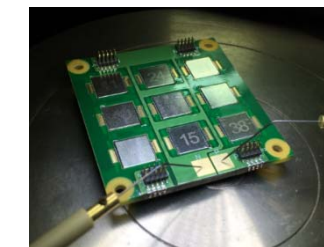
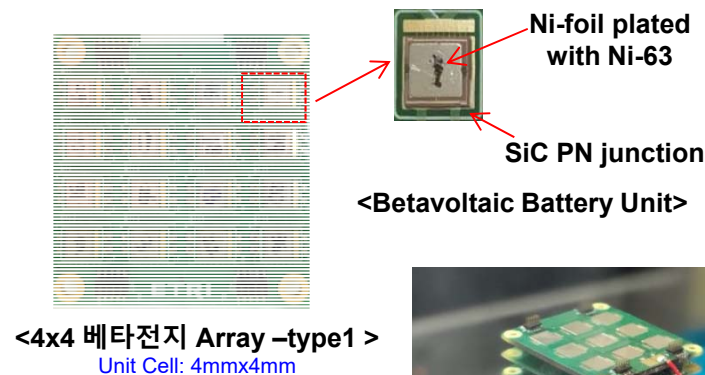
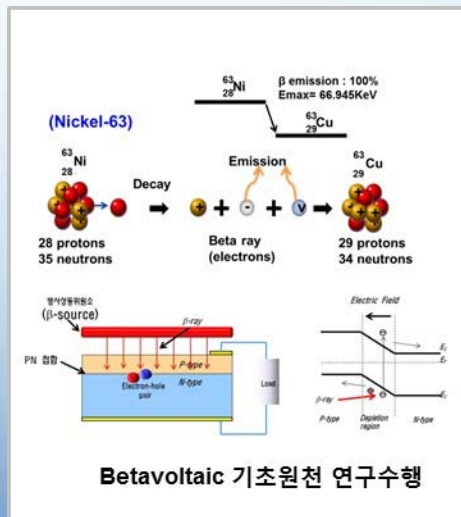


<Shielding>

기술개발 내용 (2012~2017)

- 세계 최고 출력밀도 및 효율 베타전지 시제품 개발 성공
 - 출력 4.45 nW/cm², 효율 2.56% (Pout > 1μW)
- 국내 최초 SiC 베타전지 설계·공정·제작 기술 확보
- 1 μW급 시제품 제작용 고방사능 Ni-63 생산 및 포일 제작(≥40 mCi/cm²)

Ni-63/SiC 기반 베타전지 개발



외부환경 독립형 반영구 독립전원 시스템

베타전지 기반 반영구 독립전원 상용화

베타전지 제조장비 및 상용화
베타전지 사업화

Ni63 증착 장비, 베타전원-흡수체 접합장비 개발
독립전원(베타전지) 사업화 전략 수립
사업총괄(컨소시엄 운영 및 기술 네트워킹)

방사성 동위원소 기술

동위원소 선원 표준화
베타전지용 방사선기기 개발 및 인증

고방사능 Ni63 포일 제작 및 표준화
베타전지 모듈 방사선기기 개발 및 인증 획득
Ni63 국산화 기반 및 상용화 기반 구축

베타전지 흡수체

고성능 에너지 흡수체 개발
고효율 베타전지 모듈

고밴드갭 SiC 흡수체 상용화
고집적화 및 모듈 최적화



독립전원 응용 및 신뢰성검증

독립전원 응용시스템 개발
성능평가 및 신뢰성검증

독립전원 적용 응용시스템 개발
핵심부품 성능평가 및 내방사선 연구
독립전원 & 응용시스템 신뢰성 검증

응용시스템 개발 및 상용화

방사능 감지 모니터링 시스템 개발
방사능 감지 시스템 상용화

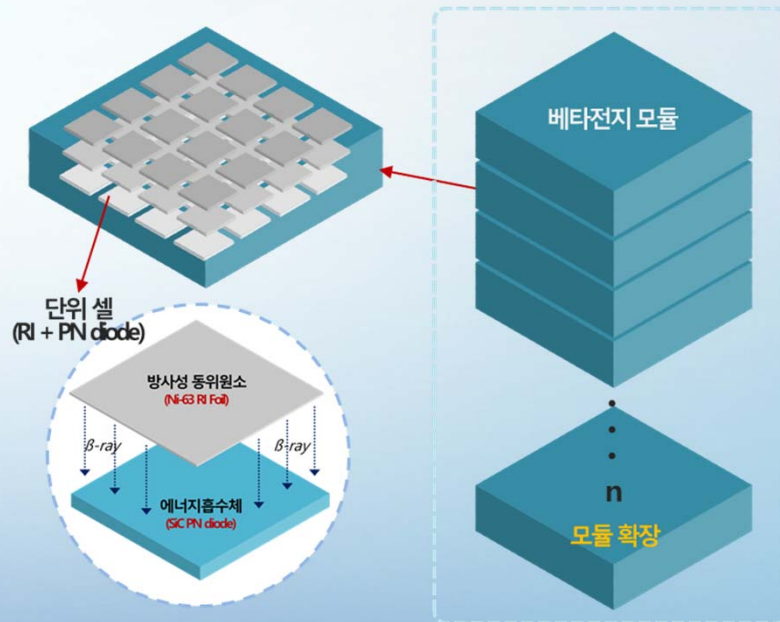
원자력시설 내 방사선 감지 시스템 실증
방사능 감지 시스템 제품인증

연구 내용 (2018~현재)

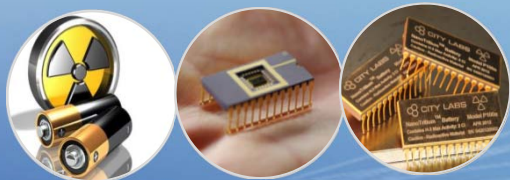
- 외부환경 독립형 반영구적 독립전원 시스템 상용화: 베타전지 모듈 및 응용 시스템 개발

반영구 독립전원

<베타전지 기반 독립전원>

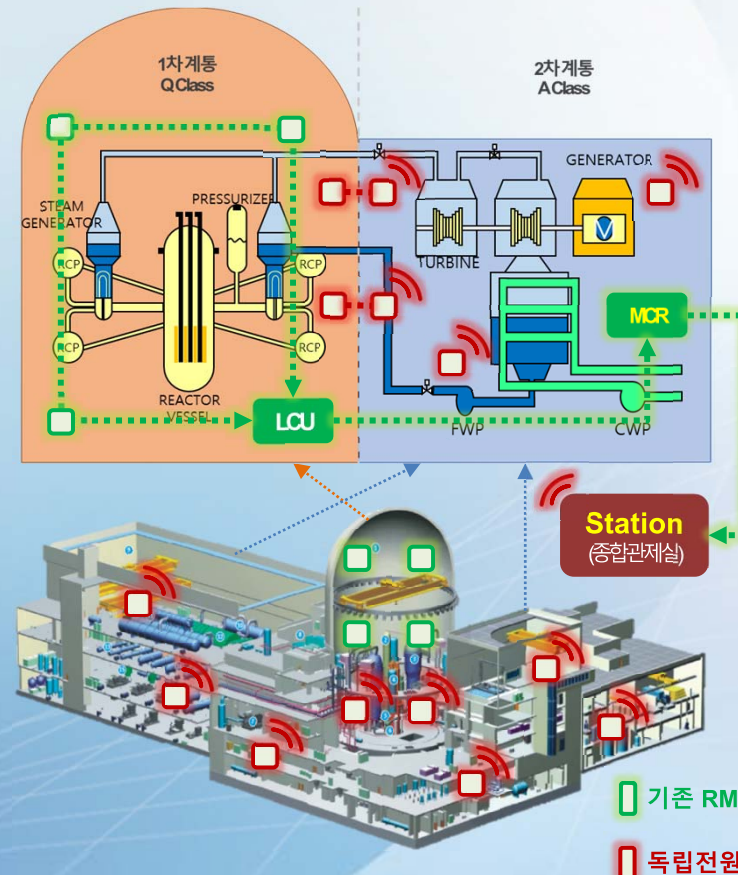


<수요자 맞춤형 독립전원 모듈>



독립전원 응용 시스템

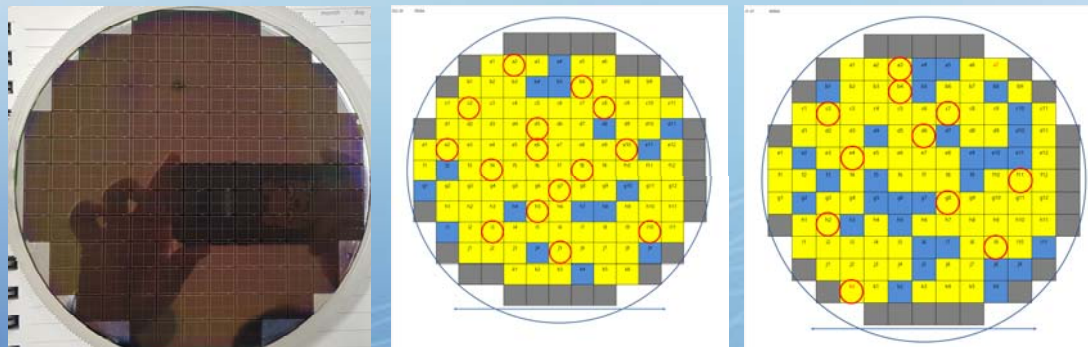
<원자력 시설 내 방사선 감시 시스템>



SiC 흡수체 개발 (2018~현재)

- ▣ 베타전지용 SiC 흡수체 양산화 공정 구축 – ETRI 반도체 FAB
 - 단위공정단위 공정 최적화를 통한 ETRI 표준 실리콘 공정라인에 베타전지용 SiC 공정 recipe DB 구축완료
 - 베타전지용 SiC 흡수체 공정 수율 : 99.25%

베타전지용 SiC 흡수체 Process 기반구축 (ETRI 반도체 FAB)



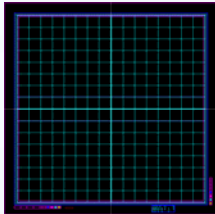
SiC 공정 개발 및 안정화를 통한
공정수율 100% 달성 (평균 99%)

베타전지 모듈 개발 (2018~현재)

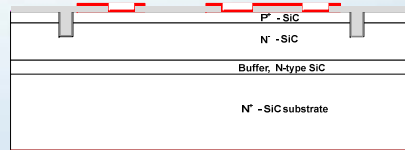
베타전지용 SiC 반도체 설계 및 공정

- 10mmx10mm Active Area
- 고효율 SiC 흡수체 성능 고도화 및 최적화

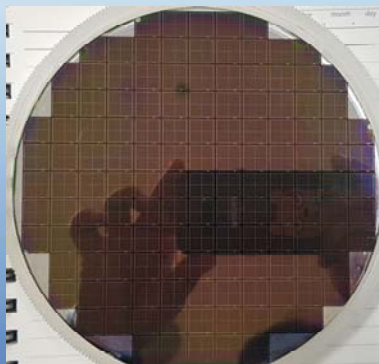
<Layout>



<흡수체 구조>



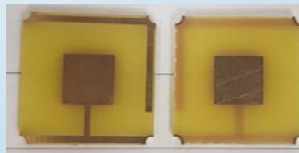
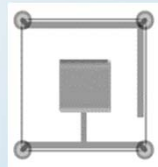
<Fab-out W/F>



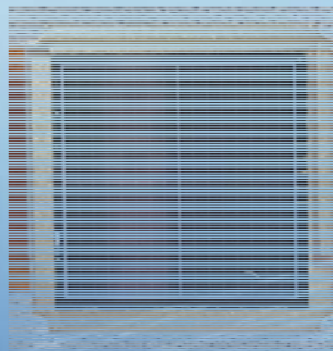
단위셀 COB 제작

- Single Chip COP 설계

<Layout>

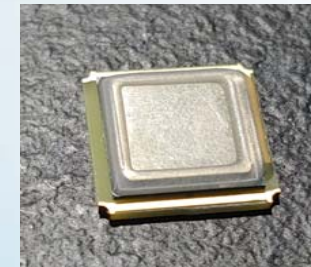


<단위셀 COB>



Ni-63/SiC 접합

- 자동화 설비를 이용한 Ni-63/SiC 접합 공정



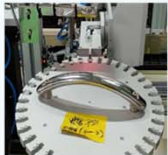
베타전지 Array 모듈 제작

- 1 Array: 16 cell (parallel) - 16 cell (parallel) Series 구성
- 양면 Array 구성: 64 unit cells
- 양면 Array 베타전지 출력: 3.9 μW 예상

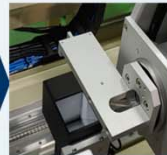


양산화 기술 개발 (2018~현재)

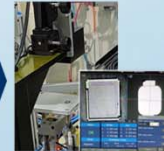
Single Array 제작 장비

Tray 이동
및 정위치Ni-63 Foil
Loading

Loader 반전

Tray 안착
및 고정Tray 이동
및 정위치단위셀보드
Loading

Loader 회전



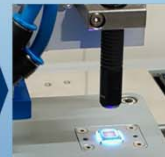
Vision Align

Stage 부착
위치 이동
(Magnet 상승)

Ni-Foil 안착

접합제 도포
위치 이동Dispenser Unit
도포 위치 이동

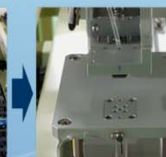
Sealant 도포



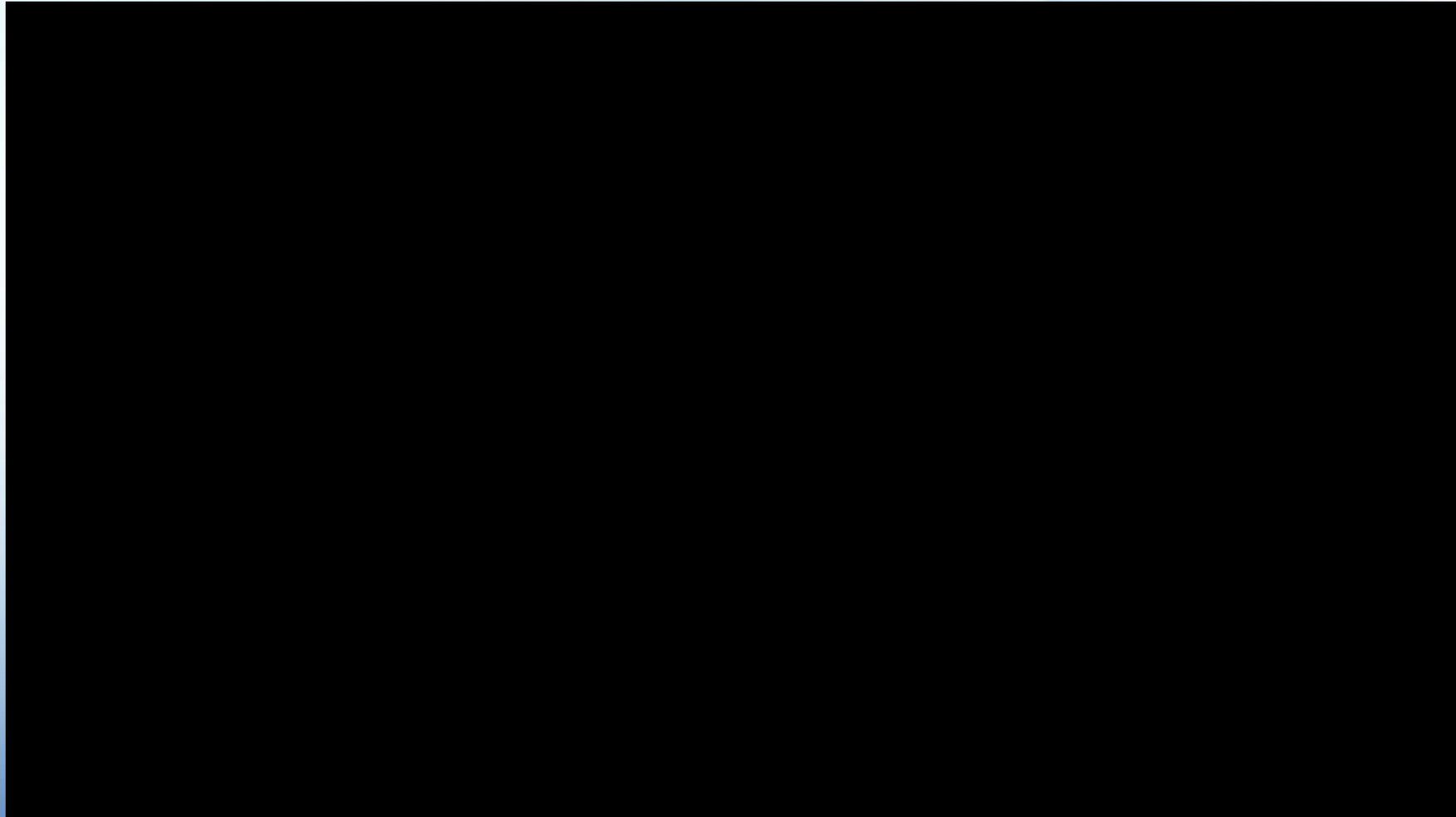
경화 Unit 이동



UV Curing

단위셀 배출
Loading단위셀 검사기
안착 및 Align단위셀 I-V 검사
(OK or NG)단위셀 배출
(Next Process)단위셀 접합 완료
(Next Process)

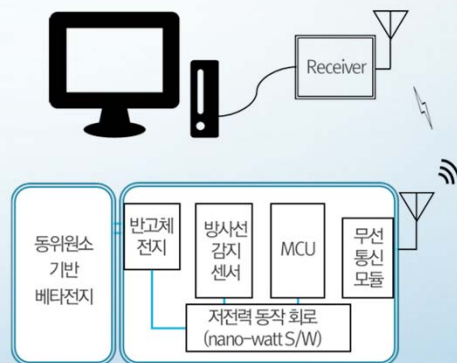
양산화 기술 개발 (2018~현재)



응용시스템 개발 (2018~현재)

- 독립전원을 이용한 원자력발전소 RMS 시제품 개발
 - 방사능감지센서 및 송수신 통신모듈 설계 및 제작
 - 감시시스템 실증시험용 Pannel 제작 및 S/W 적용

독립전원 응용시스템 & 송수신기설계



실증시험용 모듈 제작



베타전지 로드맵

“도전과제” (9개월)

기술 가능성
검증

Test Cell

2011

원자전지
기초연구

“원천과제” (5년)

핵심 원천기술
시장선점 좌우

BV unit cell 확장 플랫폼

2014

베타전지
원천기술개발

2017

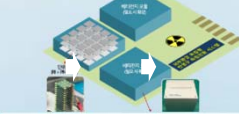
“상용화 과제” (3.5년)



안전 감시 시스템 시제품



반영구 독립전원 시스템



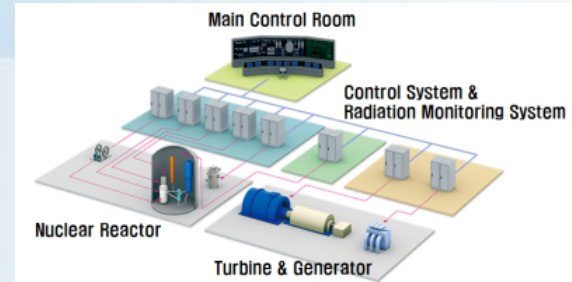
스케일러블 베타전지



베타전원 상용화 기술 확보

2020

2023

베타전지
상용화 기술개발

(원자력시설, 방폐장) 감시 시스템



시설물 안전모니터링 시스템

2026

상용화 및
응용 분야 확대

“국내유일” 그리고 “세계최고수준” 인 국내 베타전지 기술의 상용화를 통해 미래시장 주도
상용화의 시작은 “반영구 독립전원 시스템”

감사합니다

여성 지부

- KNS여성(특별)위원회: 2015년 9월 ~ 2016년 8월
- 여성지부 : 2016년 9월 1일



1대 : 김은희

2016년 9월1일~2017년8월31일
(2015년 9월~2016년 8월
여성(특별)위원회 위원장)

서울대학교 원자핵공학과 교수



전자빔 조사
생육연장기술적용
장미 전달



2대 : 강문자

2017년 9월1일~2019년8월31일

한국원자력연구원 책임연구원



꽃 협찬



한국원자력연구원
방사선이용운영부 박해준

한국원자력연구원
하나로이용부 이재기

농림수산부과제



3대 : 김영미

2019년 9월1일~2021년8월31일

한국원자력안전기술원 책임연구원

