

"극한환경 전력의 해법, 히트파이프 원자로 개발 현황" 워크숍 (26.10.28)

한-미 달 기지 구축 협력 추진 현황

박승수 사무관

우주항공청 우주과학탐사부문 달착륙선프로그램

KASA

‘IGNITION’

행사 개요 (’26.3.24., NASA HQ)

- 트럼프 정부 행정명령 발표 및 90일 이내 이행 조치 수립 의무에 따라 아르테미스 등 우주탐사 주요 변경 사항 및 이행계획 발표
- 화성 및 외행성 탐사를 위한 달 기지 구축 계획 공개



주요 내용

- (아르테미스 계획 개선) 발사 및 운영 숙련도 유지를 위한 임무 수행 주기 최적화 :
  A3이전 3년 내외 → A3~A5 1년 내외 → A5이후 6개월
- (달 기지 건설) 화성 및 외행성 탐사를 위한 전초기지로서 달 남극에 영구 기지 구축을 목표로 300억달러 투자 발표
- (국제우주정거장) ISS에 정부 소유 ‘코어 모듈’을 우선 부착, 상업 모듈을 결합·검증 후 분리하여 독립 비행하는 방안 제시
- (강화된 과학 임무) 기존 과학임무를 지속 추진하며, CLPS 기반 달 기지 지원 및 화성 통신·원자력 추진 실증

중국과의 우주 패권 경쟁에서 승리하기 위해
수십 년간 지속된 NASA의 관료주의적 관행을 폐기,
미국 주도의 달 조기 점유를 위한 경영 혁신 선언

NASA Moon Base

달 기지 개요

- 기존 게이트웨이 자원을 달 표면 중심으로 재편, '36년까지 3단계에 거쳐 달 표면 인프라를 구축, 인류의 반영구적 거주 달성

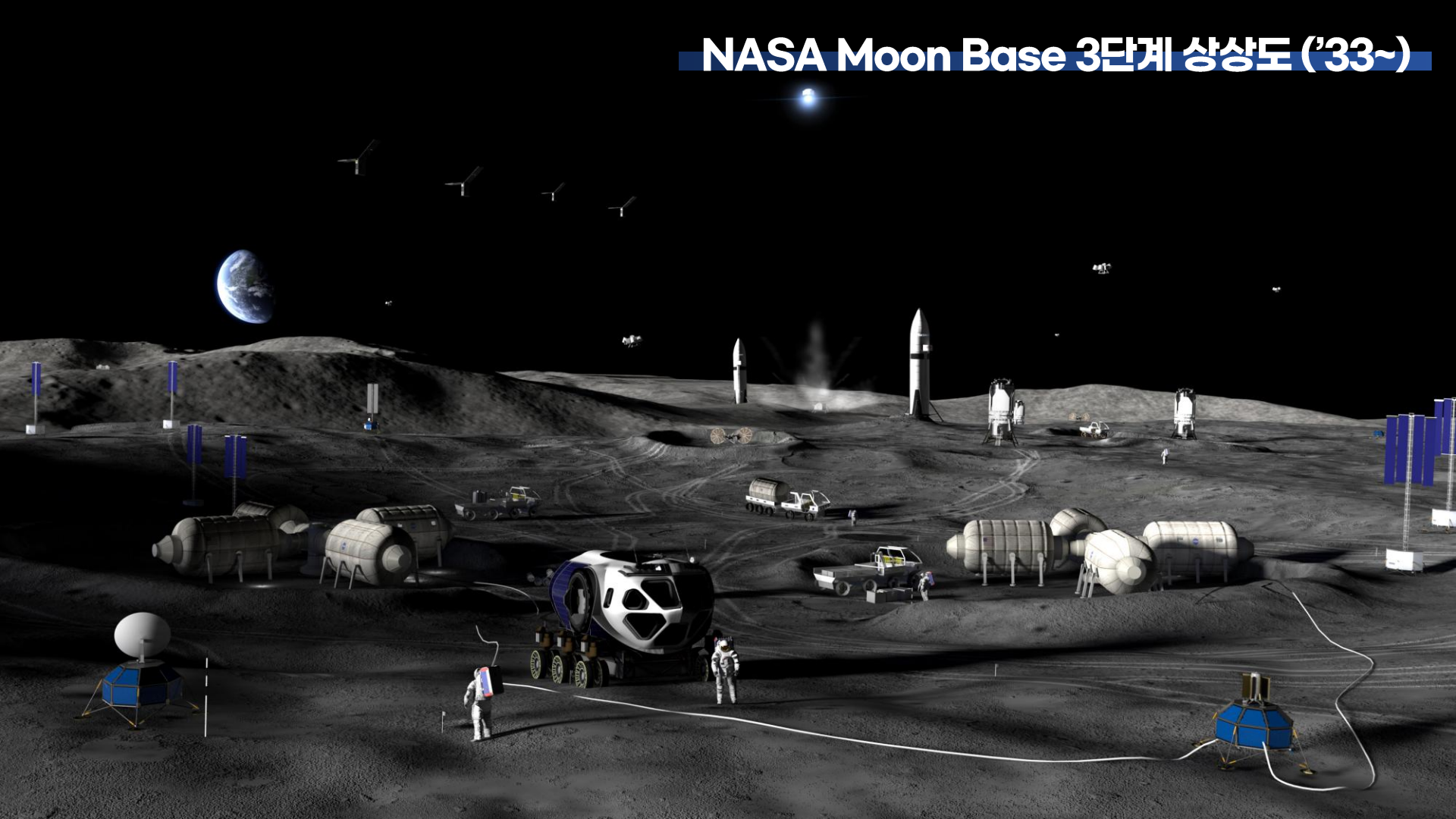
> 달 기지 구축 3단계 로드맵의 단계별 수요에 기반,
> 핵심 인프라 및 모빌리티 자산을 적시에 최적의 규모로 배치,
> 점진적이고 지속 가능한 달 표면 거주 기반 완성



달 기지 핵심 요소

- (수송) 대형 착륙선을 활용하여 대규모 인프라 구축에 필요한 장비와 물자를 달 표면으로 운송
- (모빌리티) 유·무인 로버(LTV), 가압 로버, 유틸리티 로버를 통해 승무원의 활동 범위를 넓히고 물류·탐사 효율을 높이는 이동 수단
- (인프라) 기지 운영의 지속성을 위해 태양광, 방사성동위원소, 핵분열 등을 이용한 에너지 공급과 고속 통신망을 구축
- (거주) 승무원이 장기간 안전하게 체류할 수 있도록 생명 유지 장치와 기밀실을 갖추고 내부 가용 면적을 넓힌 거주 모듈
- (현지자원활용) 달의 레골리스에서 산소, 물 등을 추출하거나 이를 건설 자재로 전환하여 지구 의존도를 낮추는 자원 조달 기술

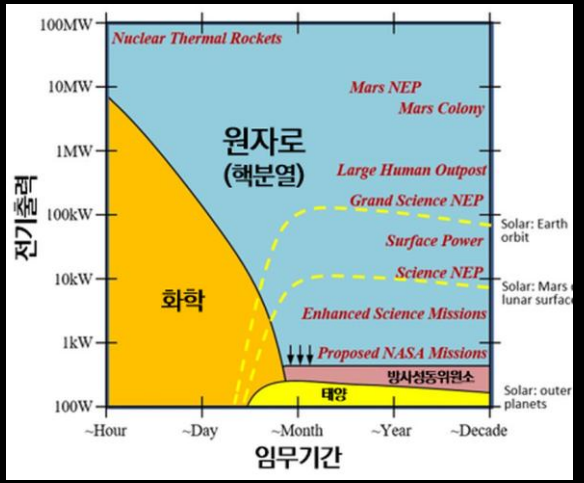
NASA Moon Base 3단계 상상도 (’33~)



우주탐사에서 원자력 에너지의 전략적 가치

- 달·화성, 심우주로 활동 영역을 넓히려면 새로운 에너지원 필요
  - (화학에너지) 무산소 환경 극복을 위한 산화제가 필수 → 임무 한계
  - (태양광에너지) 태양과 멀수록 효율 급감, 달의 밤·화성 먼지폭풍 등에 취약
- 원자력은 고밀도 에너지로 **시스템 소형화**에 유리

> 원자력은 화학·태양광 대비 ① 10년 이상 장기 임무 ② 100MWe 이상 고출력까지 가능
> → **지속가능한 우주탐사를 위해 반드시 필요**



우주용 원자력 기술 종류

구분	개념	출력	활용 분야
동위원소 전지	동위원소 붕괴열을 활용하여 전력 생산	〈 1 kWe	탐사선, 로버, 소형장비
원자로 · 핵분열 발전	달·화성 표면에서 전력 생산	1 – 1,000 kWe	달·화성 기지, 거주모듈
원자로 · 전기 추진	핵분열 열로 전력 생산 → 전기 추력기로 추진	100 We – 100 MWe	심우주 탐사선, 화물 수송
원자로 · 열 추진	핵분열 열로 추진제 직접 가열 → 노즐 팽창	50 – 500 MWth	시스루나·화성 수송

우주(핵분열) 원자로 개요

- (정의) 핵분열 열에너지를 전기에너지로 변환하는 우주용 원자로
- (분류) 냉각 방식에 따라 액체금속로, 가스로, 히트파이프 원자로 등
- (활용 분야) 달·화성 기지, 전기추진 우주선·탐사선 전력원
  - NASA는 달·화성 표면 에너지원으로 원자력을 적극 검토 중
    (예: 1kWe급 히트파이프 원자로 지상실증 KRUSTY*)

  * Kilopower Reactor Using Stirling TechnologY

- (핵심기술) 방열·운전 방식 설계 시 극한환경 대응 기술 요구

구분	지상 원자로	우주용 핵분열 발전시스템
잔열 제거	물과 공기로 잔열 제거	외부 복사로 잔열 제거
운전 방식	운전원 상주, 유지보수 가능	무인 운전, 유지보수 불가
안전 대책	안전거리 확보, 격납건물 격리	격리 불가, 차폐 고려
설계 원칙	경제성과 안전성 동시 고려	설계·운전의 단순화



달 표면 원자로 배치 개념도



화성 표면 원자로 배치 개념도

미국의 주요 우주원자로 관련 정책

행정명령14369 "미국의 우주우위 확보" ('25.12.18.)

- 2030년까지 발사 가능한 달 표면 원자로 확보를 대통령 정책으로 격상
  NASA에 90일 안에 행정명령의 이행계획 제출 지시

NASA-DOE MoU ('26.1.13.)

- 달 표면 원자로의 개발, 연료, 인허가, 발사 준비를 NASA와 DOE가 공동 추진 재확인

백악관 지침 NSTM-3 ('26.4.14.)

- 국가 우주원자력 이니셔티브 출범
  목표를 20kWe 이상으로 현실화하고 다수 업체 경쟁 체계 도입
- 1kWe급 저출력 옵션 선정 검토

NASA-DOE MoU ('26.10.8.)

- 협력 범위를 연구·연료·시험·발사·운용까지 우주 원자력 전 주기로 확대
  ('원자력 NASA' 시대 선언)


NASA-DOE MoU ('26.10.8.)

미국은 1년여 만에
기관 지침 → 대통령 정책 → 부처 협약 →
국가 이니셔티브로 이어지는 체계를 갖추며
우주 원자로를 개발 단계에서 배치 단계로 전환 중

NASA 우주원자로 추진 사업

달 표면 원자로 (Lunar Reactor-1)

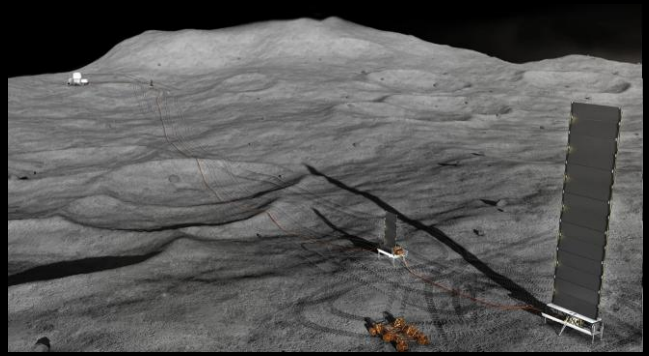
- 2030년까지 발사 가능한 달 표면 원자로, 산업체 주도 개발
- NSTM-3 요건 : 20kWe 이상, 궤도 3년·달 표면 5년 운용

우주 원자로 실증 (Space Reactor-1 Freedom)

- 화성행 핵전기추진(NEP) 실증선, '28.12 발사 목표
- 20kWe급 밀폐 브레이튼·HALEU 연료
- LR-1과 원자로·핵연료 공통화 (SR-1 실증 → LR-1 적용)

추진 체계

- NASA 우주원자로 전담 조직 신설('26.5), DOW 국방용 병행('31)





NASA 달 표면 핵분열 발전(FSP) 개념도

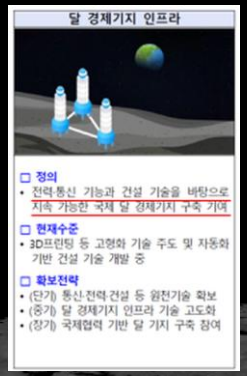
우리나라 우주원자로 도입 추진근거

제4차 우주개발진흥 기본계획 수정계획

- ‘우주탐사 확대’ 임무의 ‘달 경제기지 인프라’ 확보전략으로 (단기) 통신·전력·건설 등 원천기술 확보 명시
- ‘달 탐사의 본격 시작’ 기술요소(안)에 원자력을 포함한 달 표면 전력 생산 및 저장기술 명시

대한민국 우주과학탐사 로드맵

- 핵심목표 4 ‘달 경제기지 인프라 구축’에 전력·원자력 명시
  - ▸ 1단계: 달 기지 전력 시스템 핵심기술 확보
  - ▸ 2단계: 상시 전력 수요 대응 기술 달 표면 검증
  - ▸ 3단계: 달 기지 전력망·원자력발전소 구축 참여



< 달 기지 구축전략 주요내용(예시) >

◇ **(정책)** 달 자원 활용 및 우주경제에 관한 국제규범 연구 및 국내법 수립

◇ **(국제협력)** 미국, 유럽, 일본 등 달 기지 건설을 추진하고 있는 국가들과 양자, 다자간 협력체계 구축 방안 마련

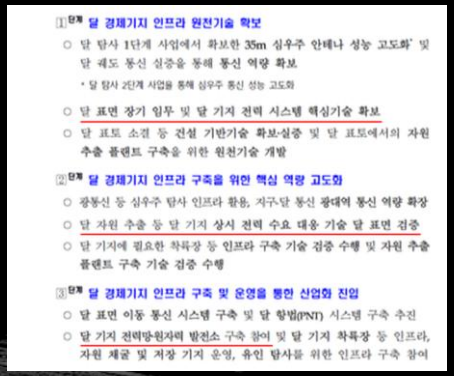
- **(달 궤도 및 기지 인프라)** 과학장비 탑재 방안, 지속 가능한 달 탐사를 위한 인프라 구축 및 유인 임무 참여 방안 등 다양한 전략
- **(달 표면 기지)** 美 CLPS* 협력의 확대 등 근미래 달 기지 건설 참여 방안

* Commercial Lunar Payload Service : NASA와 계약한 민간 업체가 탑재체를 달 표면으로 운송하는 서비스. 국내개발 달 우주환경 모니터(LUSEM) '25년 탑재 예정

◇ **(독자영역)** 독자적 영역 구축을 위한 기지 구성(Architecture) 및 기술요소 도출

◇ **(기술요소(안))** 달 기지 구축을 위한 핵심요소 도출 및 기술 확보 방안

- 이차전지, 연료전지, 원자력 등을 포함한 달 표면 전력 생산 및 저장 기술
- 모빌리티/로보틱스를 활용한 현지자원 탐사·채굴·추출·이송·저장·가공 기술
- 무인시추, 건설재료 생산, 무인시공 기술 등의 건설 기술 등




KASA