

2025.10.28

오션테크 코리아 컨퍼런스



# 심해 해양자원 개발 기술 메탈 컴퍼니와 임파서블 메탈의 꿈

발표자 : 조수길

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소



# 발표 목차

I. 심해 해양자원 개요 및 필요성

II. 심해 해양자원별 특징 분석

III. 심해 해양자원 개발 동향

IV. 향후 과제 및 대응방안

# #1

심해 해양자원 개요 및 필요성  
심해 해양자원별 특징 분석  
심해 해양자원 개발 동향  
향후 과제 및 대응방안

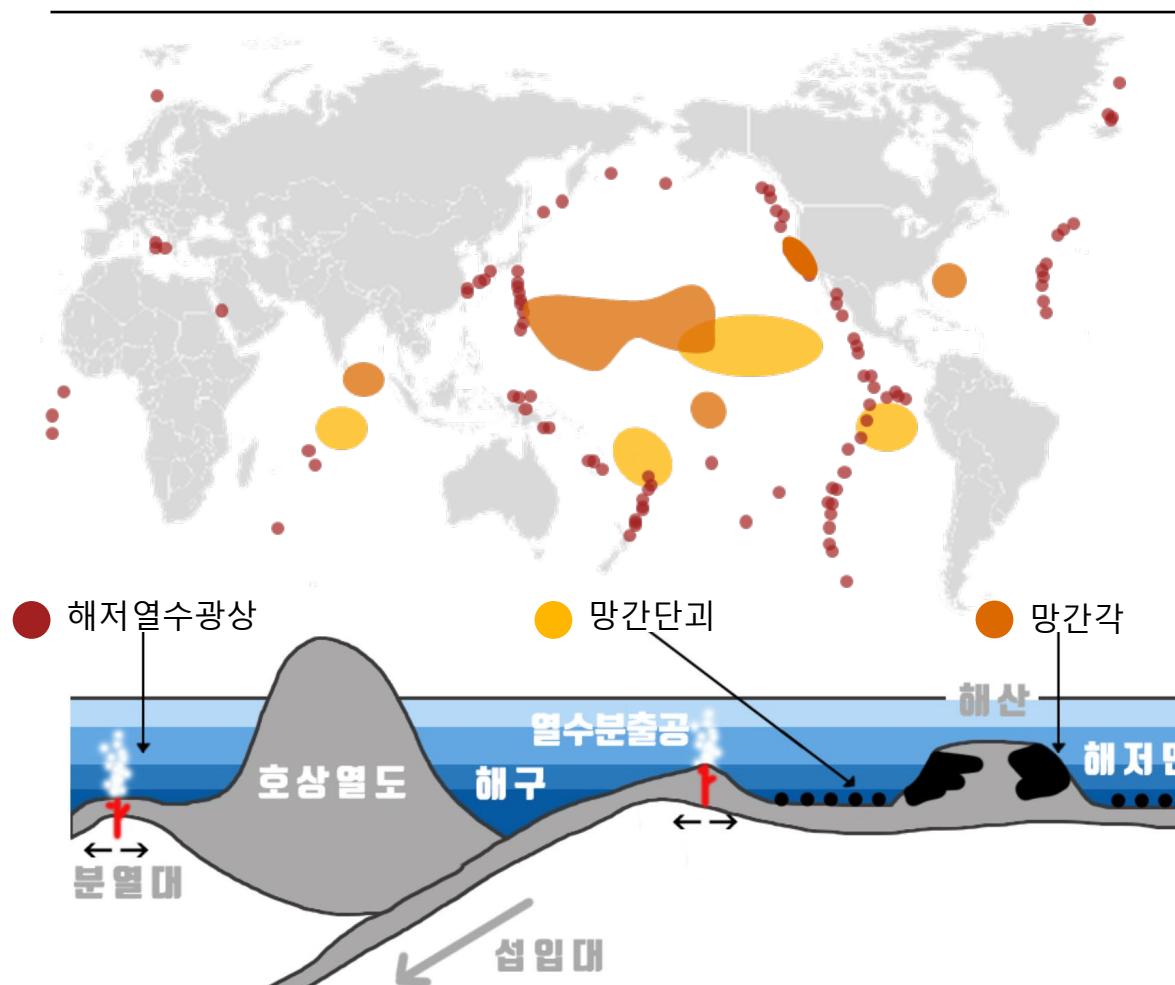
# 심해 해양자원 개요

정의 : 바다 깊은 곳에서 형성된 다금속 광물자원

종류 : 망간단괴, 해저 열수광상, 망간각

특징 : 에너지 전환 시대의 핵심 원료로 주목, 육상 광물 품위 저화와 환경 규제에 따른 대체 자원으로 급부상

## 심해저 광물자원 부존 현황



망간단괴

- **개요:** 깊은 해저면의 퇴적물 표층에 형성된 검은 감자 형태의 다금속 광물
- **주요 부존지역:** 북동태평양 C-C<sup>1)</sup> 해역, 인도양, 쿠아일랜드, 페루분지 (수심 4,000 ~ 6,000m)



해저열수  
광상

- **개요:** 마그마에 의해 해저지각 내 형성된 열수가 상승하면서 함유하고 있던 유용금속이 침전하여 생성
- **주요 부존지역:** 중앙해령 및 호상열도 주변(수심 300 ~ 3,700m)



망간각

- **개요:** 해수에 함유된 금속이 해저산 사면에 흡착되어 형성되는 광물자원
- **주요 부존지역:** 서태평양, 해저산 분포지역(수심 800 ~ 2,500m)

1) C-C(Clarion – Clipperton): 북태평양에 위치한 지역  
Source: 해저 광물자원(2013), 남서태평양 및 인도양 해양광물자원 개발(2022년도 보고서)

# 주요 금속의 수요 증가 전망

범지구적 움직임인 “2050년 Net-zero 달성” 의 핵심 영역 RE100 및 친환경 운송 달성을 위해  
망간, 니켈, 구리, 코발트, 리튬 등의 금속 수요가 급증할 것으로 전망됨



## 주요 영역

**RE 100<sup>1)</sup>**  
(Renewable Energy)

친환경 운송

순환 경제  
(Circular Economy)

Sustainable  
Value-Chain

Sustainable  
SME Partnership

## 주요 현황

탄소배출량 감축 목표 차질<sup>2)</sup>  
(실제: -1.6%, vs 목표 : -11.3%)

에너지 산업의 탄소배출량은  
전체 배출량의 41%<sup>3)</sup>

Automotive 탄소배출량은  
전체 배출량의 9%

Net-zero를 위한  
글로벌 규제/정책 강화 중

21.5 기준 MS, 애플, 구글 등  
30개 기업이 RE100 달성

## RE100 및 친환경 운송 관련 주요 산업

### 태양광 에너지

**추진 사례**  
[독일] 2020년 상반기, 대규모  
태양광발전소 신규 설치 용량이  
전년 동기 대비 2배

**필요 금속**  
구리, 리튬,  
코발트 등  
8개

### 풍력 에너지

**추진 사례**  
[EU] 2050년까지 전체  
전력공급 중 해상풍력발전의  
비중을 30%로 높일 예정

**필요 금속**  
망간, 니켈,  
구리 등  
10개

### EV (배터리)

**추진 사례**  
[Mercedes Benz] ‘39년까지  
모든 신차를 전기 및  
하이브리드로 생산 예정

**필요 금속**  
니켈, 구리,  
코발트, 리튬  
등 11개

친환경 에너지에 대한 수요 증가에 따라,  
관련 금속(망간, 니켈, 구리, 코발트)의 수요 또한 증가할 것으로 전망

1) 사용 전력의 100%를 재생 에너지로 생산  
Source: World Bank, KOTRA

2) Low Carbon Economy Index 2019(PwC)

3) Minerals for Climate Action 2020(World Bank)

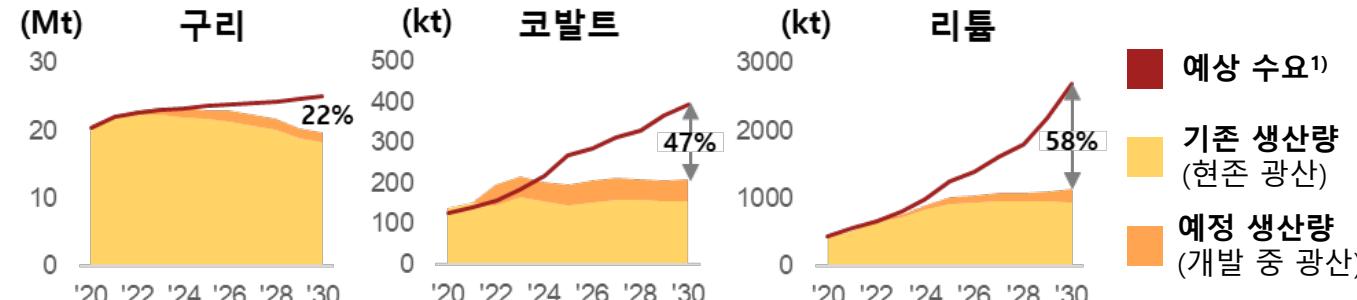
# 주요 금속에 대한 생산량 한계

기존 육상 생산량으로 수요를 충족하기 어려울 전망  
→ 재활용 및 심해 해양자원 개발과 같이 적극적이고 다양한 해결 방안이 필요한 상황임

## 에너지원별 주요 금속 수요

	태양광	풍력	EV 배터리	원자력	수소
구리	고	고	고	중	저
코발트	저	저	고	저	저
리튬	저	저	고	저	저

## 주요 금속의 연도별 공급 부족량



### 공급 부족 해결 방안

#### 1 육상광산 생산량 증대

##### 육상 금속의 높은 지리적 편중도

코발트, 희토류, 리튬 등 핵심 금속 생산량 일부 국가에 편중  
공급 불안 리스크

##### 낮아지는 품위<sup>2)</sup>

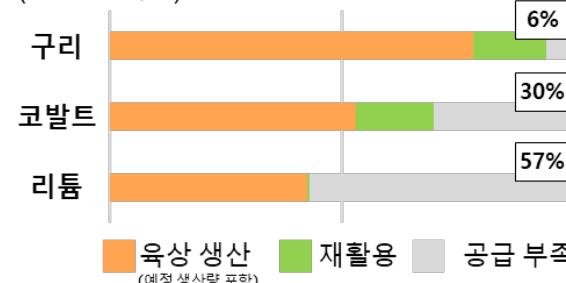
칠레산 구리 광석의 평균 품위 15년간 30% 감소('05년 0.9% → '19년 0.7%)

경제성 하락 및 환경파괴 심화

#### 생산량 증대 한계

#### 2 재활용

(2030년 기준)



\* World Bank(2020) 금속별 예상 재활용률 사용

#### 여전히 공급 부족

#### 3 심해 해양자원 개발(제2의 공급원)

##### 금속량 비교

(Mt)	육상광산	심해 <sup>3)</sup>	비율
구리	690	233	34%
코발트	7.5	94	1,253%
리튬	13	2.8	22%

공급 부족 해결을 위해,  
여러 국가 및 민간기업이 심해저  
개발에 참여하는 추세

1) 파리 기후협정 목표 달성을 위한 시나리오

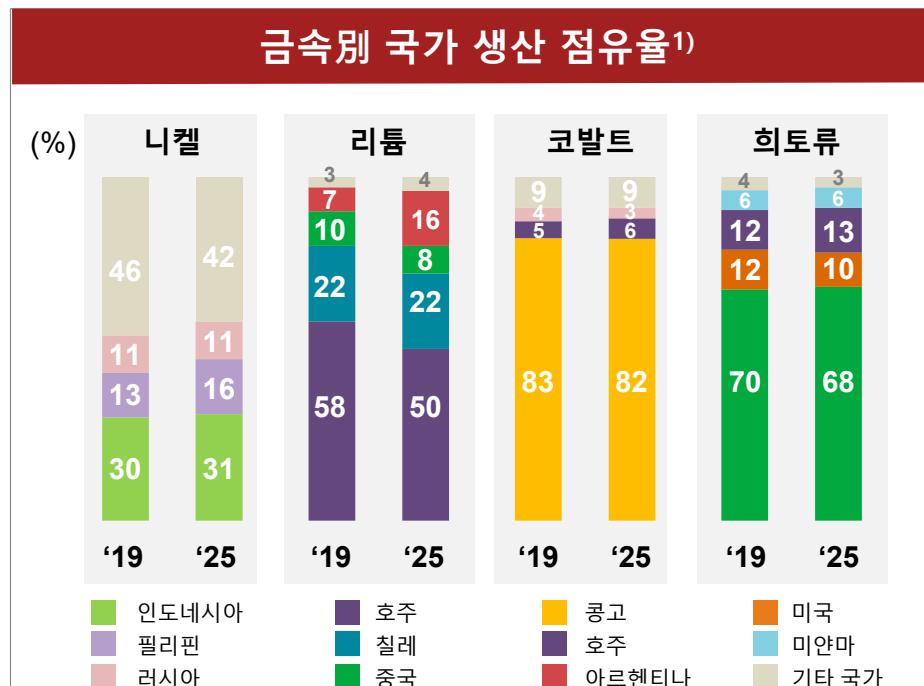
Source: IEA 보고서(2021), Kaderavek, BREE, DeepGreen 백서, The Metals Company 투자 자료, World Ocean Review 3(2014)

2) 선광(Concentrate) 방식과 퇴적침출(Heap leaching) 방식의 평균

3) CCZ의 망간단괴 + PCZ의 망간각(2014년 기준)

# 주요 금속에 대한 생산량 한계(공급 불안정성)

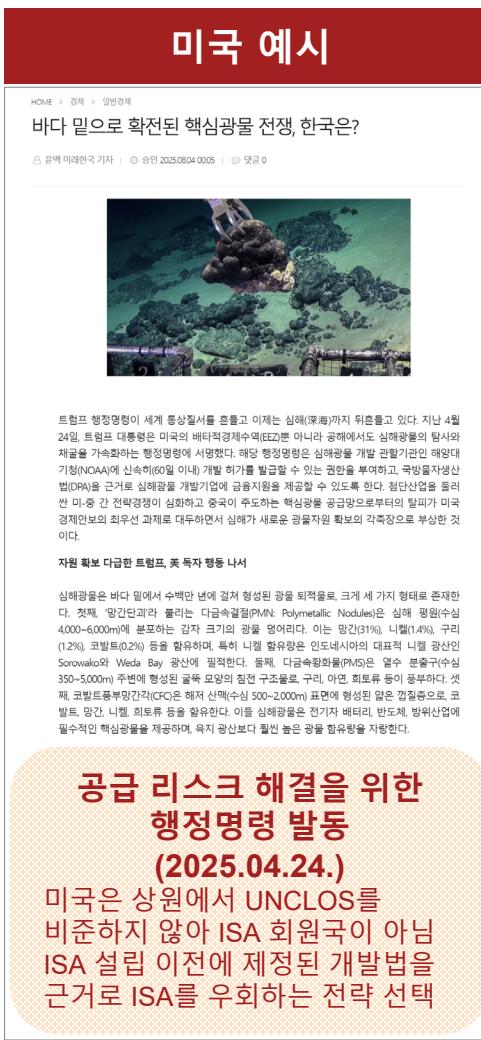
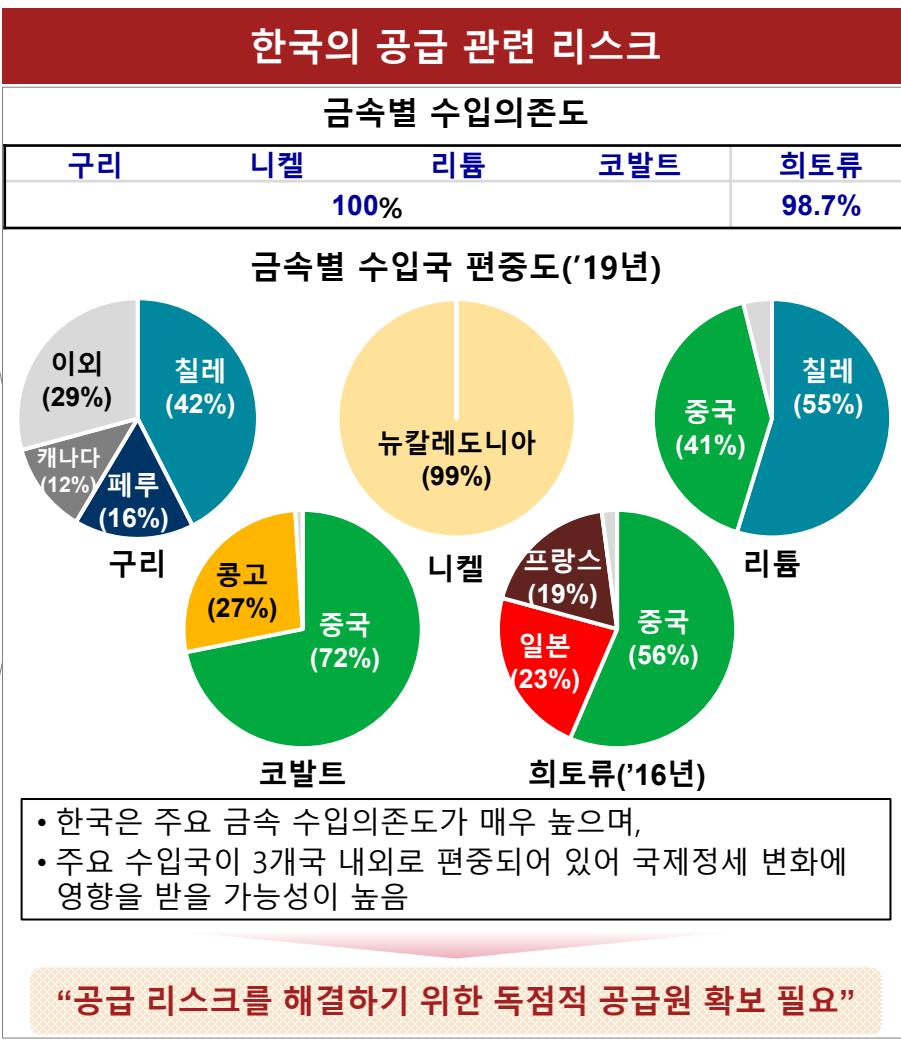
현재 주요 금속의 생산이 일부 국가 편중  
→ 수입의존도가 높은 한국에 특별히 위협적인 요소로 판단됨



- 중국은 희토류 수출을 외교적 협상 카드로 사용(2010.11)
- 콩고의 정치 불안 및 세금 부과에 따른 코발트 가격 상승(2018.2)
- 인도네시아의 니켈 광석 수출 제한 조치(2019.10)
- 미얀마 군부 사태에 따른 불안심리로 희토류 가격 상승(2021.03)

일부 국가의 정치적 불안, 지정학적 위험,  
수출 제한에 따른 공급 제한에 취약함

1) IEA는 생산의 지리적 편중도가 단기간에 바뀌지 않을 것이라고 예측  
Source: IEA 보고서(2021), 미래한국 2025-10-13 기사

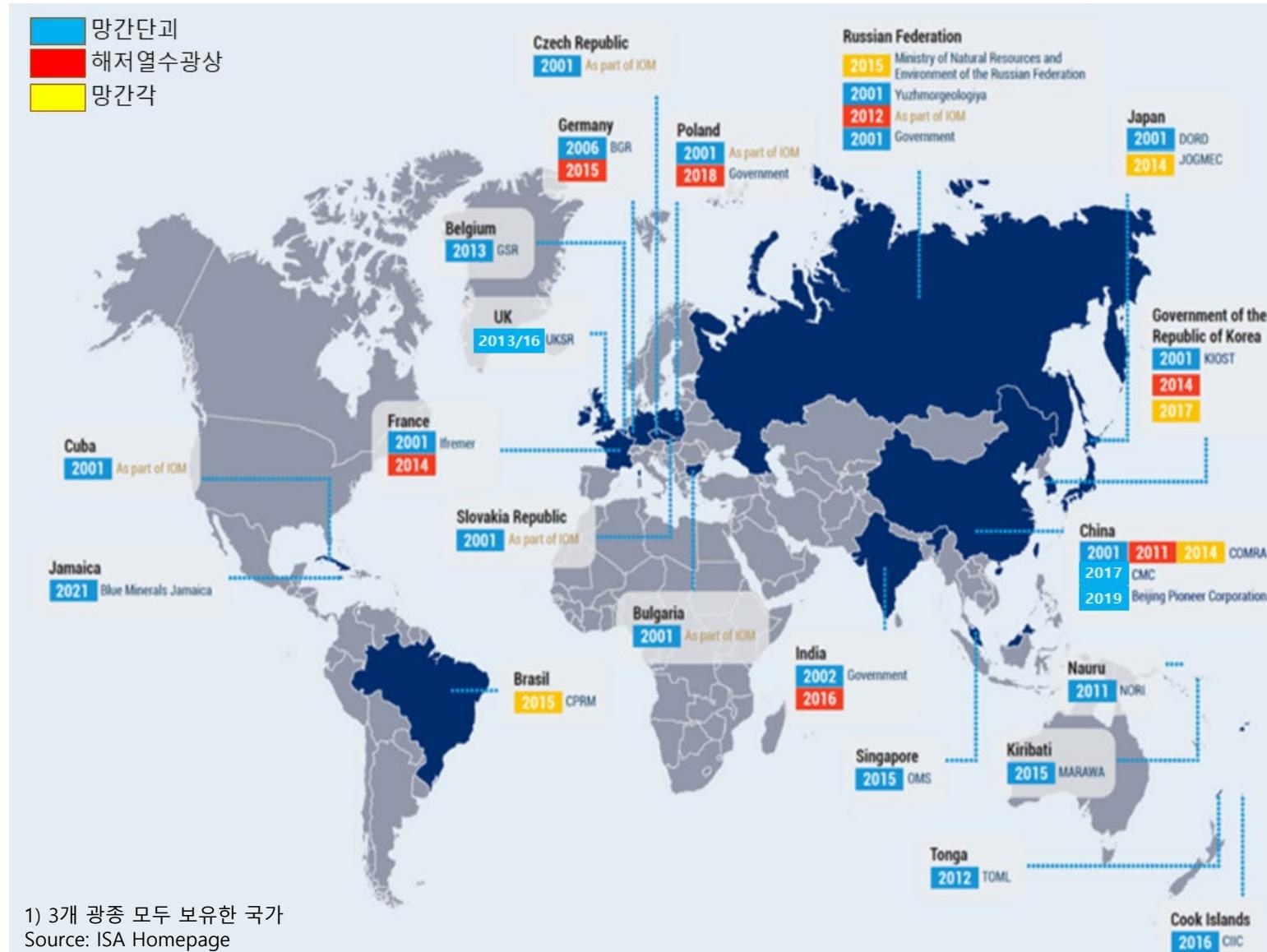


# #2

심해 해양자원 개요 및 필요성  
심해 해양자원별 특징 분석  
심해 해양자원 개발 동향  
향후 과제 및 대응방안

# 광구 및 개발권 현황 분석(공해상 광구)

총 22개의 국가 및 업체가 모두 31개의 광구에 대해 ISA와 탐사계약 체결



## 탐사계약 체결 현황

총 31개 탐사계약 체결

- 망간단괴(19개)
- 해저열수광상(7개)
- 망간각(5개)

## 국가(보유 광구개수)

중국 <sup>1)</sup> (5)	러시아 <sup>1)</sup> (3)
한국 <sup>1)</sup> (3)	일본(2)
독일(2)	프랑스(2)
폴란드(1)	인도(2)
벨기에(1)	영국(2)
나우루(1)	키리바티(1)
통가(1)	쿡아일랜드(1)
싱가포르(1)	브라질(1)
IOM(1)	자메이카(1)

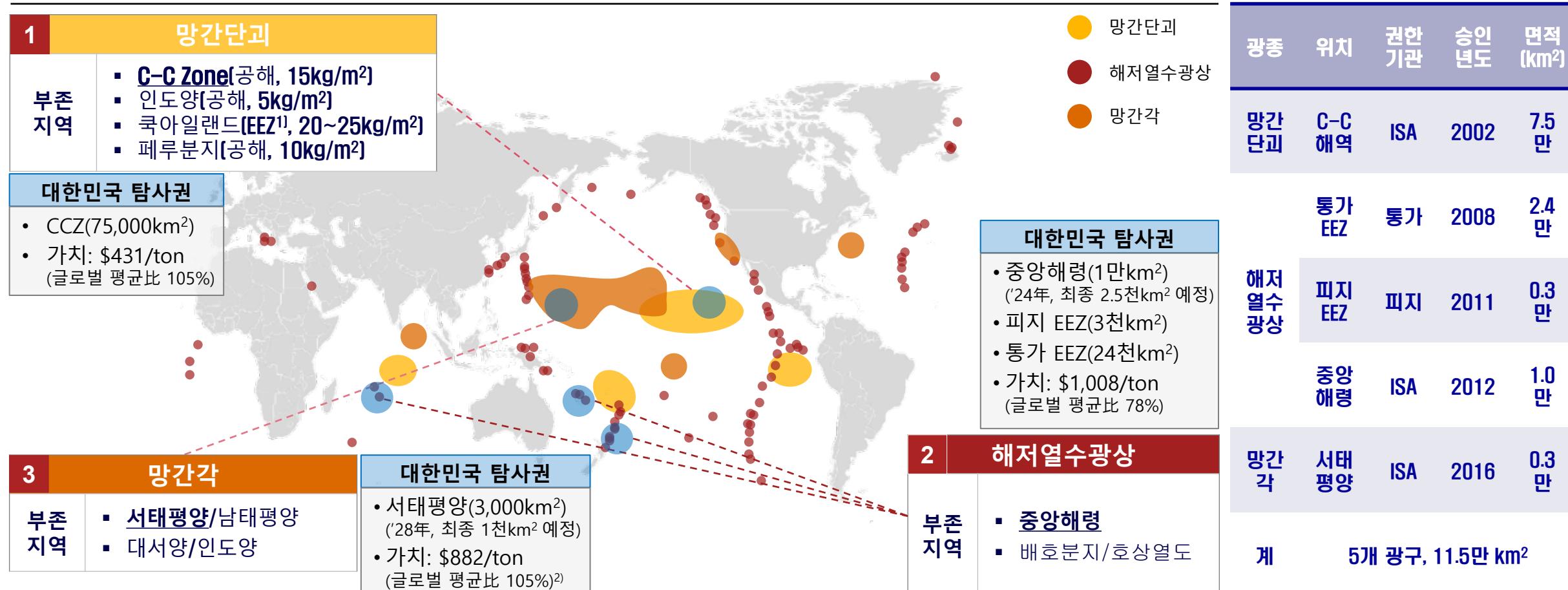
※ 탐사권 5개 추가('17.01~'21.04)

- 한국: 망간각 1개('18년)
- 중국: 망간단괴 2개('17, '19년)
- 자메이카: 망간단괴 1개('21년)
- 폴란드: 열수광상 1개('18년)

# 광구 및 개발권 현황 분석 (한국보유광구)

중국(2014), 러시아(2015)에 이어 한국도 3개 광종에 대한 배타적 독점탐사권 확보(2018)  
- 공해상 및 EEZ 포함 총 5개 독점탐사광구(11.5만km<sup>2</sup>)

## 심해저 광물자원 주요 부존지역

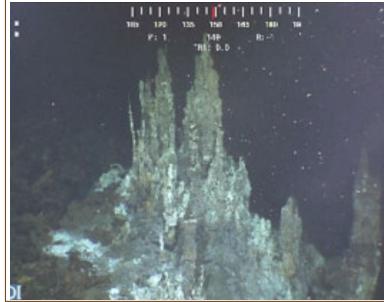


1) EEZ(Exclusive Economic Zone): 배타적 경제수역

2) 망간각 글로벌 가치 산정時 타 국가 부존지역內 희토류 품위는 정보를 찾을 수 없어, 비교를 위해 한국 광구의 품위 적용

Source: World Ocean Review(2014), 해저 광물자원(2013), The Indian Ocean Nodule Field(2007)

## 망간단괴, 해저 열수광상, 망간각은 형성 과정에 따라 화학적 성질, 함유금속, 개발환경이 상이함

형성 과정	형태	함유 금속	개발환경															
<b>망간단괴</b> (4~5천m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>바닷물에 녹아 있는 금속 성분이 해저면에 침전하여 생성</li> <li>1천년에 0.01~1mm 성장</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>산화물 광상(망간, 니켈, 구리, 코발트 함유)</li> <li>육상광상 대비 니켈/코발트 4배</li> </ul> <p>한국 광구(CCZ) 기준</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>망간 슬러그</th> <th>가치 비중*</th> <th>함유 비중</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>니켈</td> <td>41%</td> <td>1.06%</td> </tr> <tr> <td>구리</td> <td>16%</td> <td>0.9%</td> </tr> <tr> <td>코발트</td> <td>14%</td> <td>0.19%</td> </tr> </tbody> </table>	망간 슬러그	가치 비중*	함유 비중	니켈	41%	1.06%	구리	16%	0.9%	코발트	14%	0.19%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gel 형태 지반층에 단괴 부존(환경파괴)</li> <li>탐사 범위가 넓음</li> <li>별도의 굴착, 선광 작업 불필요</li> <li>수천m의 육상 양광이 기술적 난제임</li> </ul>			
망간 슬러그	가치 비중*	함유 비중																
니켈	41%	1.06%																
구리	16%	0.9%																
코발트	14%	0.19%																
<b>해저 열수광상</b> (0.3~3.7천m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>마그마에 의해 해저지각 내 형성된 열수가 상승하면서 함유하고 있던 유용금속이 침전하여 생성</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>황화물 광상 (아연, 구리 함유)</li> <li>금/은 함량이 높아, 경제적 가치가 우수함</li> </ul> <p>한국 광구(통가EEZ) 기준</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>아연</th> <th>가치 비중*</th> <th>함유 비중</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>구리</td> <td>35%</td> <td>4.52%</td> </tr> <tr> <td>은</td> <td>18%</td> <td>0.02044%</td> </tr> <tr> <td>금</td> <td>26%</td> <td>0.00042%</td> </tr> </tbody> </table>	아연	가치 비중*	함유 비중	구리	35%	4.52%	은	18%	0.02044%	금	26%	0.00042%	<ul style="list-style-type: none"> <li>언덕형태의 표층부와 지하로 연장된 하부 구조를 가지고 있음</li> <li>위치별 품위 변화로 시추로 자원량 평가</li> <li>드릴식 파쇄, 선광 기술 필요</li> </ul>			
아연	가치 비중*	함유 비중																
구리	35%	4.52%																
은	18%	0.02044%																
금	26%	0.00042%																
<b>망간각</b> (0.8~2.5천m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>해수에 함유된 금속이 해저산 사면에 흡착되어 형성되는 광물</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>산화물 광상(망간, 코발트, 니켈, 구리 함유)</li> <li>육상 광상 대비 백금 비율 100배</li> </ul> <p>한국 광구(서태평양) 기준</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>망간 슬러그</th> <th>가치 비중*</th> <th>함유 비중</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>코발트</td> <td>17%</td> <td>0.5%</td> </tr> <tr> <td>니켈</td> <td>9%</td> <td>0.5%</td> </tr> <tr> <td>희토류</td> <td>61%</td> <td>0.2%</td> </tr> <tr> <td>구리</td> <td>1%</td> <td>0.12%</td> </tr> </tbody> </table>	망간 슬러그	가치 비중*	함유 비중	코발트	17%	0.5%	니켈	9%	0.5%	희토류	61%	0.2%	구리	1%	0.12%	<ul style="list-style-type: none"> <li>두께와 지형이 불규칙적임</li> <li>굴착 방식으로 자원량 평가, 채광 필요</li> <li>망간각이 아스팔트처럼 맥석에 붙어있어 맥석 분리를 위한 선광 기술 필요</li> </ul>
망간 슬러그	가치 비중*	함유 비중																
코발트	17%	0.5%																
니켈	9%	0.5%																
희토류	61%	0.2%																
구리	1%	0.12%																

Source: 국제해저기구 의무이행 및 심해저 개발역량 확충 연구(2022년도 보고서), 남서태평양 및 인도양 해양광물자원 개발(2022년도 보고서)

# #3

심해 해양자원 개요 및 필요성  
심해 해양자원별 특징 분석  
심해 해양자원 개발 동향  
향후 과제 및 대응방안

금속 가격 상승으로 심해 해양자원 가치 상승 (10년간 평균 245% 상승)  
 → 2016년 망간단괴 \$316, 해저열수광상 \$739, 망간각 \$694 추정

## 심해 해양자원 별 가치 비교

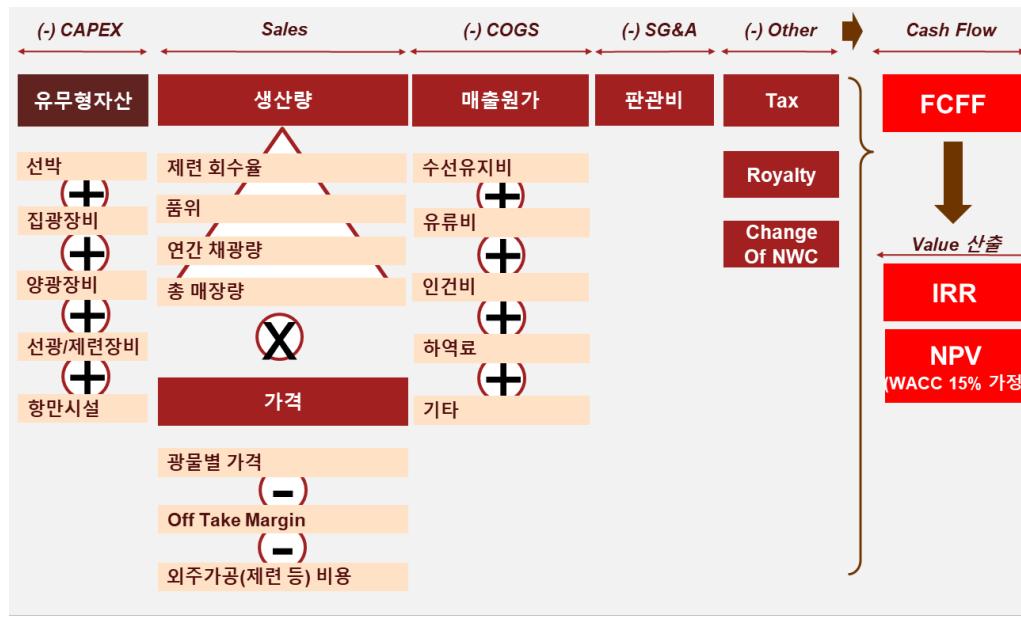
망간단괴				해저열수광상				망간각				
금속	한국 광구		글로벌 평균	금속	한국 광구		글로벌 평균	금속	한국 광구		글로벌 평균	
	합량비 (%)	가치 (\$/ton)	합량비 (%)	가치 (\$/ton)		합량비 (%)	가치 (\$/ton)		합량비 (%)	가치 (\$/ton)	합량비 (%)	가치 (\$/ton)
망간 슬러그	58.75	663.9	55.4	626.0	금	6.7 (g/ton)	553	5.0 (g/ton)	412.7	망간 슬러그	47.7	539.0
니켈	1.06	167.1	1.02	160.8	은	254 (g/ton)	243.8	264 (g/ton)	253.4	코발트	0.50	375.5
구리	0.90	87.9	0.74	72.3	아연	8.92	240.8	12.8	345.6	니켈	0.50	78.8
코발트	0.19	142.7	0.20	150.2	구리	4.84	472.8	5.2	507.9	구리	0.12	11.7
<b>TOTAL</b>	60.9	\$1,062	57.36	\$1,009	<b>TOTAL</b>	13.7	\$1,511	18.0	\$1,520	희토류	0.2	531.1
										백금	0.48 (g/ton)	29.1
											0.43 (g/ton)	26.1
										<b>TOTAL</b>	49.09	\$1,565
											41.85	\$1,459

1) 금속 가격은 '25년 7월 시장 거래 가격 적용'

Source: 해양수산부, World Ocean Review(2014), 한국자원정보서비스, Investing.com

# 심해 해양자원 개발 사업의 경제성 분석

' 21년 경제성 평가 자료에 따르면, ' 17년 대비 금속 가격 상승으로 Payback period가 단축됨 (경제성 확보)



## 망간단괴

(연간 500만톤)

Payback period  
11년

IRR 9.8%

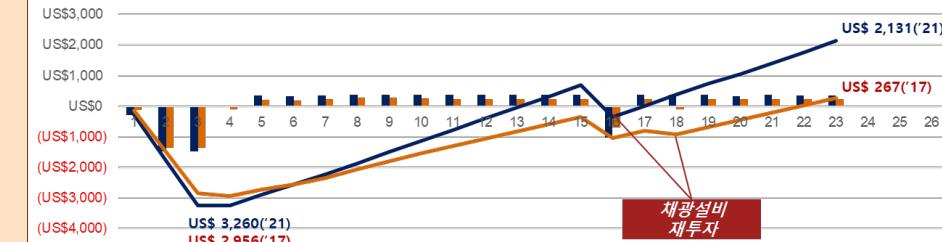
## 해저열수광상

(연간 37.5만톤)

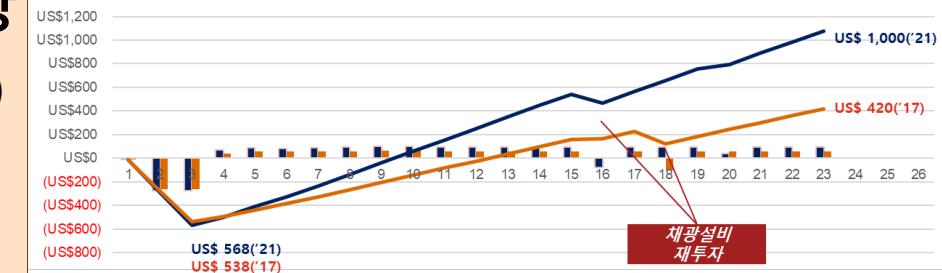
Payback period  
10년

IRR 11.9%

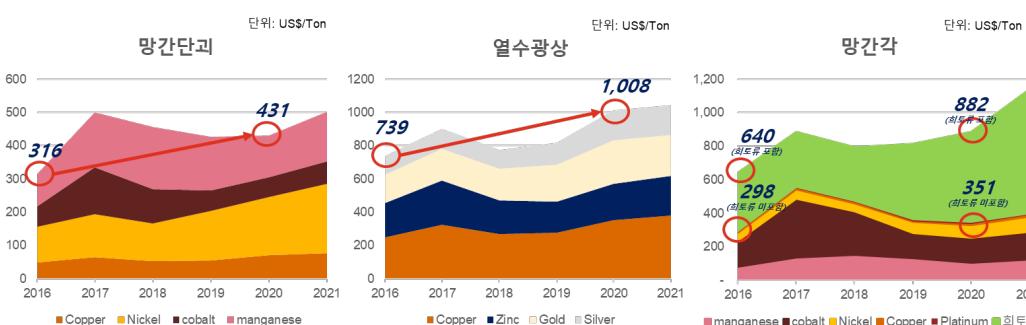
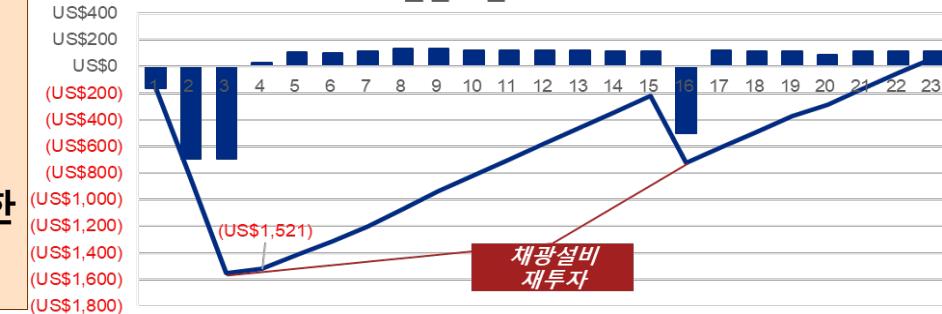
## 현금흐름 SCHEDULE



## 현금흐름 SCHEDULE



## 현금흐름 Schedule



## 망간각

(연간 100만톤)

희토류 추출에 대한  
경제성 확보 필요

**환경단체 및 광구보유 국가 : 개발을 위해 충분한 환경 연구가 선행되어야 함을 주장**

**개발업체 : 심해저 광물 개발의 지속 가능성을 확보하기 위해 노력하는 중**

해양 생태계 보존(심해저 개발 반대)	탄소 저감, 지속가능한 개발(심해저 개발 찬성)
<b>2013.07</b> • 그린피스, WWF <sup>1)</sup> : 개발활동 일시 혹은 영구중단 주장	<b>2016.02 ~ 2020.07</b> • EU: Blue Nodule project를 통해 망간단괴 개발시 환경 영향을 최소화를 위한 TRL 6 수준 기술 확보
<b>2019.09</b> • 피지 총리: PIF <sup>2)</sup> 에서 심도깊은 환경 영향 평가가 나올 때까지 일시적으로 심해저 광물 개발 중단 촉구	<b>2019.04 ~ 2022.04</b> • EU: Blue Harvesting project 를 통해 망간단괴 개발시 환경 영향을 최소화를 위한 TRL 7 수준 기술 연구
<b>2021.02</b> • 호주 정부: 자국 북부 연안에서의 심해저 광물 개발 금지 선언	<b>2020.10</b> • 쿠아일랜드: 탄소저감을 위해 필수적인 금속들의 공급을 위해 자국의 망간단괴를 개발해야 한다고 주장
<b>2021.03</b> • WWF: DSM <sup>3)</sup> 글로벌 모라토리엄 이니셔티브에서 '심해저 개발의 위험성을 파악하고, 대안이 없는 상황에서만 고려해야 한다'고 주장	<b>2021.01</b> • GSR: 환경 및 사회적인 관점에서 심해저 광물 개발이 육상 광물 개발보다 이점이 많다고 과학적으로 증명할 수 있도록 노력할 것
<b>2021.03</b> • 삼성SDI, 볼보, BMW, 구글은 심해저 광물 채굴이 환경에 유해하지 않는 근거가 나올 때까지, 1) 한시적으로 심해에서 채굴한 광물을 사용하지 않고 2) 채굴에 필요한 자금을 지원하지 않겠다고 WWF 지지	<b>2021.03</b> • DeepGreen: 생태계 보존에 대해 동의하지만, 심해저 개발은 육상보다 탄소 및 유해물질이 덜 발생하여 보다 지속가능한 방식이라고 주장
<b>2024.08</b> • 암흑산소 존재 발견: 심해 망간단괴가 바닷물을 전기분해하여 산소를 생성하는 것을 주장, 생명 기원에 대한 연구를 위해 개발 불가 주장	<b>2024.06</b> • Impossible metals: 부유식 선택 채집 방식으로 환경 피해를 최소화하여 개발하는 방식을 ISA에서 발표
<b>2024.12</b> • 노르웨이 정부: 환경단체와 야당 반대로 자국 광구 채굴 계획 보류	

1) World Wide Fund for Nature(세계자연기금): 세계 최대 환경단체, 2) Pacific Island Forum(태평양도서국 포럼), 3) Deep seabed mining

Source: GSR, Reuters, PwC Research, Impossible metals, BRIC, NOD

# 심해 해양자원 개발 국가별 동향

국가	주도 기관	협력 기업 [국가주도]	집중 광물	최근 동향	상업화 계획
일본	JOGMEC <sup>1)</sup> (공)	-	망간단괴 열수광상 망간각	자국 EEZ 내 모든 종류 광종 보유 세계 최초 성능 시험 성공 [열수광상, 17년], [망간각, 20년]	열수광상(27년) 및 망간각(28년)을 우선적 개발 계획
미국	Impossible metals (민)	-	망간단괴	개발권 신청 [미국 EEZ, 25년], [바레인 CCZ 광구, 25년]	26년 상용화 계획 발표 금속 재활용 전문기업 Aqua metals와 제련분야 협력
캐나다 미국	TMC <sup>2)</sup> (민)	-	망간단괴	CCZ 망간단괴 탐사권 3광구 보유 성능 시험 성공 [1/5규모, 22년] 개발권 신청 [CCZ 광구, 21년], [미국 EEZ, 25년]	27년 상반기 상업화 목표(2억 달러 투자 유치) 활발한 개발권 확보 노력(ISA 및 미국 채굴허가 신청) 채광선박분야 Allseas, 제련분야 고려아연과 협력
쿡 아일랜드	SMA <sup>3)</sup> (국)	CIIC <sup>7)</sup> (공)	망간단괴 (EEZ)	국내 개발법 제정 [19년] → CIIC 설립 [20년]	해외 기업에 의존한 상업화 추진(개발 자금/기술 부족)
		CIICSR <sup>8)</sup> (공+민)	망간단괴 (공해)	GSR과 합작회사 설립(CIICSR)	ISA 개발 신청서 제출 25년 채굴 개시 목표(ISA 개발 규정 연기로 지연)
독일	BGR <sup>4)</sup> (국)	GSR <sup>9)</sup> (DEME <sup>10)</sup>	망간단괴 열수광상	GSR의 채광 테스트 참관(환경영향평가, 경제성평가 위주)	구체적인 상업화 계획 미비
노르웨이	NOD <sup>5)</sup> (국)	Green minerals	열수광상 망간각	자국 EEZ 광구 보유 국내 개발법 제정 [19년] → 개발권 부여 보류 [24년]	29년 개발 계획(개발권 보류 상업화 계획 연기)
중국	COMRA <sup>6)</sup> (공)	-	망간단괴 열수광상 망간각	성능 시험 성공 [수심 500m, 18년] 제련 기술을 포함하여 R&D 투자 확대	COMRA 보유 광구 정밀 탐사를 통한 시장성 조사 구체적인 상업화 계획 미 제시

1) JOGMEC(Japan Oil, Gas, and Metals National Corporation), 2) TMC(The Metals Company), 3) SMA(Seabed Minerals Authority), 4) BGR(Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), 5) NOD(Norwegian Offshore Directorate), 6) COMRA(China Ocean Mineral Resources R&D Association), 7) CIIC(Cook Island Investment Cooperation), 8) CIICSR(Cook Island Investment Cooperation Sea Mineral Resources), 9) GSR(Global Sea Mineral Resources), 10) DEME(Dredging, Environmental and Marine Engineering NV)

## CCZ 실증 시험 수행 [집광 및 양광 시험]

- 상업화의 1/5 규모, 단괴 86ton/h 회수(연간 70만톤 규모)

## 상업화를 위한 활발한 움직임 [27년 상반기 상업화 목표]

- 탐사권(망간단괴) 3개 보유
- 개발권 선제적 신청(21년 ISA, 25년 미국 행정명령 발동 이후 NOAA 신청)
- 전략적 투자 진행(고려아연 8520만 달러, Allseas 1억1300만달러)



Pilot Collector System Trial

Source: The metals company 홈페이지, FKI 한국경제인협회 보고서, 백악관 홈페이지

FKI 한국경제인협회

Democrats Have Shut Down the Government 154 th 38m 38s  
PRESIDENT DONALD J. TRUMP The WHITE HOUSE  
UNLEASHING AMERICA'S OFFSHORE CRITICAL MINERALS AND RESOURCES  
Executive Orders | April 24, 2025

## 핵심광물 급罕 미국, 심해광물 개발 독자행보 나섰다

### 바다 밑으로 확전된 핵심광물 전쟁

트럼프 행정명령이 세계 통상질서를 흔들고 이제는 심해(深海)까지 뒤흔들고 있다. 지난 4월 24일, 트럼프 대통령은 미국의 배타적경제수역(EEZ: Exclusive Economic Zone)뿐 아니라 공해(국제수역, international waters)에서도 심해광물의 탐사와 채굴을 가속화하는 행정명령("Unleashing America's Offshore Critical Minerals and Resources")에 서명했다.

해당 행정명령은 심해광물 개발 관할기관인 해양대기청(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에 신속히(60일 이내) 개발 허가를 발급할 수 있는 권한을 부여하고, 국방물자생산법(DPA: Defense Production Act)을 근거로 심해광물을 개발기업에 금융지원을 제공할 수 있도록 한다. 첨단산업을 둘러싼 미-중 간 전략경쟁이 심화하고 중국이 주도하는 핵심광물 공급망으로부터의 탈피가 미국 경제안보의 최우선 과제로 대두하면서 심해가 새로운 광물자원 확보의 각축장으로 부상한 것이다.

the metals company

Facts Nodules Products Company Investors News

## TMC Welcomes U.S. Executive Order to Expedite Permitting and Evaluate Offtake of Critical Minerals from Nodules in the High Seas

by The Metals Company | April 2025

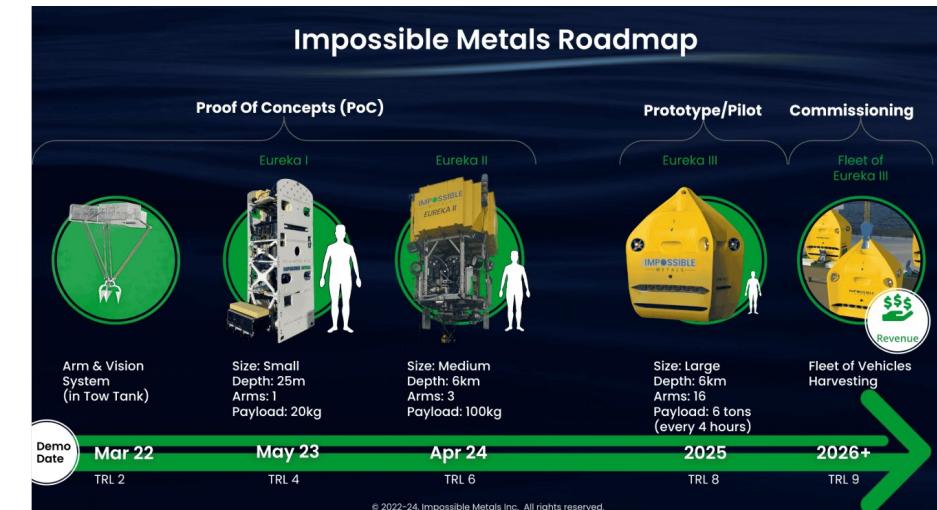
# 망간단괴 채광 핵심 기업(Impossible metals)

Concept : 기술 개발로 환경 훼손을 최소화한다.

- 부유식 채광(해저면 훼손 방지)
- 델타 로봇(해양 생물 보호)
- 버켓 방식 양광(해수 오염 최소화)

상업화 용량 검토 필요

- Eureka III의 군집 개념(1기당 용량 6ton/4h)
- 5,000m 투입/회수에 소요되는 시간 약 42h[Eureka II 기준]
- 즉, 1기당 6ton/2day(1,000ton/y) → 3,000대의 운용 필요



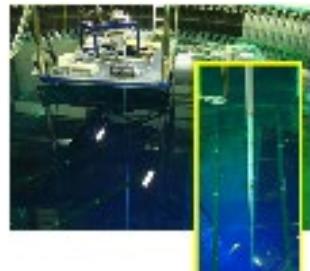
## 해저열수광상 채굴 시험('17년)

### 집광 로봇 개발



- 미즈이미이케제작소(2012년 모델 업그레이드)
- '17.08월 일본 EEZ 1,600m 수심에서 해저열수광상 연속 양광 채굴 성공
- 한 달간 16회 채굴, 총 16.4톤 채굴

### 실해역 시험



[수조 테스트]



[채굴 시험 개략도]

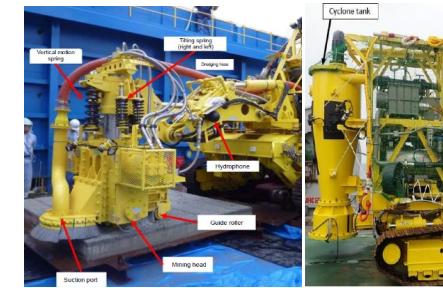
### 시험 성과

- 순환식 슬러리 이송시험 실증
- 개발한 Riser의 안전성 평가 실시 및 강도와 피로도 평가 수행
- 양광관 슬러리 이송 능력, 양광관의 동요 영향, 터보형 수중 펌프 능력, 양광관의 마모 정도 등을 검토

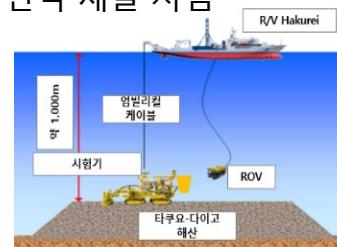
## 망간각 채굴 시험('20년)

### 집광 로봇 개발

- 해저열수광상 집광로봇 개조
  - 사이클론 탱크 설치, 준설 시스템 개조, 커터헤드 개조, 유압 시스템 개조 및 유지 보수



- '20.07월, 일본 내 EEZ 타쿠요-다이고 해산 해저 930m에서 세계 최초 망간각 채굴 시험



[채굴 시험 시스템]



[채굴 시험 모습]

### 시험 성과

#### 성능 검증

- 굴착 효율 및 경사면 등 다양한 해저 조건에서 주행/채굴 성능 확보

#### 샘플 취득

- 649kg의 망간각 샘플 채취
  - 추후 선광 및 제련 공정 시험에 사용 예정

#### 데이터 수집

- 채굴時 발생하는 환경 데이터 수집



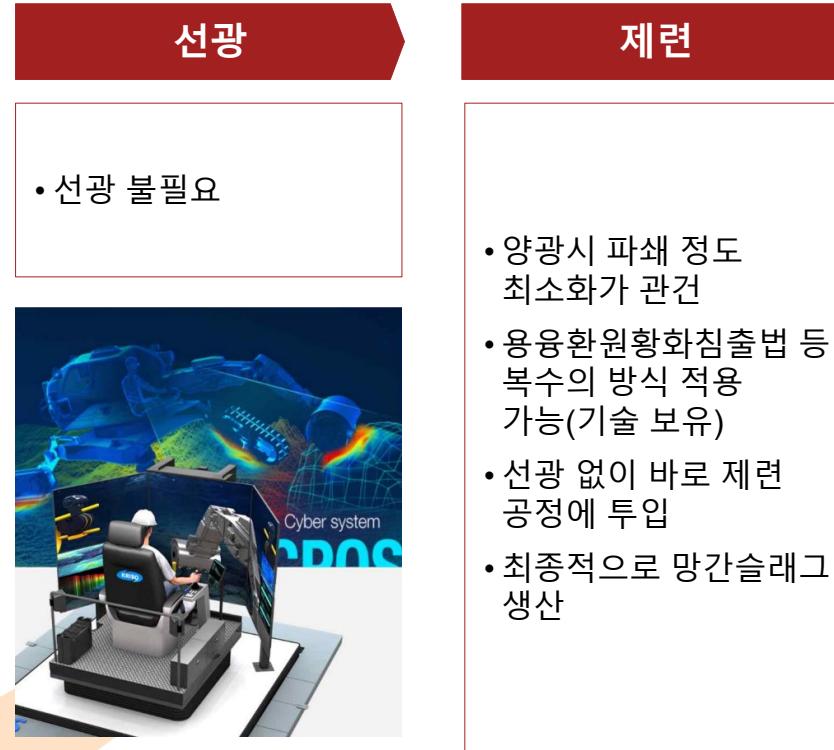
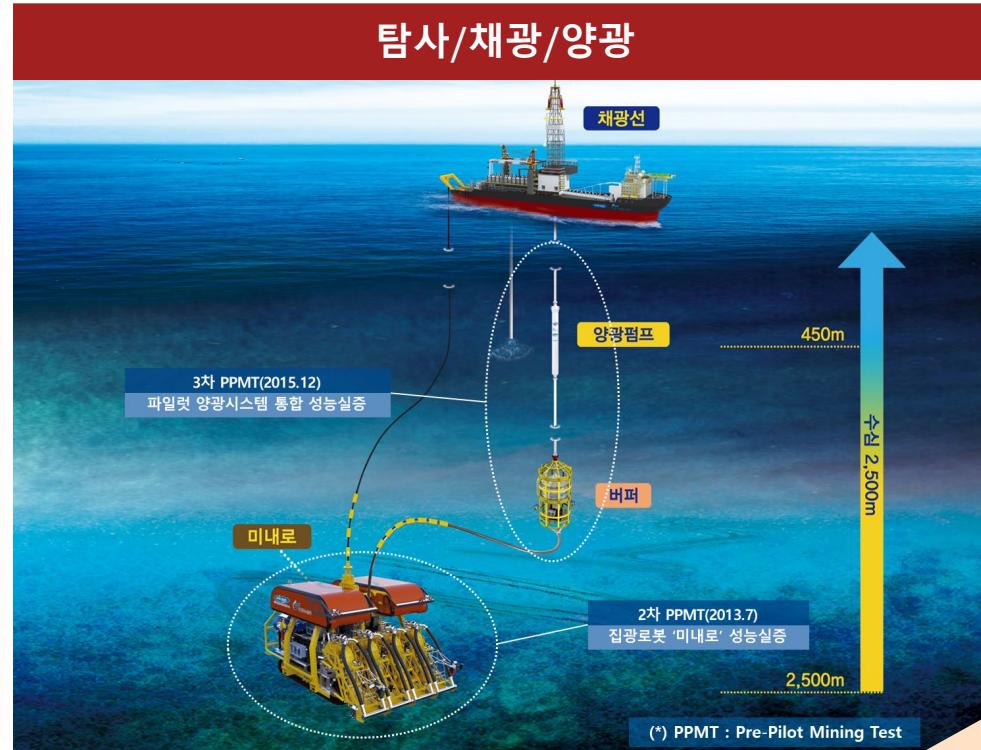
[망간각 샘플]

# 심해 해양자원 개발 기술 수준 (대한민국)

망간단괴  
(4~5천m)

해저  
열수광상  
(0.3~3.7천m)

망간각  
(0.8~2.5천m)



## 선광

- 선광 불필요

## 제련

- 양광시 파쇄 정도 최소화가 관건
- 용융환원황화침출법 등 복수의 방식 적용 가능(기술 보유)
- 선광 없이 바로 제련 공정에 투입
- 최종적으로 망간슬래그 생산

- 부유선광 개발 필요
  - 맥석과 유가금속 간의 분리 가능(유가금속 간 분리 불가능)

- 기존 육상 제련 방식 적용 가능 (황화광)

- 수중선광(기술개발未추진)  
※ 중국/일본은 선광을 위한 공정 기술 개발 중

- 경제성 확보를 위하여 선광 필요
- 최종적으로 망간슬래그 생산

- '12년 시스템 기본 설계를 통한 AIP 획득
- 망간단괴 연구의 개발 시스템(버퍼/양광펌프) 직접 사용 가능
- ROV의 Tele-operating 요소 기술 확보

- 망간각 분포 특성에 최적화된 탐사 기술 개발 필요
- ROV의 Tele-operating 요소 기술 확보
- 상업화 기술개발 미추진

# 국내 망간단괴 연구 수준 (채집성능)



[미내로 채집 성능 개념 영상]

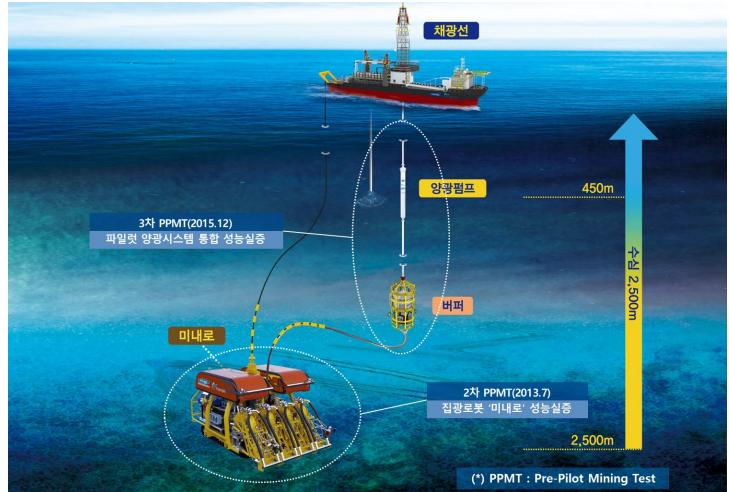
집광로봇 **미내로**의 실해역  
(심해 1,370m) 성능시험 성공  
(2013. 8. 1)

해저주행

심해항법/  
경로추종

모조단괴  
집광

# 국내 망간단괴 연구 수준 (양광성능)



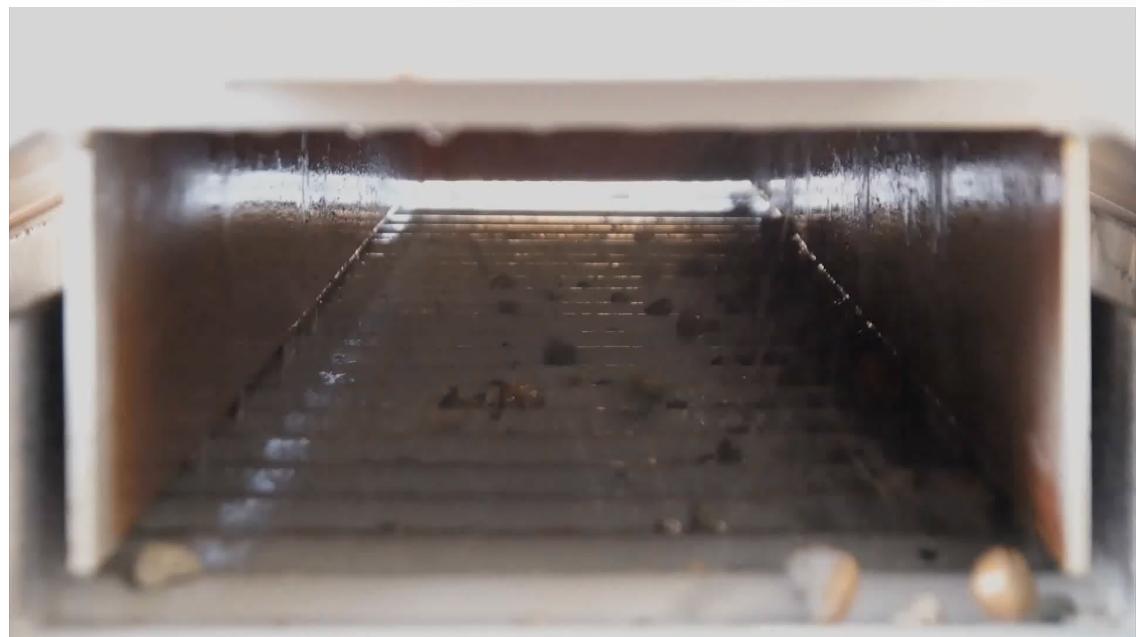
[채광/양광 실증시험 개념도]



[감압배관을 통한 2,500m 양광 성능 실증 시험 개념 및 실증 장비 제작 사진]



[버퍼/펌프 양광 실증 장비 설치 영상]



[모조단괴 회수 영상]

# #4

심해 해양자원 개요 및 필요성  
심해 해양자원별 특징 분석  
심해 해양자원 개발 동향  
향후 과제 및 대응방안



## ✓ 채광 기술의 정밀성

- 정밀 탐사 활동 수행
- 광종별 요소 기술 확보
- 실증/시뮬레이션을 통한 데이터 확보

## ✓ 선광/제련 기술 확보

- 경제성 확보를 위한 공정 효율화
- 건식/습식/희토류 제련 기술
- 국내 제련소 활용 방안



채광 관련 핵심 기술의 내재화  
및 후방 기술 확보 필요

## 정책



## ✓ 국제/국내 법제 대응력 제고

- ISA 채광 규정 확정을 보류 중
- 개발 신청에 대한 능동적 대응 필요
- 국내 법제 정비 필요

## ✓ 개발 전략 명확화

- 정부주도/민간협력/민간주도 방식
- 중공업의 인프라, 출연연의 기술력
- 범정부 민관 협력 구조 요구



법제도 대응력 제고 및  
자원 개발 로드맵 수립(민간 참여 촉진)

## 환경



## ✓ 환경 대응 기술

- 환경 이슈로 개발 연기 사례 존재
- 친환경 개발 슬로건 표명 필요
- 수익성 공존 가능 시스템 설계 필요

## ✓ 환경영향평가 및 환경관리계획

- 협력국과 환경영향평가 공동 수행
- ISA의 환경 계획에 대한 대응 필요



환경 보존과 수익성의 조화 검토  
및 환경 법률 제정을 위한 노력



경성해주셔서 감사합니다

## 자원 별 특징에 따라 탐사 난이도, 채굴 시 장비 형태, 선광/제련 설비 필요 여부가 결정됨

	탐사	채광	선광	제련
망간단괴 (4~5천m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>탐사 범위가 매우 넓음</li> <li>Sonar 및 Visual Mapping 탐사로 <u>별도 굴착 불필요</u></li> </ul> <p>분포도<sup>2)</sup>: 下 품위 균일도<sup>3)</sup>: 上</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>흡입식 집광</b> (집광時 별도 굴착 불필요)</li> <li>유압식 집광기 혹은 유압식&amp;기계식의 Hybrid Model이 적용됨</li> <li>'21.4월 GSR의 집광 성공</li> </ul> <p>채광 난이도: 下</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>별도의 선광 불필요</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>추가설비 필요</u> (건식, 습식 제련소)</li> </ul>
해저 열수광상 (0.3~3.7천m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>탐사의 범위는 좁음</li> <li>언덕형태의 표층부와 지하로 연장된 하부구조를 가진 광체의 품위 변화로 <u>시추로 자원량을 평가</u></li> </ul> <p>분포도: 上 품위 균일도: 下</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>드릴식 파쇄 &amp; 채광</b></li> <li>Rotating-Cutter ROV: JOGMEC, Nautilus 채용</li> <li>Drum-Cutter ROV: Nautilus 채용</li> <li><b>'17.9월 JOGMEC이 세계 최초로 채광 성공</b></li> </ul> <p>채광 난이도: 中</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>부유선광</b>, 혹은 자력선광 적용 가능 (선광時 회수율 52%<sup>3)</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>추가 설비 불필요</u> (육상과 유사하여 기존 설비 활용 可)</li> <li><b>'18년, 일본은 세계 최초로 채굴('17년)한 광물을 활용하여 아연 지금(地金) 제련 성공</b></li> </ul>
망간각 (0.8~2.5천m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>탐사의 범위는 좁음</li> <li>Visual mapping 방식 활용 불가하여 시료 확보를 위한 <u>별도의 굴착 필요</u></li> </ul> <p>분포도: 上 품위 균일도: 中</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>드릴식 굴착 &amp; 채광</b></li> <li>두께가 위치 별로 상이하고 지형이 매우 유통불통하여 <u>他 광물比 채굴 어려움</u></li> <li><b>'20.7월 JOGMEC 세계 최초 채광장비 성능시험 성공</b></li> </ul> <p>채광 난이도: 上</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>'17年 기준 선광 작업 불가능하였으나, <b>現 선광 기술 개발中<sup>1)</sup></b></li> <li>채광時 함유되는 맥석 제거 작업 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>추가설비 필요</u> (건식, 습식 제련소)</li> <li><u>희토류 제련 기술 필요</u></li> </ul>

1) 일본은 망간각 선광 Scale-up을 위한 기술 개발 진행中

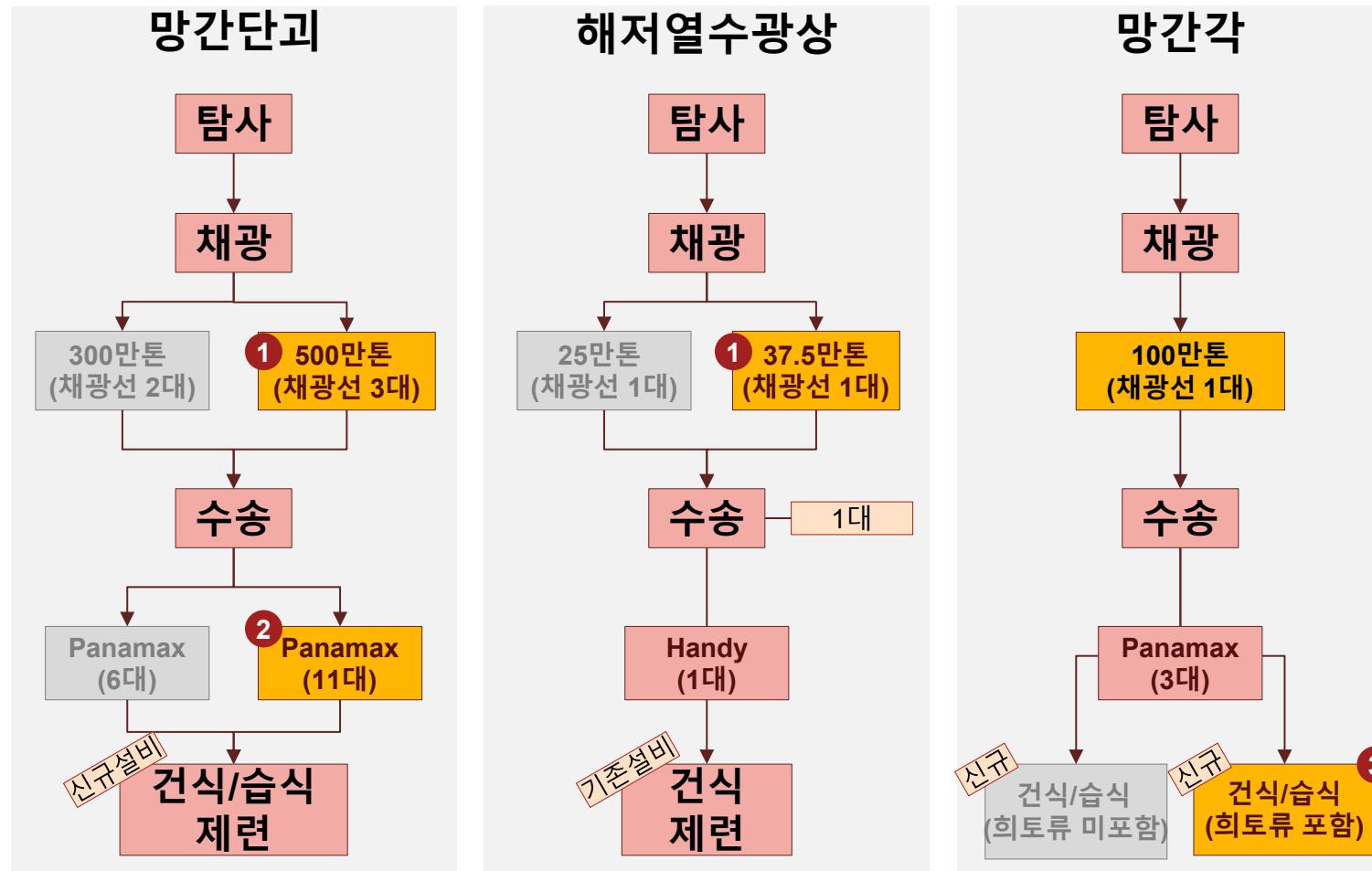
2) 타 광종 대비 분포 지역이 넓은 정도

3) 분포 지역내 광종의 품위가 균일한 정도

Source: PwC Research, 국제해저기구 의무이행 및 심해저 개발역량 확충 연구(2022년도 보고서), 남서태평양 및 인도양 해양광물자원 개발(2022년도 보고서)

\* 21년 보고서에 따르면, 상업화를 위한 목표 IRR 15%<sup>1)</sup> 달성을 위해 매장량·채광선·수송선·제련소 용량 등을 고려하여 경제성을 극대화할 수 있는 최적 모델을 수립함

## Business Model Case



1) 금속산업의 개발 단계별 적용되는 평균 할인율(캐나다 광업 경제학 협회(CIM MES)의 설문 결과)

## 의사결정 Points

1

### 채광선 대수 및 채광량

- 채광선은 심해저 광물 개발 CAPEX 및 OPEX에 큰 영향을 주는 요인
- 채광선 추가 투입으로 인한 채광량 증가가 전체 경제성에 미치는 영향을 판단

2

### 수송선 대수 및 생산량

- 동일 물량이라도 수송 거리 및 운영 방식에 따라 수송선 대수에 차이가 발생하므로, 최적 운영 방식을 고려한 대수 산출 결과 반영

3

### 희토류 제련 포함

- 최근 희토류 광물가치가 상승함에 따라 희토류 생산의 경제성 확보가 용이해짐

# 파일럿 양광시스템 성능시험 개념도

- 양광시스템 통합시험**
- 양광펌프 성능
  - 버퍼 원격제어
  - 모조단괴 양광
  - 설치회수 운용
  - 선상 분리회수

