

해양 SMR 시장과 개발 현황

- 한국원자력학회 2021 춘계학술대회 워크숍 -

2021.05.12.

이병진

한전기술 원자로설계개발단



순서

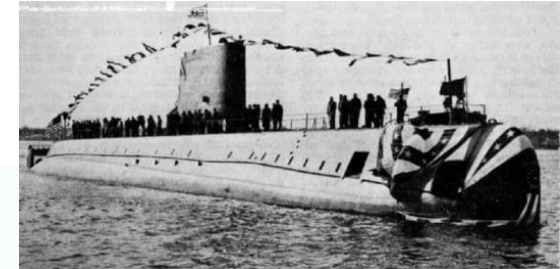
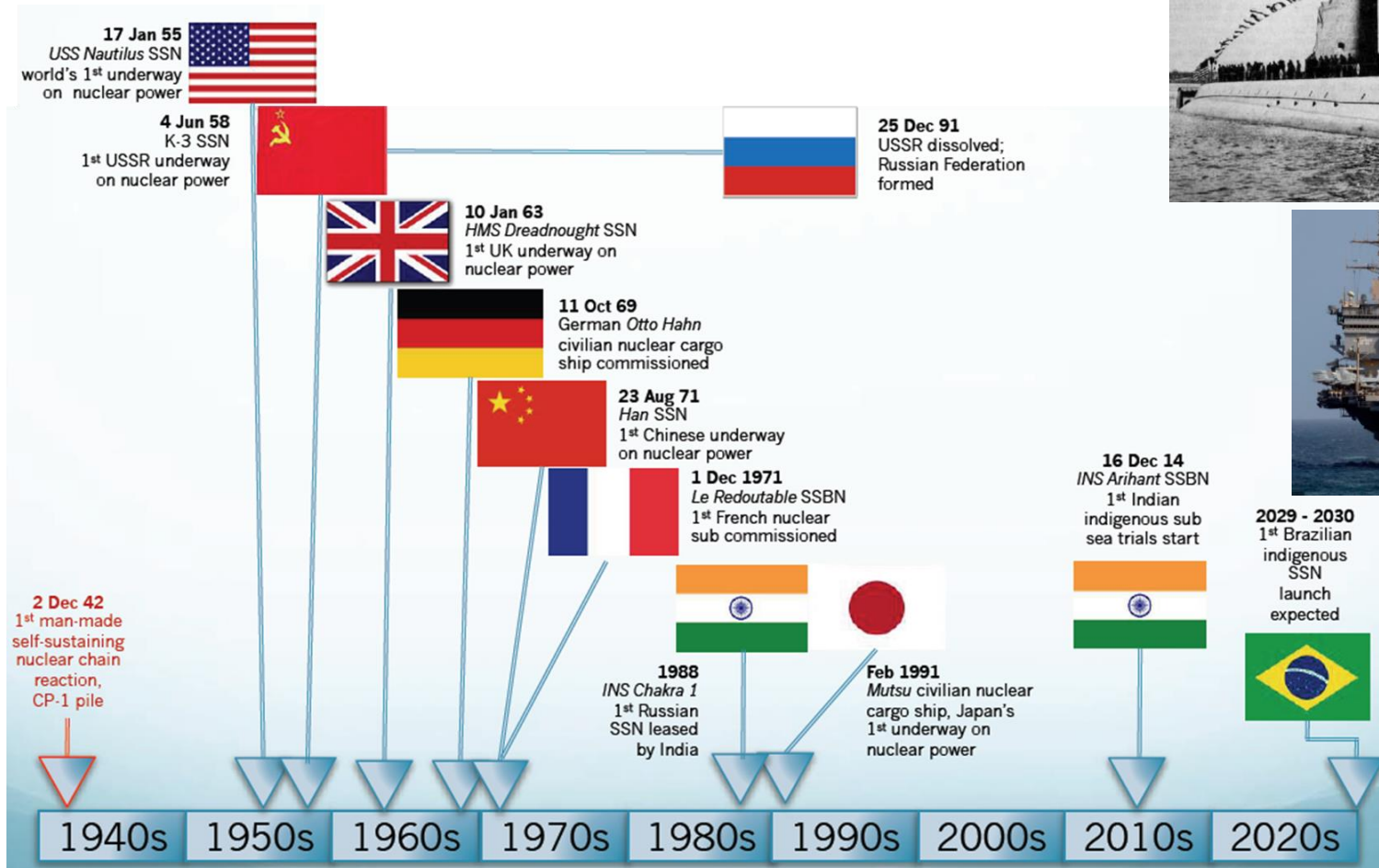
- 1 해양 원자력 시장
- 2 해양 SMR 개발 현황
- 3 극복 과제

해양 원자력 시장



지금까지 해양 원자력은 주로 군사용으로

- 1955년 최초 원자력잠수함 Nautilus호 이후, 항공모함, 잠수함, 전투함 등 500여척의 원자력추진선과 여기에 탑재된 800여대의 원자로 운영 경험



<<https://lynceans.org/all-posts/marine-nuclear-power-1939-2018/>>

상용 해양 원자력 경험은 매우 제한적이었어

- 1959년 러시아 Lenin호 이후, 러시아는 꾸준히 원자력 쇄빙선 개발/운용
- 미국, 독일, 일본은 화물선 등 실험적 수준의 상용 해양 원자력 경험

선박명	국가	진수-퇴역	GT	길이	속도(kt)	SHP	원자로 형식	열출력 (MWt)
Savannah	미국	1962-1977	22,000	181	20.25	22,000	PWRx1	80
Otto-Hahn	독일	1968-1982	140,40	172	16	11,000	PWRx1	38
Mutsu	일본	1972-1996	8,242	130	16.5	10,000	PWRx1	36



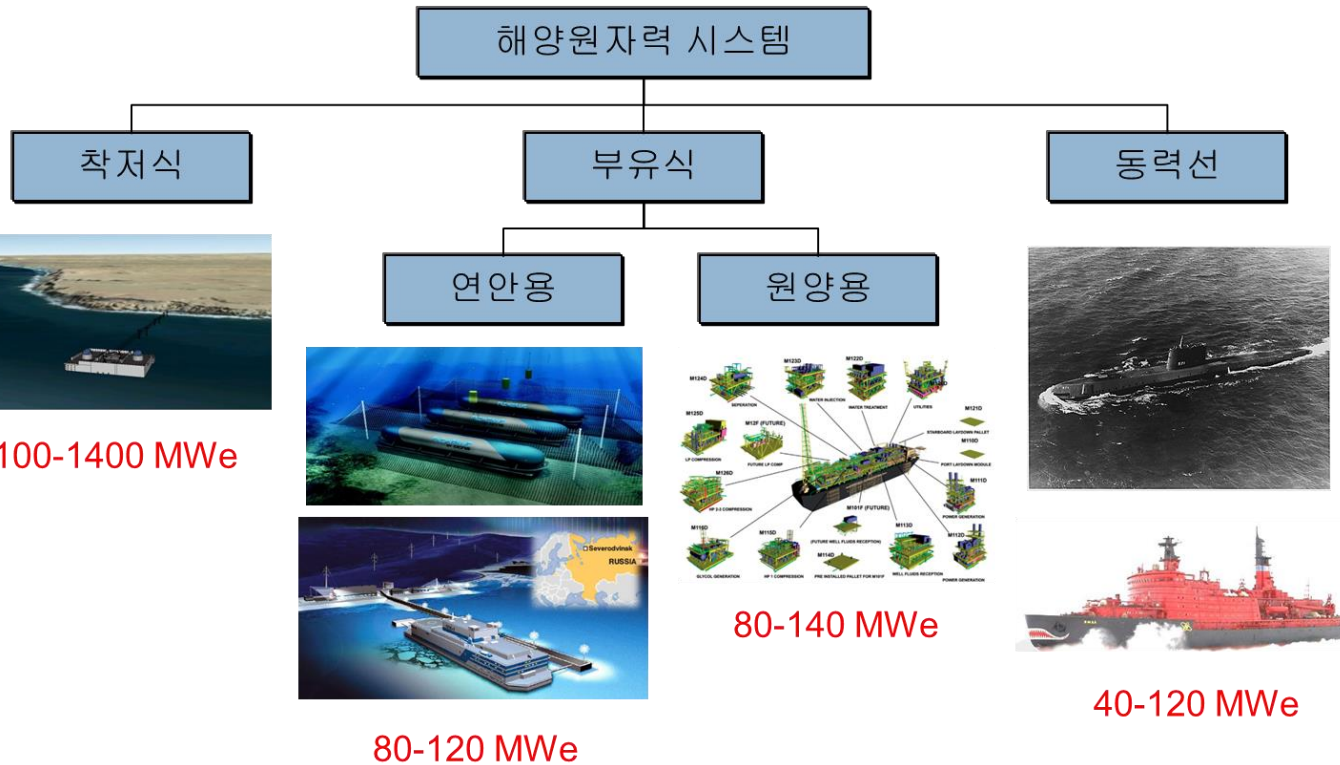
Lenin	러시아	1959-1989	16,000	134	18	44,000 ps	OK-150 × 3 OK-900 × 2	3x95 2x159
Arktika	러시아	1975-2008	20,665	147.9	20.8	70,700 ps	OK-900A × 2	2x159
Sibir	러시아	1977-1993	21,120	147.9	20.8	70,700 ps	OK-900A × 2	2x159
Rossiia	러시아	1985-	23,000	150	7	54 MW	OK-900A × 2	2x159
Sevmorput	러시아	1988-	33,900	260.1	20	40,800 ps	KLT-40 × 1	135
Taimyr	러시아	1989-	20,791	151.8	18.5	35 MW	KLT-40M × 1	171
Sovetskiy Soyuz	러시아	1989-	23,000	148	20.6	54 MW	OK-900A × 2	2x159
Vaigach	러시아	1990-	20,791	150	18.5	35 MW	KLT-40M × 1	171
Yamal	러시아	1993-	23,000	148	20.6	54 MW	OK-900A × 2	2x159
50 Lyet Po byedi	러시아	2007-	23,439	160	18.6	54 MW	OK-900A × 2	2x159



<해양원자력시스템 사업화 방안, 대한조선학회-한국원자력학회 해양-원자력 공동위원회, 2015>

해양 원자력시스템의 종류는 다양해

- **착저식 원전**
- **부유식 원전**
- **선박 추진 동력용**



해양-원자력 공동위원회

해양원자력시스템 사업화 방안

● 비즈니스 모델을 중심으로

공동위원장 : 한순홍, 이광원

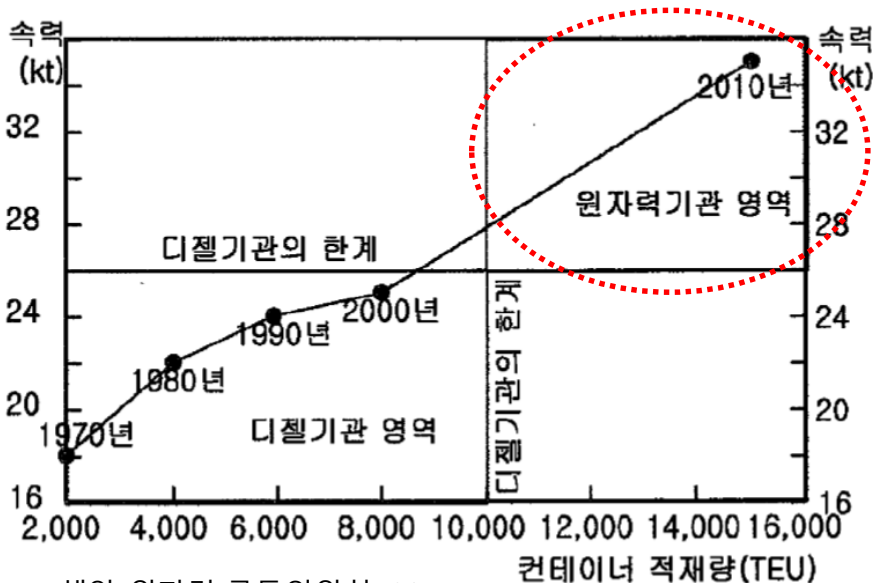
대한조선학회
www.danab.or.kr

한국원자력학회
www.nuclear.or.kr

<해양원자력시스템 사업화 방안, 대한조선학회-한국원자력학회 해양-원자력 공동위원회, 2015>

해양 원자력의 잠재 수요_선박 온실가스 규제 대응

- 온실가스감축 교토의정서, 파리협정 이행
 - 해양분야는 국제해사기구(IMO)에 위임
- 2050년까지 2008년 대비 50% 감축 목표
 - 2013년부터 신조 선박 규제
 - ~ 2030년: 40% ↓
 - ~ 2050년: 50% ↓
- 에너지 효율 개선만으로는 한계
 - 무탄소 대체에너지원 필요



<해양-원자력 공동위원회, 2015>

newpower, newstandard

〈한국해양수산개발원, 2019.8〉

WEEKLY REPORT

KMI 동향분석

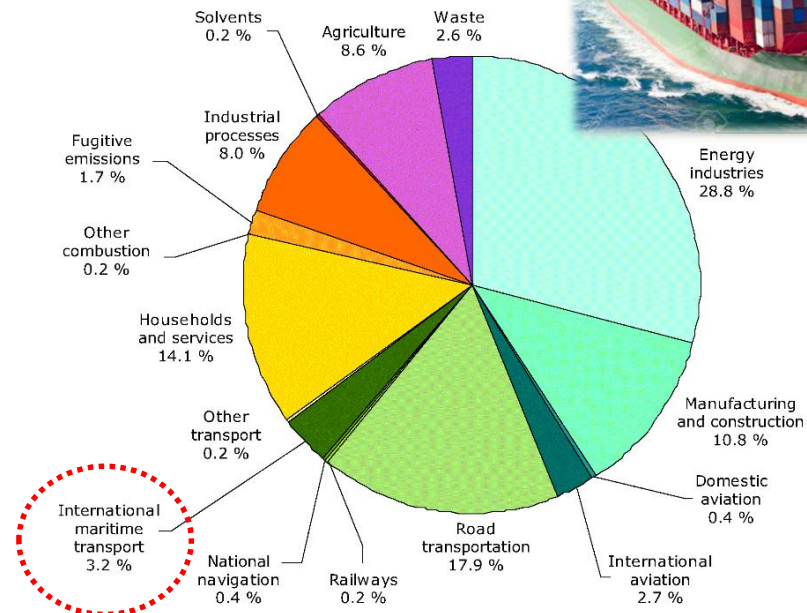
VOL.137
2019 AUGUST

발간년월 2019년 8월(통권 제137호) 주 소 49111 부산광역시 영도구 해양로 301빌딩 26(동상동) 발행인 양창호
감 수 김광수 발행처 한국해양수산개발원 자료문의 기획조정본부 연구기획협력실 홈페이지 www.kmi.re.kr
이 보고서의 내용은 본원의 공식적 견해가 아닙니다.

국제해사기구(IMO), 2030 온실가스 40%
감축 목표, 新추진연료(화석 연료-OUT)
개발 및 사용을 의미

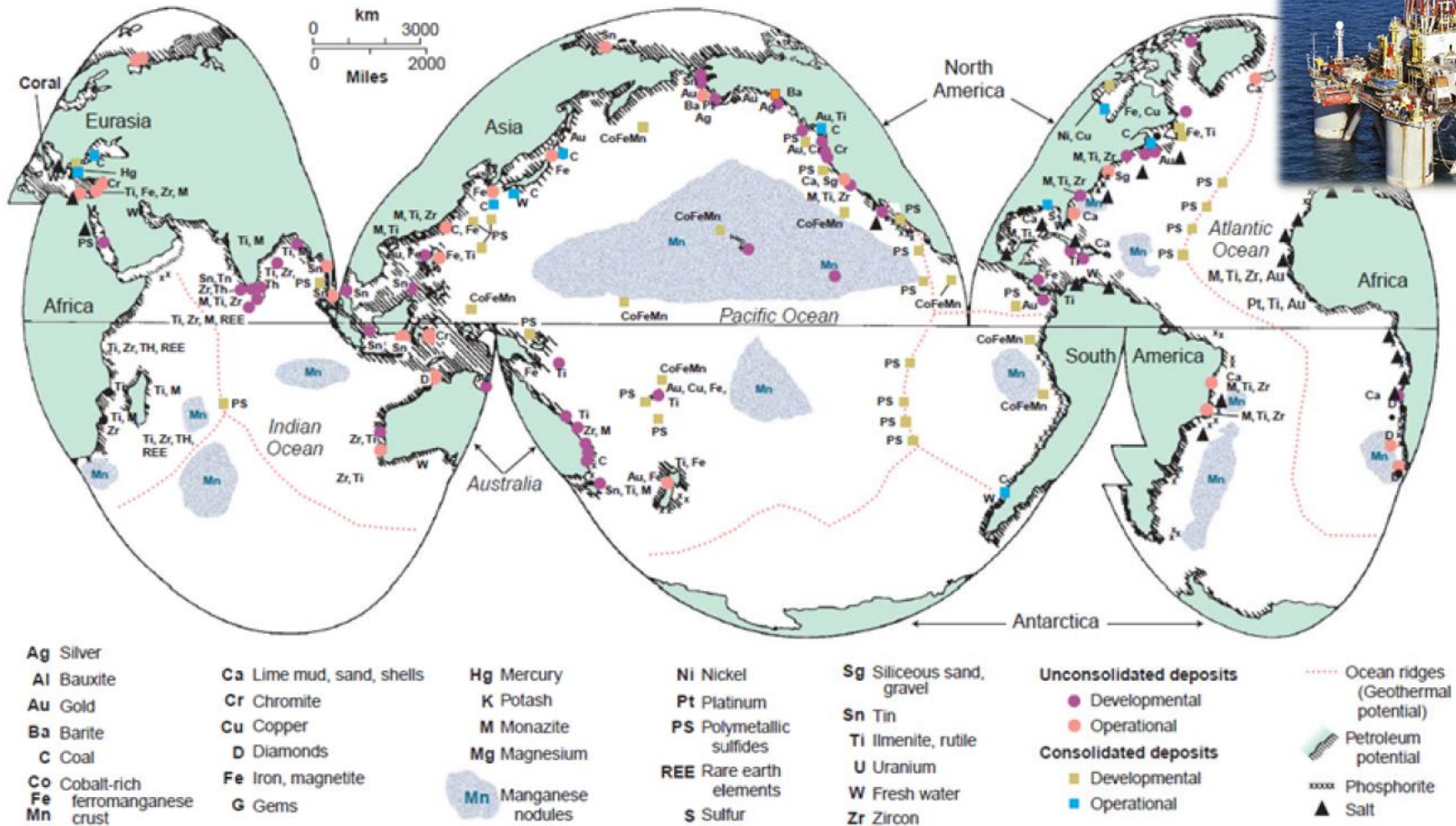
박한선 해사안전연구실 실장
(hspark@kmi.re.kr/051-797-4627)
하산영 해사안전연구실 전문연구원
(hsy@kmi.re.kr/051-797-4640)
박상원 해사안전연구실 연구원
(psw6745@kmi.re.kr/051-797-4919)

✓ 국제해운 :
전체 온실가스 32% 배출



해양 원자력의 잠재 수요_해양자원 개발의 안정적 에너지 공급

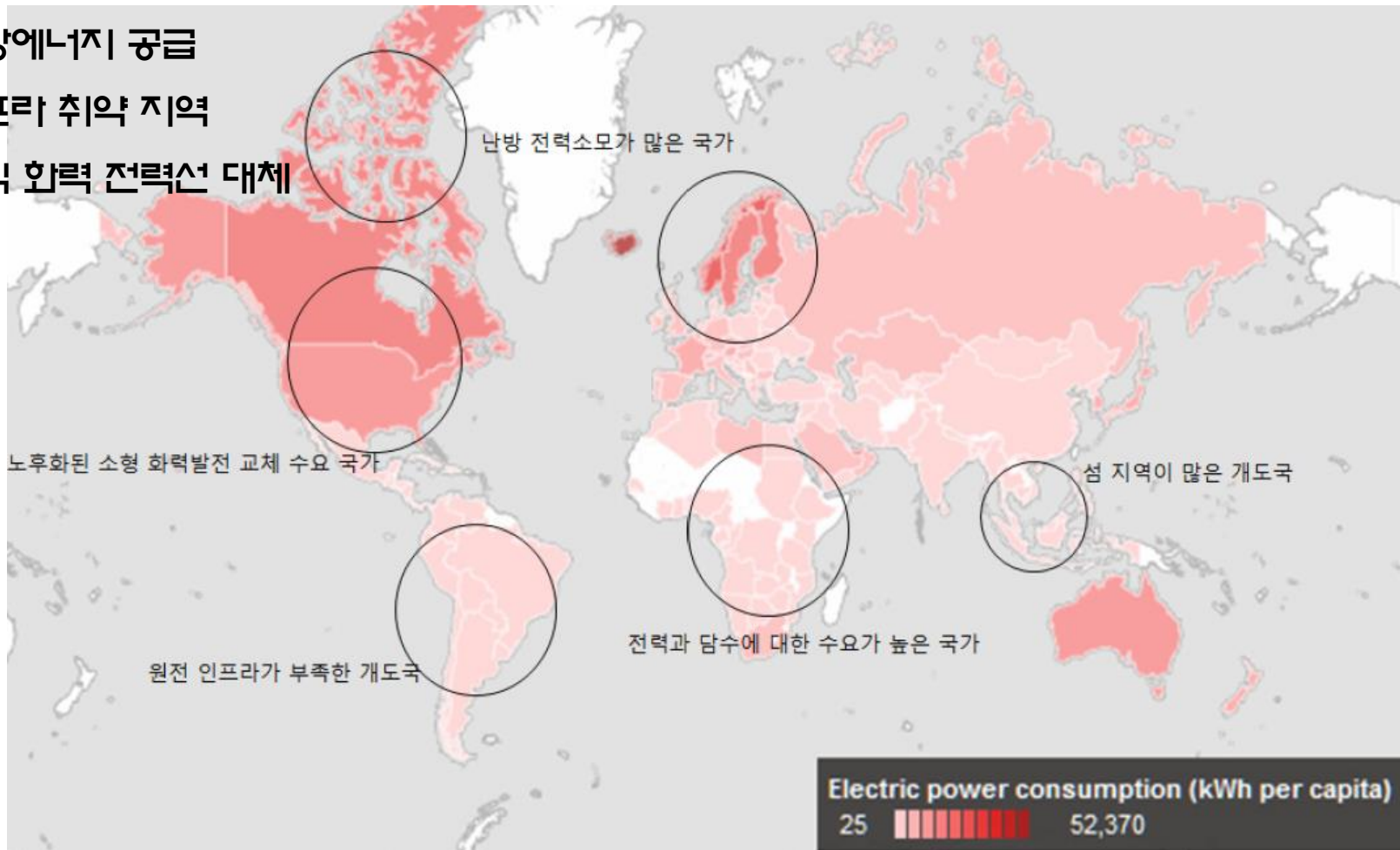
해양자원 분포도



<해양원자력시스템 사업화 방안, 대한조선학회-한국원자력학회 해양-원자력 공동위원회, 2015>

해양 원자력의 잠재 수요_기타 다양한 소규모 에너지원

- 소규모 분산 전력망
- 물, 에너지 부족 지역
- 극지방 난방에너지 공급
- 송배전 인프라 취약 지역
- 기존 부유식 화력 전력선 대체
- ...

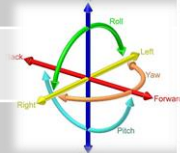


<해양-원자력 공동위원회, 2015>

해양 SMR 개발 현황

육상용 vs. 해양용 원자로 설계요건 비교

설계기준	육상용 가압경수로	해양용 가압경수로
안전설계 규정/표준	ANSI/ANS-51.1 (1983) (미국/한국), IAEA 안전표준, EU 안전표준	IMO Resolution A.491(XII) (1981)
심층방어 개념	<ul style="list-style-type: none"> • 1 방벽 : 피복관 • 2 방벽 : RCPB • 3 방벽 : 격납건물 • 4 방벽 : EAB 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 방벽 : 피복관 • 2 방벽 : Primary PB (PPB) • 3 방벽 : 격납구조물 • 4 방벽 : 안전올타리 (safety enclosure)
발전소 상태 (PC)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : 정상운전 (ALARA) • 2 : $>10^{-1}$ /RY (ALARA) • 3 : $>10^{-2}$ /RY (10% 부지선량) • 4 : $>10^{-4}$ /RY (25% 부지선량) • 5 : $>10^{-6}$ /RY (100% 부지선량) 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 : 정상운전 (ALARA) • 2 : 경미사건 (ICRP기준, 미손상) • 3 : 중요사건 (ICRP기준, 부분손상) • 4 : 심각사건 (연간제한선량 2배 이내, 인명/선박상실)
안전기능	<ul style="list-style-type: none"> • RCPB 건전성 유지 • 원자로 정지 및 안전정지 유지 • 소위 피폭사고 결말 방지 및 완화 	<ul style="list-style-type: none"> • 1, 2 방벽 건전성 유지 • 3, 4 방벽 누설제한 & 방지 • 원자로 잔열제거 • 원자로정지 및 안전정지 유지
안전등급	<ul style="list-style-type: none"> • SC-1: RCPB 유지 설비 • SC-2: 격납건물, 비상안전계통 • SC-3: I&C 등 기타 안전 기능 	<ul style="list-style-type: none"> • SC-1: PPB 기기, 원자로보호/정지계통, SG/MSL 등 • SC-2: 격납구조물, ECCS, CRDS, RPS 전원공급 계통 • SC-3: NSSS 안전계통 및 지원계통 • SC-4: 안전올타리 구조물, 터빈 등 기타 NSSS
설계등급	ASME 1, 2, 3 등급 / NNS 등급	Design Class (DC) 1, 2, 3, 4 등급
하중등급	ASME Service Limits A,B,C,D 조합 내진, BLPB 등 동적 하중 고려	설계등급 별 하중조합 6 자유도운동, 충돌, 전복, 좌초, 폭발 등 동적 하중 고려



<한국형 해양원자력시스템 개발 방향, 한국원자력학회 해양원전특별위원회, 2013>

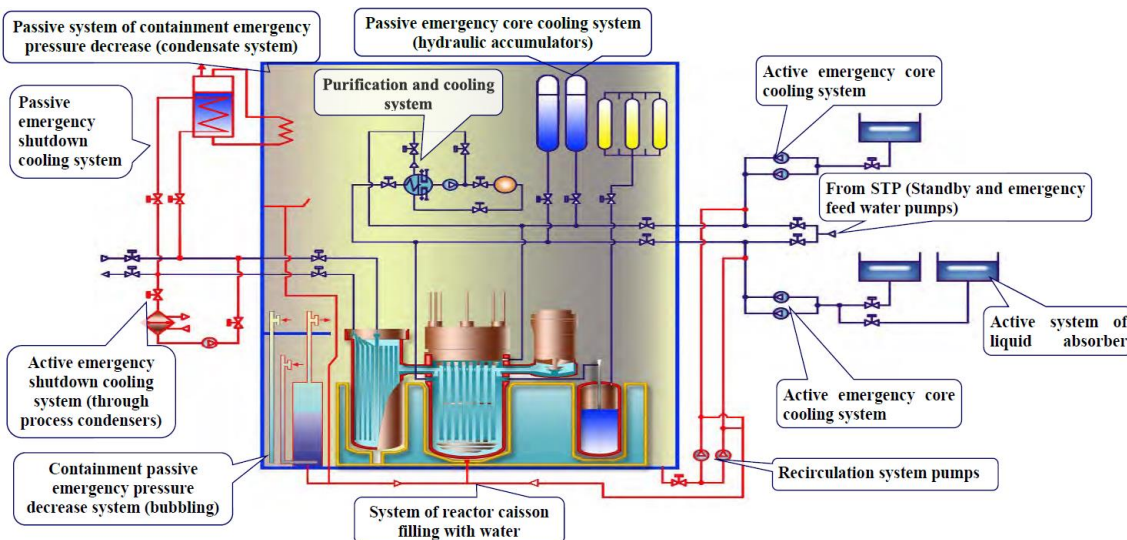
최근 개발 중인 주요 해양용 SMR

101-300		<ul style="list-style-type: none"> • VBER-300 • (Marine Based)
41 - 100	  	<ul style="list-style-type: none"> • ACPR-50S • RITM-200M
11 - 40		<ul style="list-style-type: none"> • KLT40S
< 10	  	<ul style="list-style-type: none"> • ABV-6E • SHELF



<Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, IAEA, 2020>

KLT-40S (레이시아 OKBM) (1/2)



MAJOR TECHNICAL PARAMETERS

Parameter	Value
Technology developer, country of origin	JSC "Afrikantov OKBM", Rosatom, Russian Federation
Reactor type	PWR
Coolant/moderator	Light water / light water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	150 / 35
Primary circulation	Forced circulation
NSSS Operating Pressure (primary/secondary), MPa	12.7
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	280 / 316
Fuel type/assembly array	UO ₂ pellet in silumin matrix
Number of fuel assemblies in the core	121
Fuel enrichment (%)	18.6
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	45.4
Refuelling Cycle (months)	30-36
Reactivity control mechanism	Control rod driving mechanism
Approach to safety systems	Active (partially passive)
Design life (years)	40
Plant footprint (m ²)	4320 (Floating NPP)
RPV height/diameter (m)	4.8 / 2.0
RPV weight (metric ton)	N/A
Seismic Design (SSE)	9 point on the MSK scale
Distinguishing features	Floating power unit for cogeneration of heat and electricity; no onsite refuelling; spent fuel take back
Design status	Connected to the grid in Pevek in December 2019. Entered full commercial operation in May 2020.

<Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, IAEA, 2020>

KLT-40S (북극선박 OKBM) (2/2)



<https://www.yahoo.com/news/>

● Floating NPP “Akademik Lomonosov”

- ✓ Construction began in St. Petersburg, 2006
- ✓ Fuel loading in Murmansk, 2018
 - Testing for nearly a year
 - 100% power, 2019.03
- ✓ Towed to Pevek, 2019.09
- ✓ **Commissioned, 2020.05**
 - Replace Bilibino NPP (4x12 MWe + 76.7 MW heat)
 - Refueling on site in Pevek (3~4 yr period)
 - Major overhaul in Murmansk (~12 yr period)

World's first floating nuclear reactor

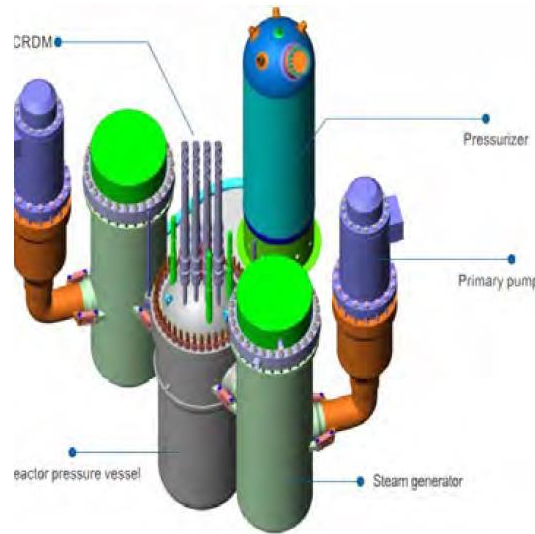
The Russian power plant begins a 4-to-6 week sea voyage Aug 23

Work began on the platform in Saint Petersburg in 2006



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

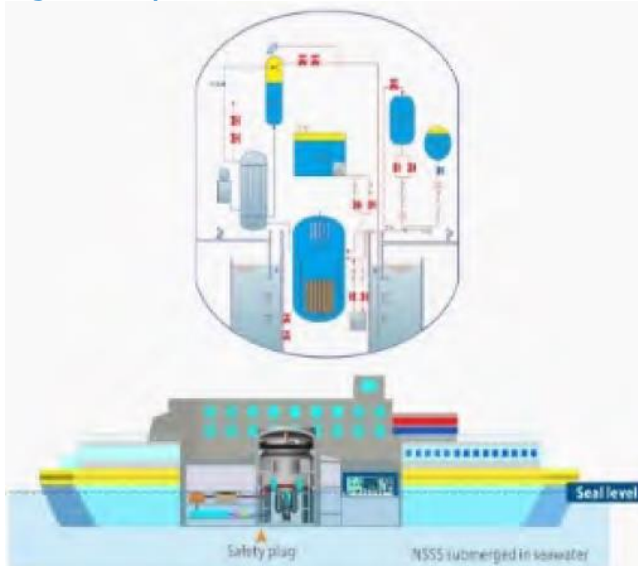
ACPR50S (중국 CGNPC)



MAJOR TECHNICAL PARAMETERS

Parameter	Value
Technology developer, country of origin	China General Nuclear Power Group (CGNPC), China
Reactor type	Loop type PWR
Coolant/moderator	Light water / light water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	200 / 50
Primary circulation	Forced circulation
NSSS Operating Pressure (primary/secondary), MPa	15.5
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	299.3 / 321.8
Fuel type/assembly array	UO ₂ pellet / 17x17 square
Number of fuel assemblies in the core	37
Fuel enrichment (%)	< 5
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	< 52
Refuelling Cycle (months)	30
Reactivity control mechanism	Control rod driving mechanism (CRDM), solid burnable poison and boron solution
Approach to safety systems	Passive
Design life (years)	40
RPV height/diameter (m)	7.2 / 2.2
Distinguishing features	Floating power boat, once-through steam generator, passive safety system
Design status	Completion of conceptual/program design, preparation of project design

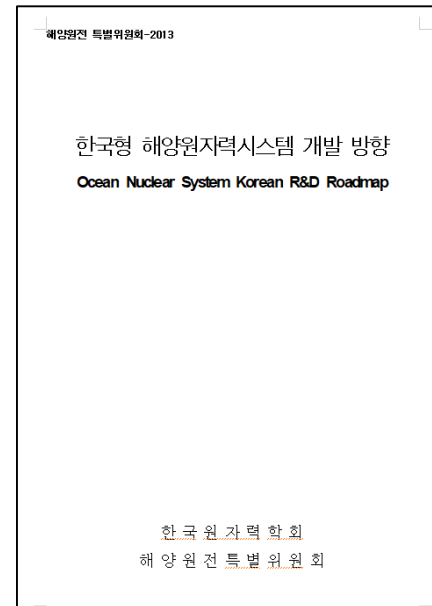
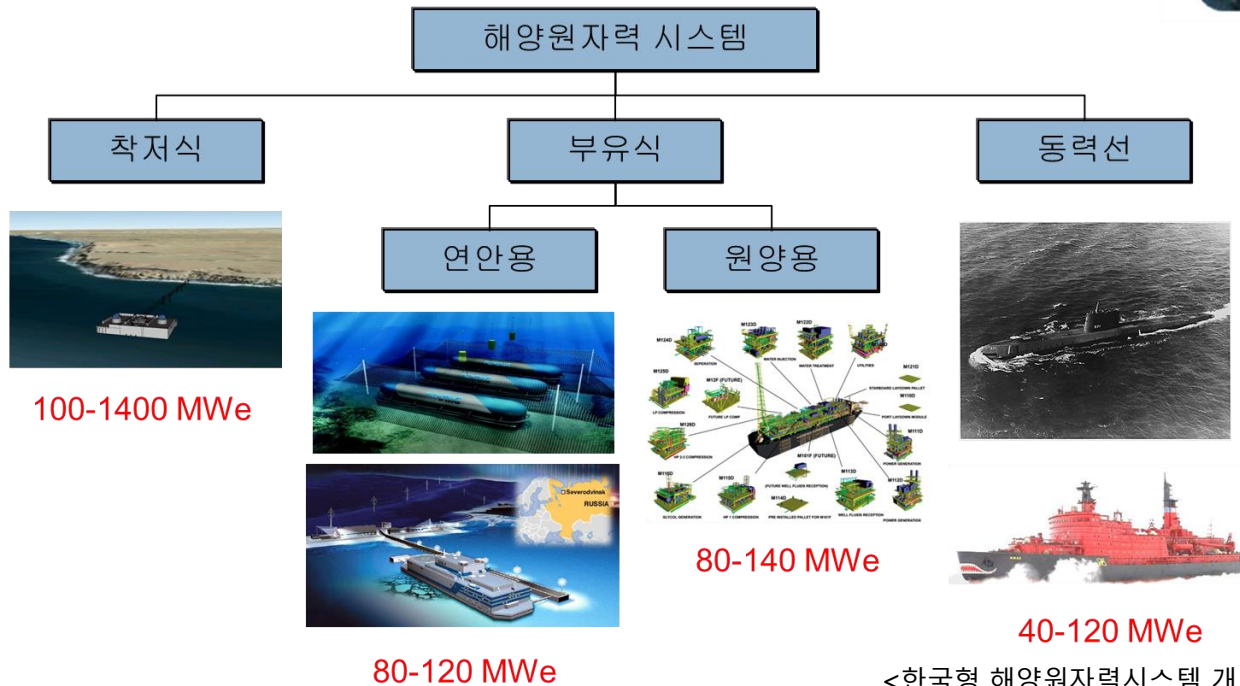
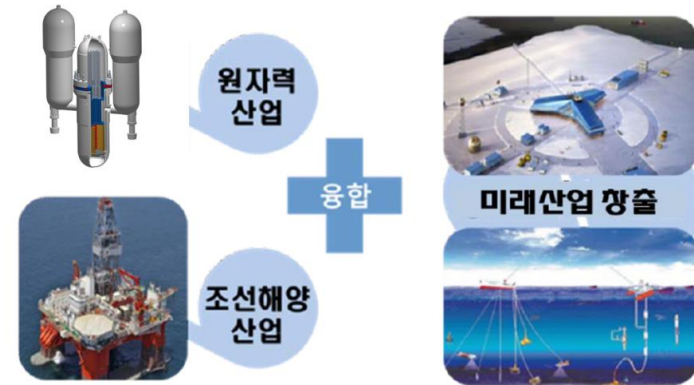
✓ Preliminary design completed, 2020



<Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, IAEA, 2020>

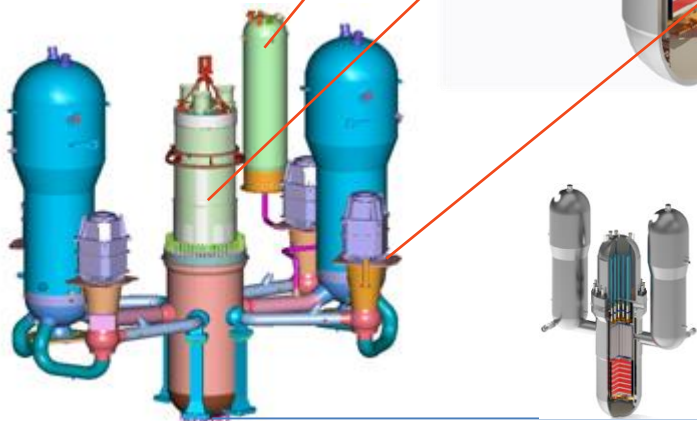
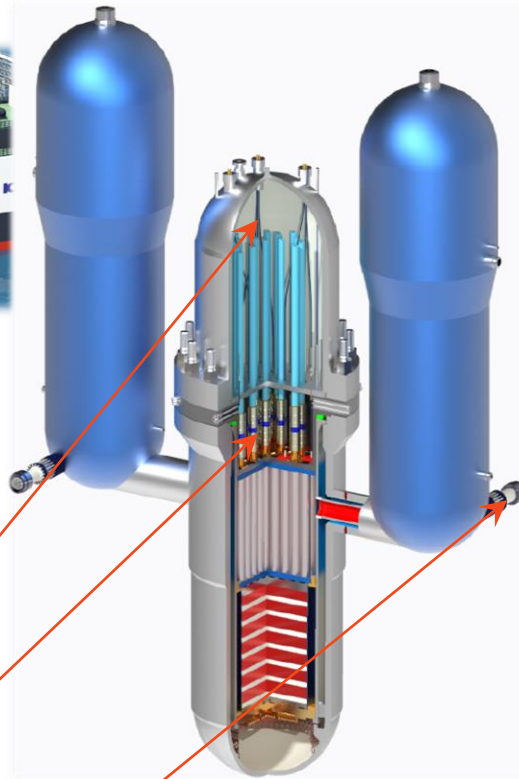
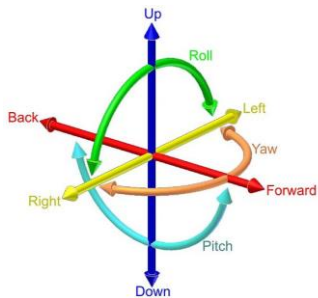
우리나라 해양원자력 개발 방향 논의_해양원전특별위원회 (2013)

- 시장 요구에 따라 착저식, 부유식, 동력선 등 다양한 가능성 확인
- 예상되는 주요 장애 요인
 - ✓ 양 산업간 사업 모델, 방식 등 차이점
 - ✓ 양 산업간 설계 규범, 표준, 인허가 체계 차이점
 - ✓ 사용후연료처리, 해상사고처리, 국제해양법 준수



<한국형 해양원자력시스템 개발 방향, 한국원자력학회 해양원전특별위원회, 2013>

BANDI-60_ 한전기술의 차별화 전략



원자로	블록형 PWR ✓ 노즐-노즐 직접 연결
출력 (열/전기)	200 MWt (60 MWe)
일차냉각재 순환	강제 순환
핵연료 및 노심	17x17 봉형 UO ₂ ≤5% U-235 유효핵연료 길이 2m 재장전 주기 4~5년
반응도 제어	무봉산 / 가연성독물질(BP) 제어봉 ✓ 내장형 CEDM
증기발생기	재순환 U-tube형 / 판형 (Option) ✓ 포화증기
가압기	원자로 일체형 / 전열기, 스프레이
냉각재펌프	캔드 모터
비상안전주입	피동
잔열 제거	피동 (안전) / 능동 보조 (비안전)
설계 수명	60 yr

사업화 전략

● Off-grid 틈새시장 창출

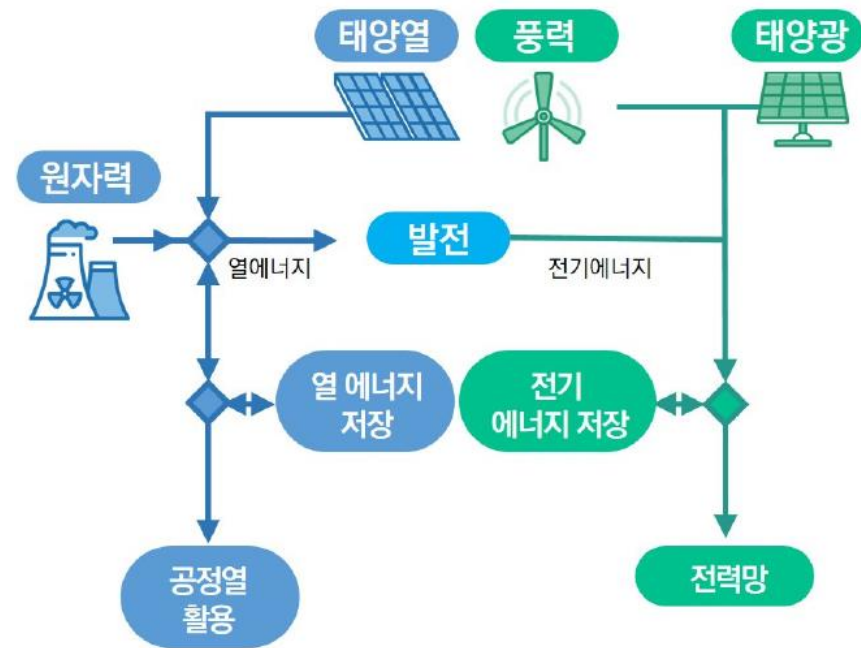
● 기술 융합

✓ 원자력-조선해양 거대기술 융합

- 부유식 소형 원전, 원자력 쇄빙선, 대형선박 추진 등

✓ 재생에너지 간헐성 극복에 원자력 활용

- 공정열, 난방열, 해수담수화, 수소 등 연계
- 무탄소(CF-100) 분산 전력망 구성 등



<한국원자력학회 해양원전특별위원회, 2013>

극복 과제



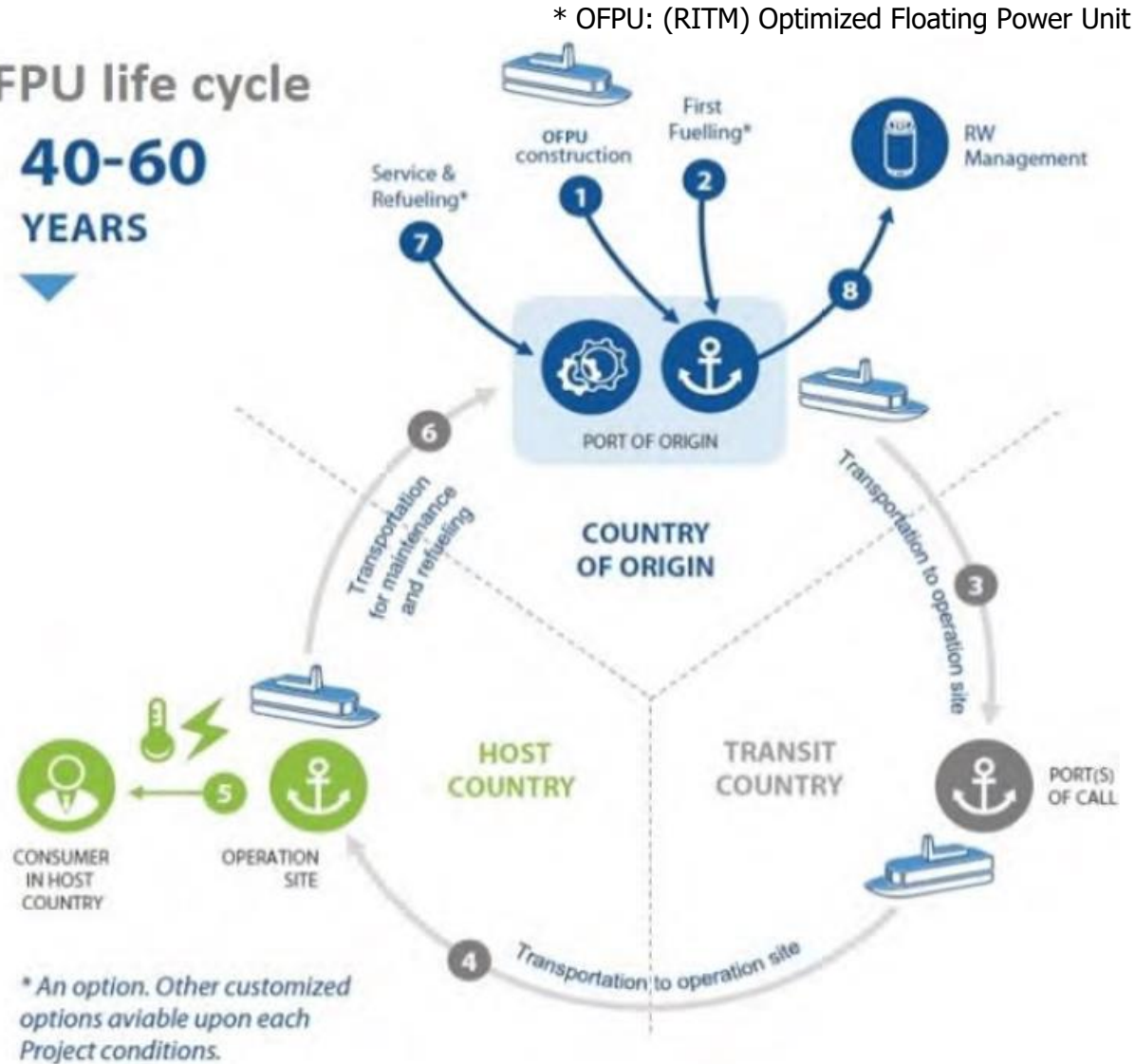
새로운 사업 모델 → 새로운 현안

✓ 예) 러시아 ROSATOM 사업모델

1. 해양 원전 건조
2. 최초 핵연료장전
3. 이동
4. 운전
5. 이동
6. 정비, 핵연료재장전
7. 방사성폐기물 처리

OFPU life cycle

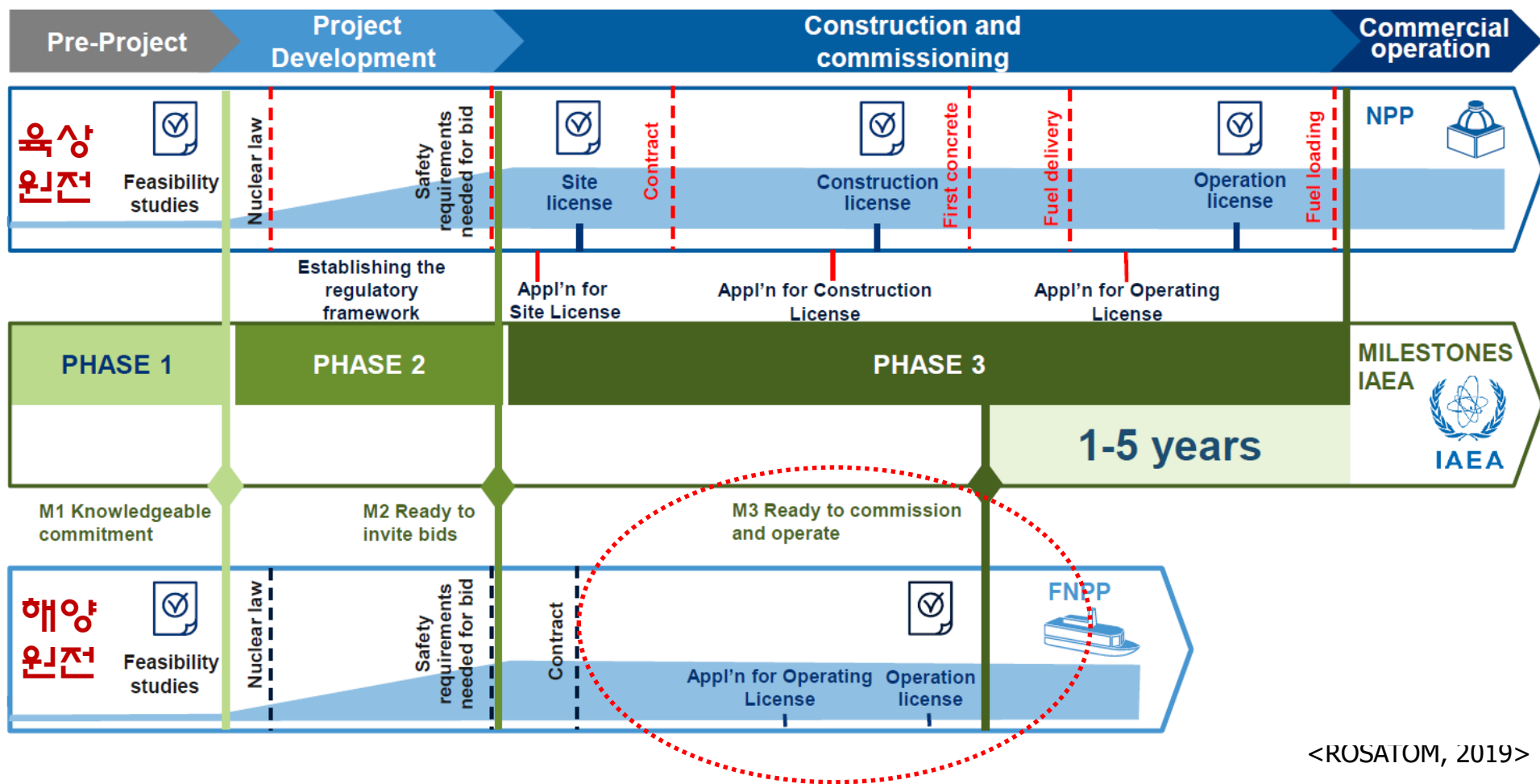
40-60
YEARS



<Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, IAEA, 2020>

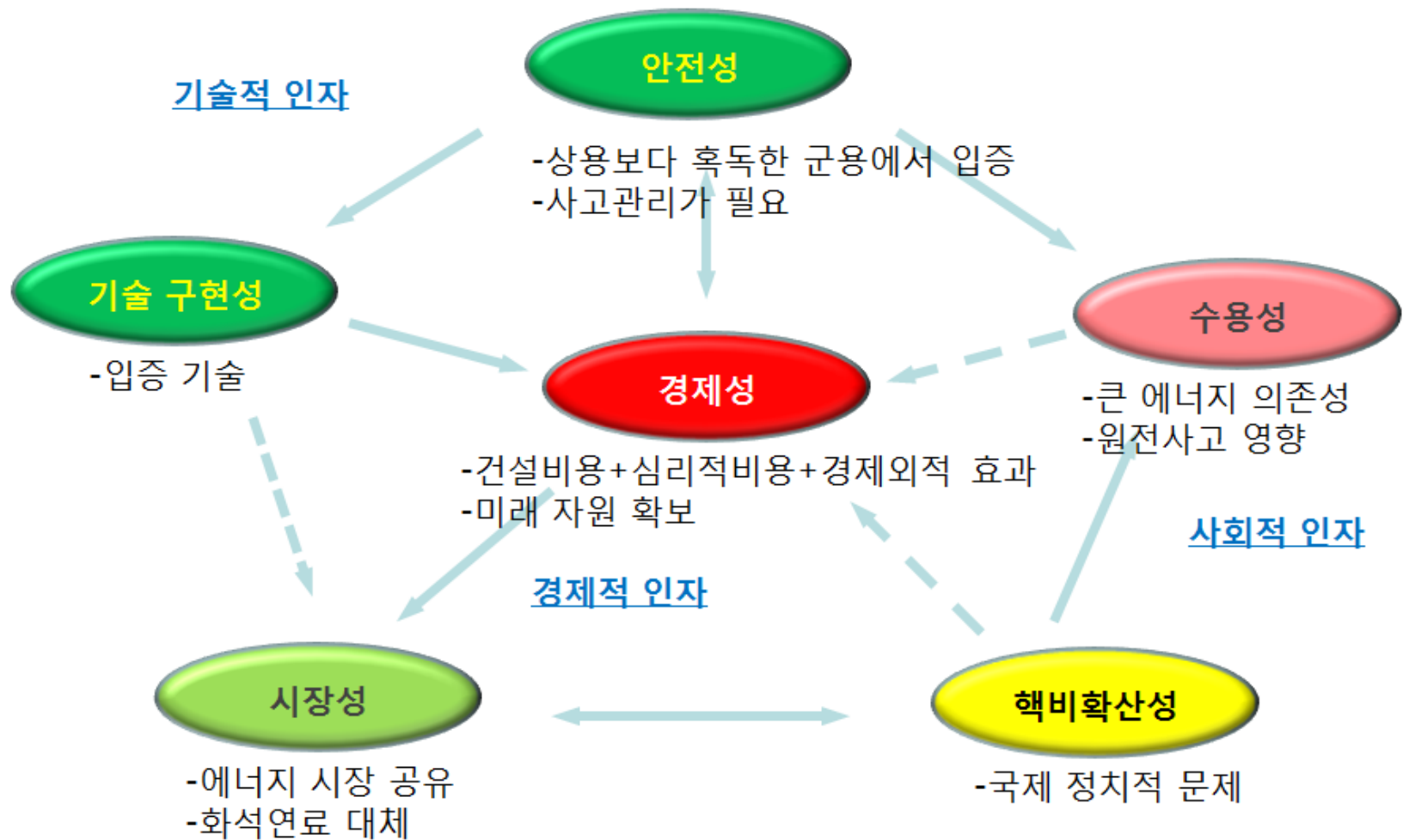
새로운 원자로 → 새로운 인허가

✓ 예) 러시아 ROSATOM 제시안



<ROSATOM, 2019>

새로운 시장 창출 위해 풀어야할 숙제들



<한국형 해양원자력시스템 개발 방향, 한국원자력학회 해양원전특별위원회, 2013>

감사합니다.

한전기술

