KAERI

우주 적용을 위한 국내 원자력 R&D 현황 및 정책 제언

김찬수 (한국원자력연구원)

2024.05.08
한국원자력학회 2024 춘계학술대회, 우주-원자력 협력을 위한 정책 현안 및 향후 과제 워크샵 (원자력 정책, 인력 및 협력 연구부회

목차

❖우주 원자력

❖방사성동위원소발전시스템

❖핵분열발전시스템

❖원자력추진

❖기타 기술

❖결론

꿈의 에너지원: 우주 원자력

7 Awesome Sci-Fi Nuclear Reactors (David Watson, Jun 22 2019)

1. 스타트랙의 원자력 유토피아
2. 스타워즈의 하이퍼매터 원자로
3. 백투더퓨쳐의 타임머신 에너지원
4. 아이언맨의 아크 원자로
5. 터미네이터의 Ir 원자력 에너지셀
6. 토탈리콜의 화성 원자로
7. 마션의 RTG

우주 원자력 및 추진

방사성동위원소 발전시스템(RPS)

- 방사성동위원소의 붕괴열을 이용한 에너지 공급

핵분열발전시스템(FPS)

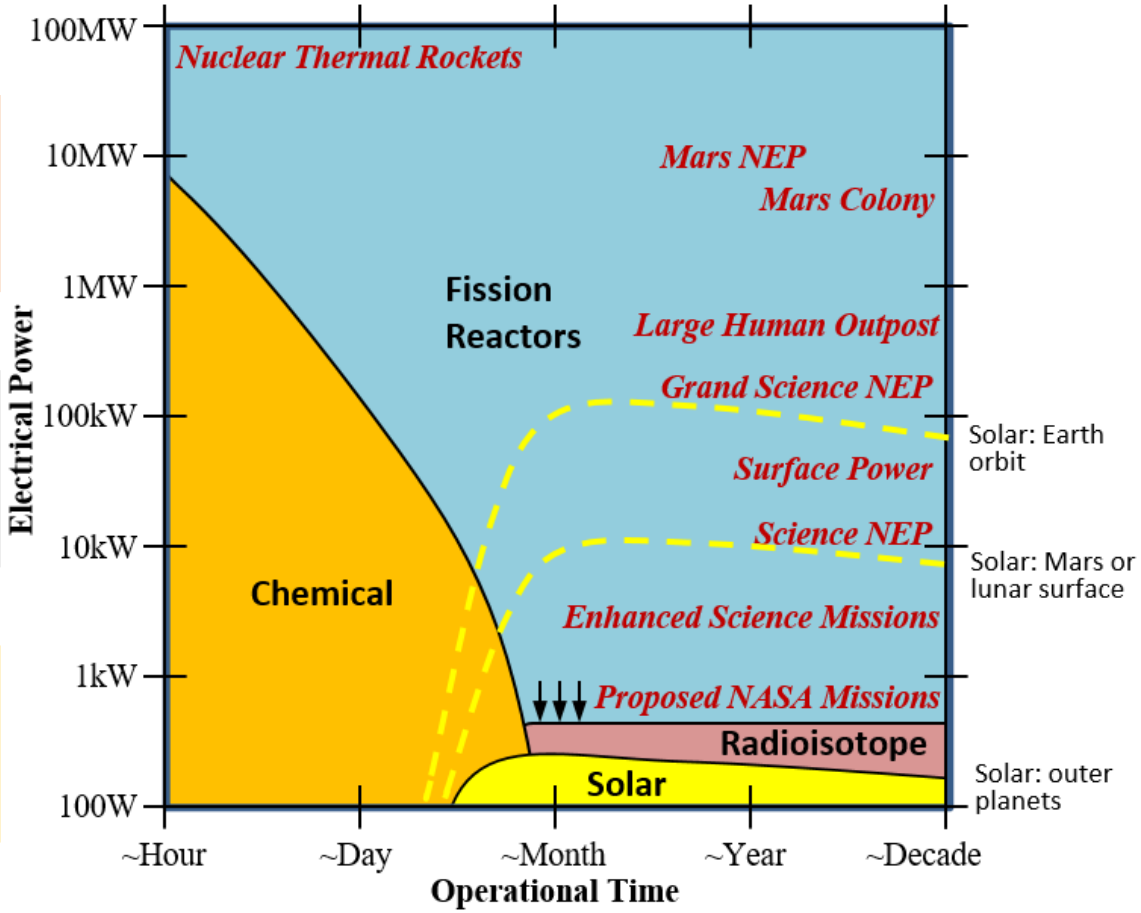
- 핵분열 열을 이용한 전력 생산

원자력열추진(NTP)

- 핵분열 열을 이용한 추진재 직접 가열

원자력전기추진(NEP)

- 핵분열 발전을 이용한 이온추진재 가속



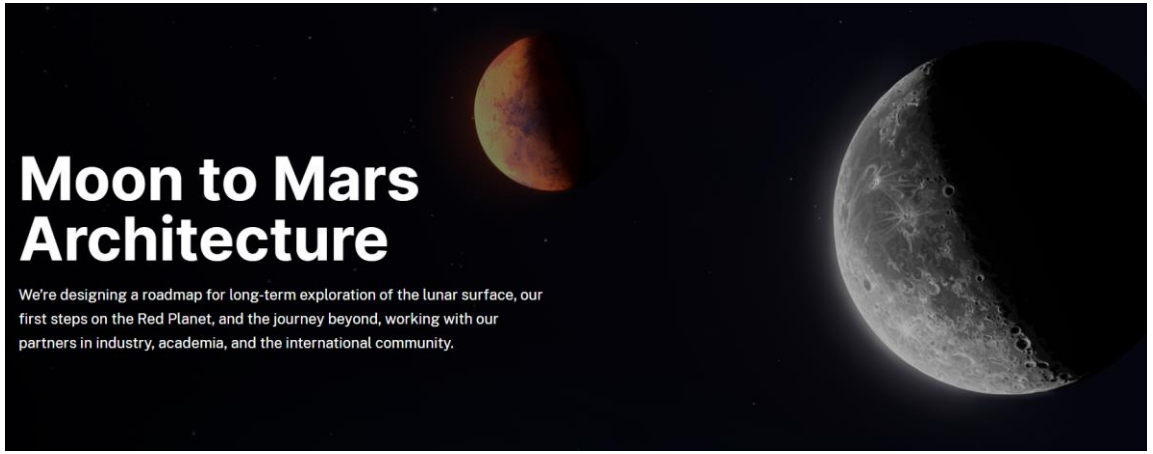
Qualitative Regimes of Space Power Applicability

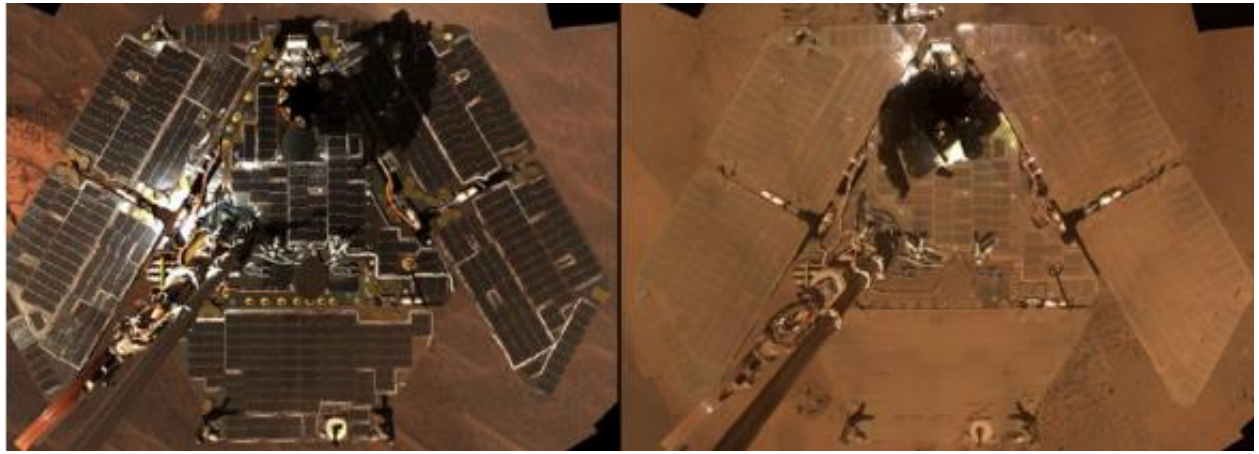
Source: DOE, NASA, D. Poston Studies

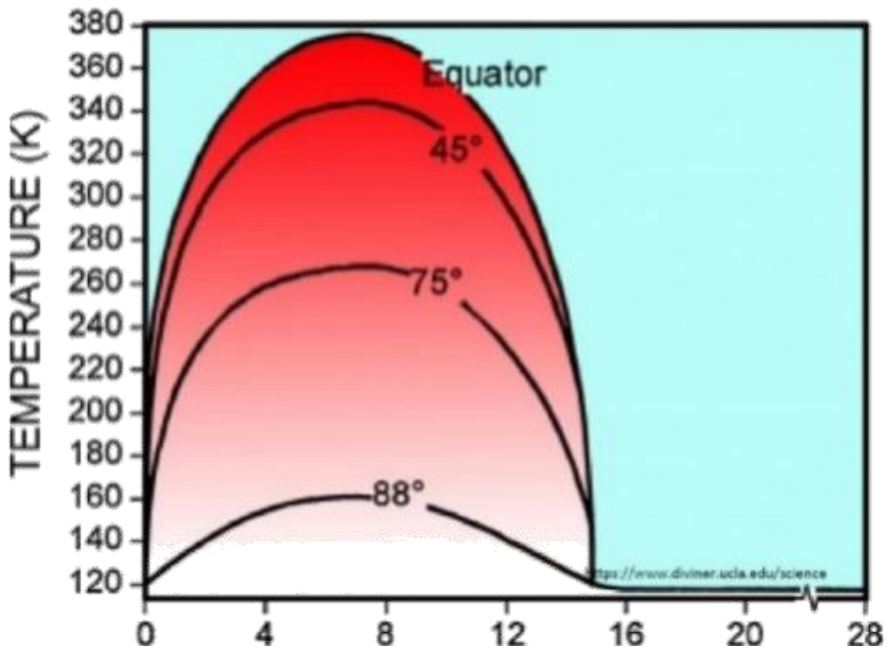
G. L. Bennett (2021)

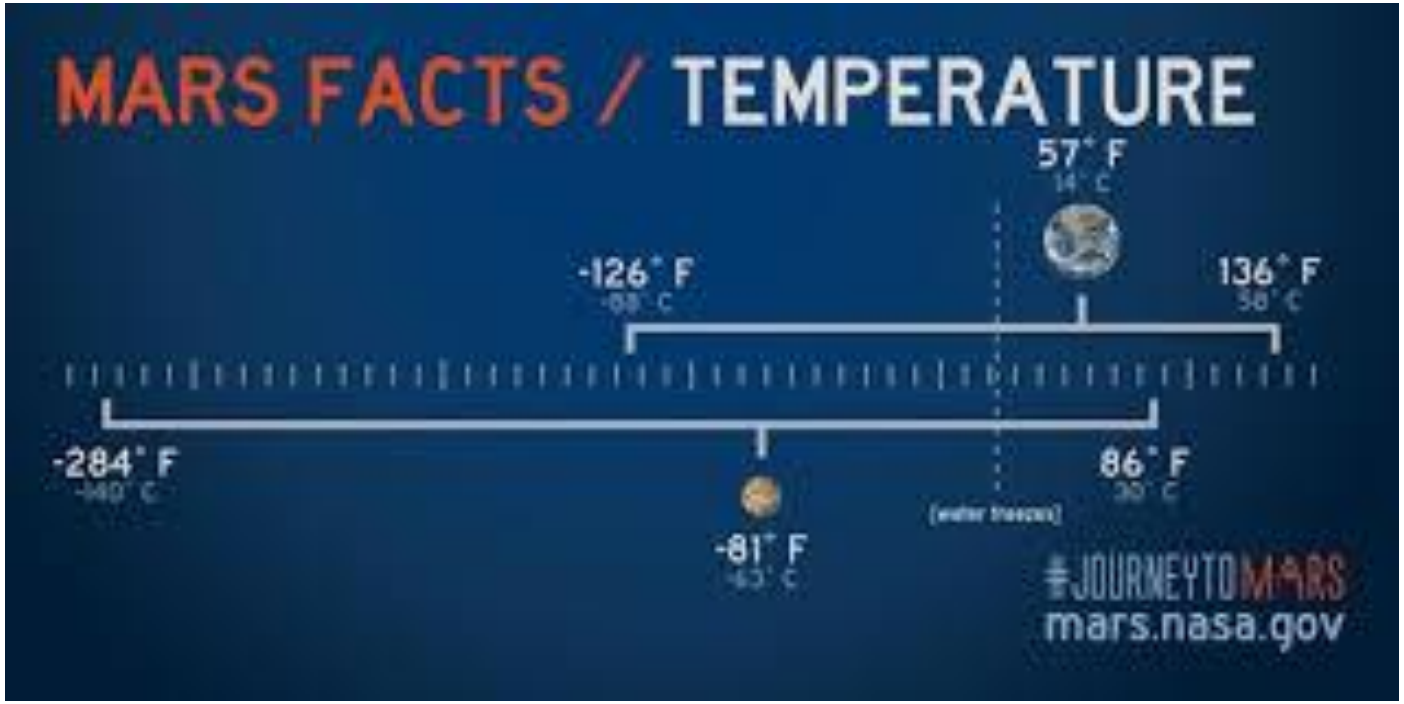
KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

우주 원자력의 필요성 (원자력 전력)





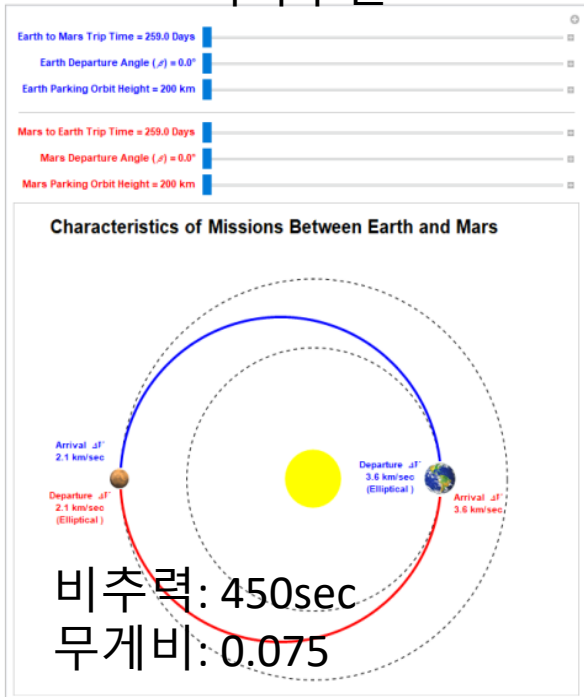




우주 원자력의 필요성(원자력 추진)

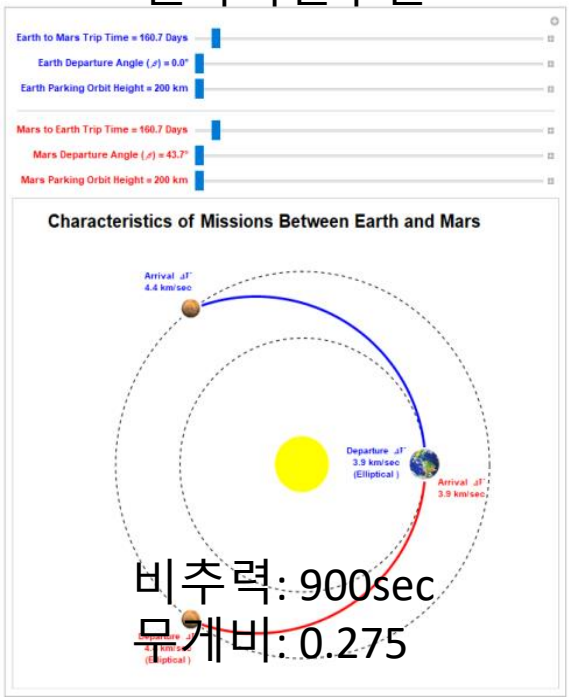
에너지원	에너지밀도	최대 열출력
LH_2-LO_x 연소	13 MJ/kg	공학적 설계
Pu-238 붕괴열	2.1×10^6 MJ/kg	0.54 kW/kg
U-235 핵분열	82×10^6 MJ/kg	공학적 설계
D-He3 핵융합	354×10^6 MJ/kg	공학적 설계
Antimatter	90×10^9 MJ/kg	공학적 설계

화학추진

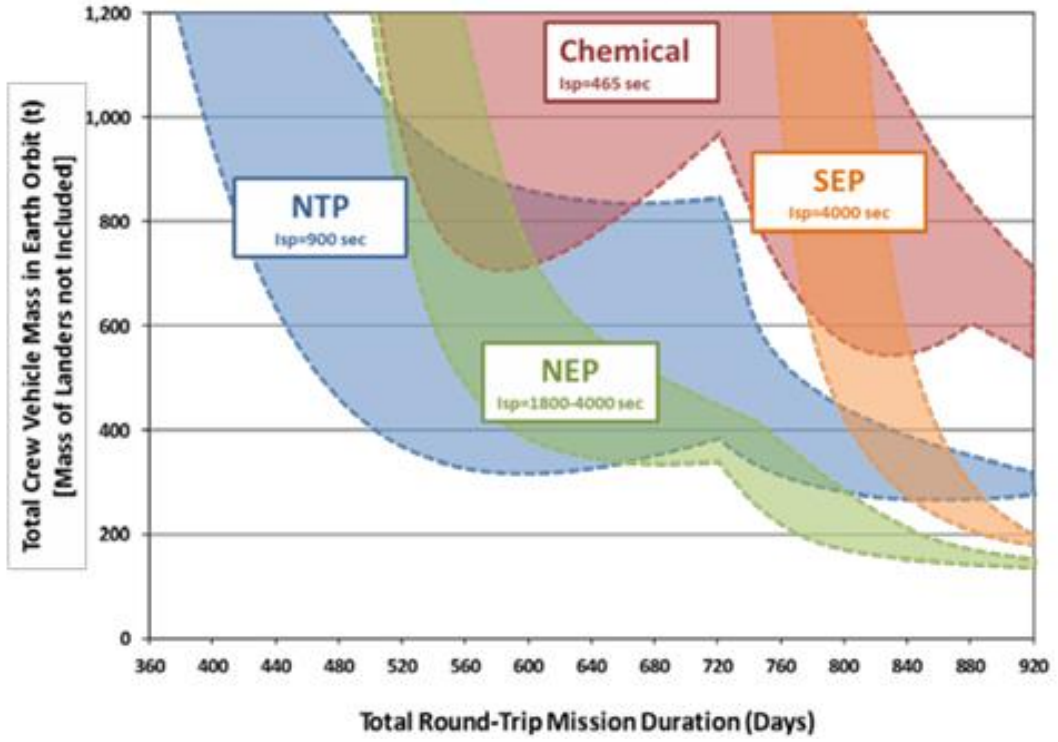


비추력: 450sec
무게비: 0.075

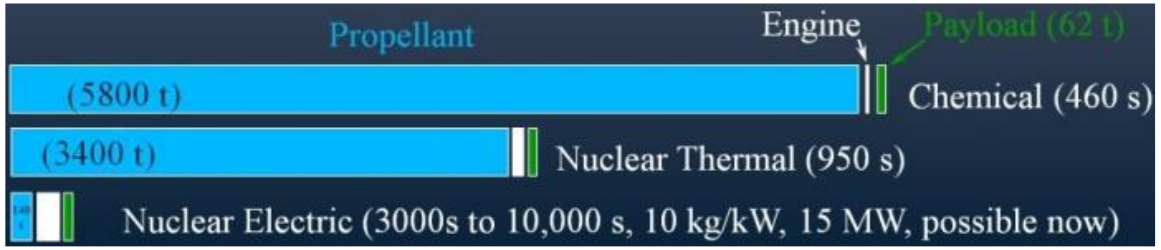
원자력열추진



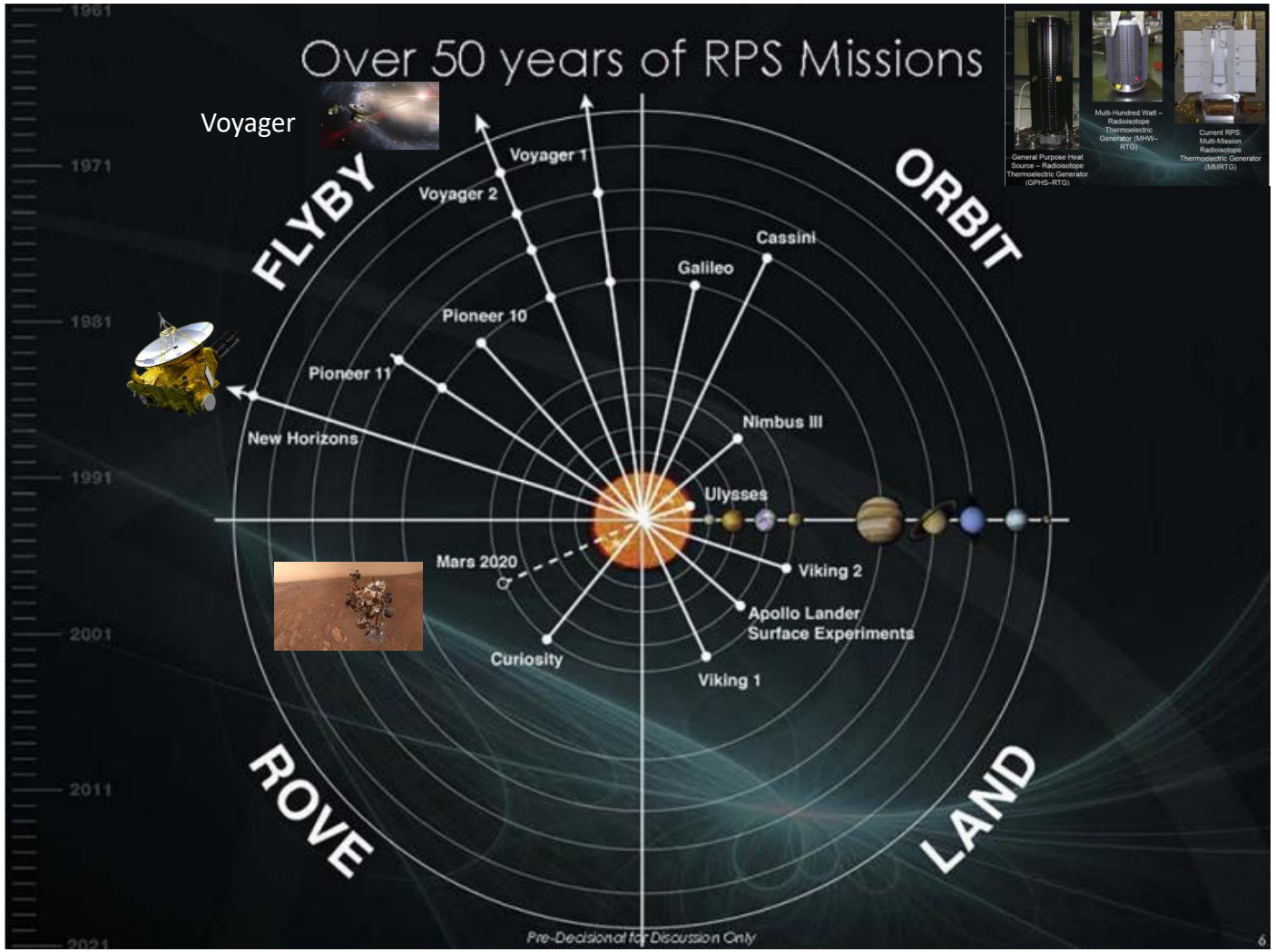
비추력: 900sec
무게비: 0.275



Source: NASA

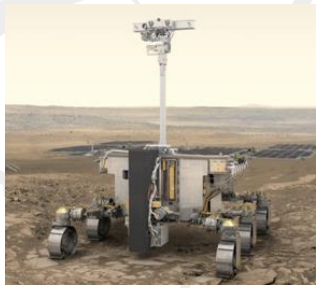


방사성동위원소발전시스템(RPS)



Source: NASA, Summary of NASA RPS Missions

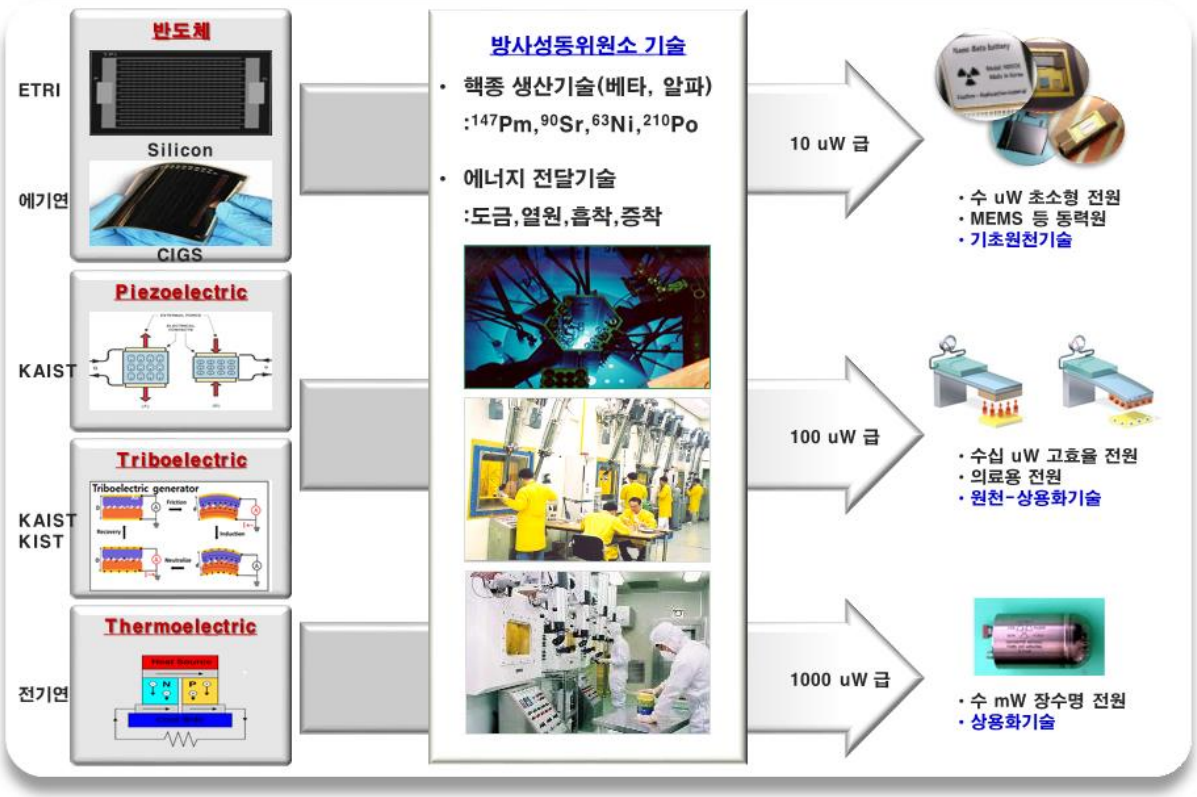
- ❖우주 탐사선 및 관측기, 통신
- ❖미국 (달, 화성, 심우주탐사): 45 RPSs ~
- ❖중국: 러시아로부터 Pu-238 RHU, RTG수입 달탐사 활용
- ❖동위원소 생산계획
  - 미국 & 러시아: Pu-238
  - UK & EU: Am-241
  - 국내 수입 타진 중



Rosalind Franklin
(ExoMars Rover)

RPS 국내 기술 수준 및 국내 연구현황

- 한국원자력연구원은 방사성동위원소 생산과 방사선에너지를 전력변환 소재에 효과적으로 전달하기 위한 도급, 흡착, 증착 및 열원 제조 관련 기반 기술과 경험 보유
- 전력변환 반도체, 압전소자, 마찰전력 생산 소자 및 열전 재료 등은 국내 여러 출연연 및 대학에서 특화 기술 보유
- ‘16년부터 ‘30년 달탐사를 목표로 연구개발 착수
- ' 22년 2차 누리호 탑재 성능검증위성에 RTG 기술 검증시험을 위한 ETG 탑재 (관련 검증 시험 ’20년 완료)



RPS 기술개발로드맵(안)

	기술분류	과거(8년) 2016~2024	차세대 동위원소전지 핵심기술 고도화사업 (2025~2029) 2025	2026	2027	2028	2029	초격차 사업 2030~2034
차세대 동위원소 전지 핵심소재 기술 고도화	전력변환 핵심부품·소재	에너지변환 기반기술 검토 / Si 기반 증수체 개발	GaN 등 고밴드갭 반도체 에너지증수체 기초설계 및 평가 / Perovskite, 염료감응 등 신소재 에너지증수체 기초설계 및 평가		고효율 베타전지 적용 및 실증평가			고효율 전력변환기술 최적화 및 ■급 시제품 개발
		우주용 상온급 Bi_2Te_3 열전소재 개발	중온용 PbTe/SKD계 제조 기술		미세구조제어 열전소재 성능향상	열전소재 기계적/열적 안정성 개선		고온용(1000℃) SiGe/Zintl계 열전소재 제조기술
		열전소자 설계 시뮬레이터 개발 / 상온용 열전소자 설계	25W급 스털링엔진 (효율10%)		25W급 스털링엔진 (효율 25%)			스털링엔진 (효율 35%)
	방사성동위원소 생산기술 및 공급망 확보	원자력배터리 개발 MOU 체결	동위원소 생산기관 협의		동위원소 국제수급 절차		Ni-63, Pu-238, Am-241 공급 MOU 체결	
		연료변환/ 펠릿제조/ 열원밀봉 장치개발 / RI열원 인허가	핫셀 내 Sr-90 열원 생산공정 구축		Sr-90 정제/제조 실증시험		Sr-90 열원 시작품 제조	열원생산 상용화기술 개발
	표준평가/ 인증체제 구축		동위원소전지 핵심부품 모듈화	모듈 통합 동위원소전지 조립기술		동위원소전지 모듈 조립체 구성기술		초격차 동위원소전지 평가기술
		6W RTG 전용 성능평가	성능/신뢰성 공통평가항목 도출	성능평가 프로세스 (전력/온도/방사선)		안전/신뢰성 평가프로세스 구축 (충격/진동/우주선폭발/재진입)		

목표 산출물

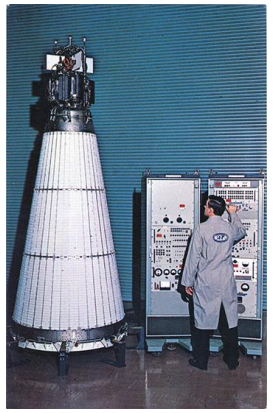
고효율 전력변환소재

열원제조 실증기술 및 제조시설

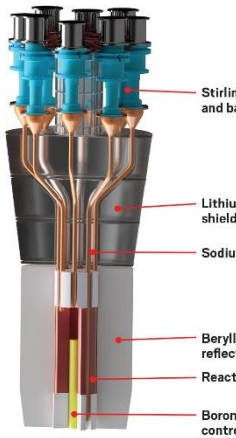
초소형 베타전지/대형RTG

핵분열발전시스템(FPS)

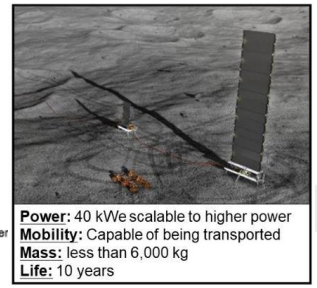
- ❖우주용 초소형 원자로
  - 1kWe ~ 10 Mwe SMR
- ❖비경수로: LMR, GCR, HPR
- ❖설계요건
  - 복사열전달로 원자로 붕괴열 제거
  - 100% 자율 운전, 발사 안전성
  - 유지 보수 배제, 설계 단순화
- ❖소련: 37개의 원자력 군사위성
- ❖미국
  - 7기 지상 실증& 1 기 발사 (SNAP10A)
  - KiloPower & 달기지용 히트파이프 원자로
  - NEP & 화성기지용 MW급 이상 원자로
- ❖영국(Rolls & Royce), 프랑스(CEA)
  - 달기지용 히트파이프 원자로
- ❖중국
  - 달기지 및 화성탐사전기추진용 히트파이프 원자로

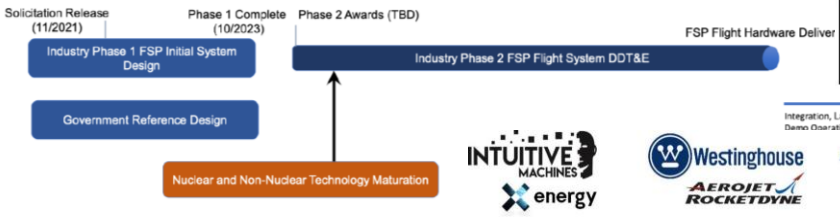


SNAP10A
Source: NASA



Source: NASA & LANL





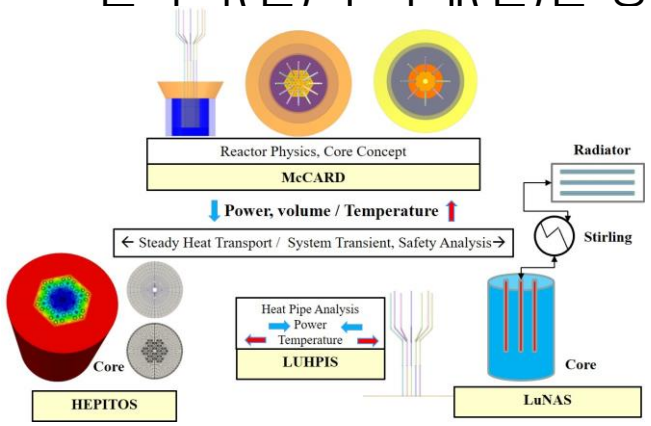
Source: USNC

Source: Radiant

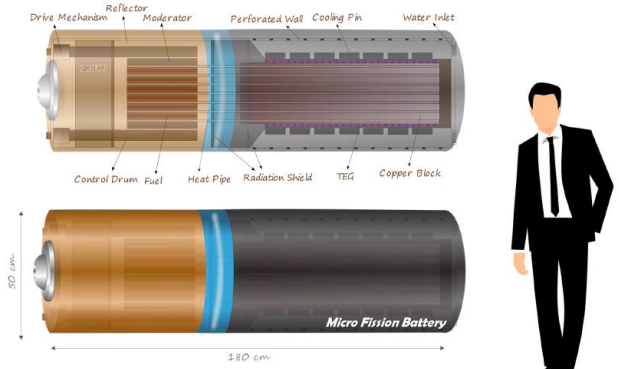
Source: Rolls & Royce

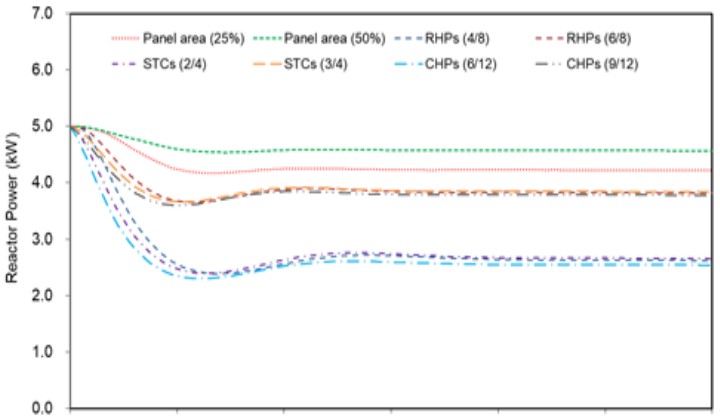
FPS 국내 기술 수준 및 연구 현황

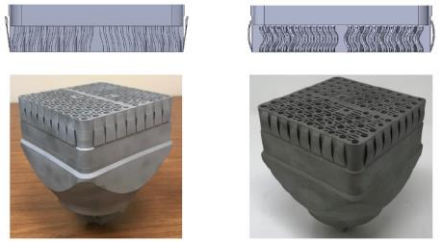
- 한국원자력연구원은 ’19년부터 착수된 원자력융복합기술개발사업을 통해 원자로 설계와 히트파이프 기반 기술 확보
- 스털링엔진 및 방열판 기술은 국내 산업체와 대학이 보유
- 핵연료 및 노심구조물 기술은 국내 SMR 요소기술 공통 활용
- 원자력(연)과 기계(연)은 창의형 융합연구사업 수행

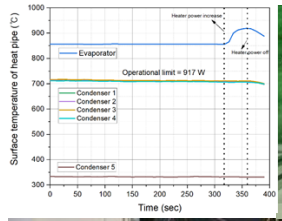


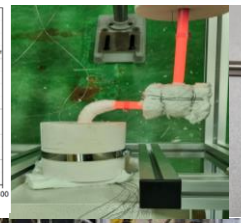
❖ Nuclear battery for underwater drone (heat pipe cooled micro reactor)

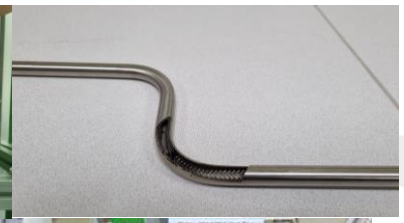






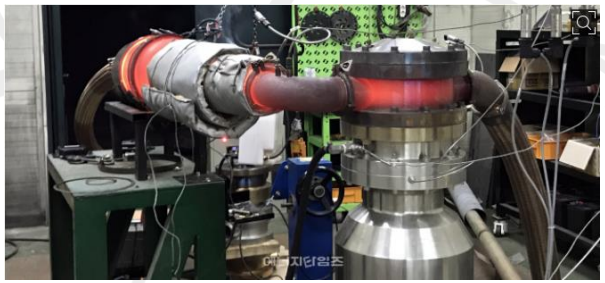






Thermal Performance Test Facility for Alkali Metal HP

국내 스털링엔진



히트파이프 원자로 기술개발 로드맵(안)

~2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030~2034	2035~

원자력융복합기술개발

- 5 kWth 히트파이프 원자로 개념 개발
- 히트파이프 과도해석기술
- 원자로 계통해석 기술
- 소듐 히트파이프 단일봉 고온 열이송 성능 시험
- 굽힘가공가능한 국내 고유 윅구조물 개발

설계 및 해석기술

히트파이프 기술

극한환경 원자력 전원공급 시스템 기술 개발 사업

- 100 kWth 히트파이프 원자로 개념 설계
- 히트파이프 원자로 지상 실증로 개념 설계
- 히트파이프 원자로 다물리 연계 설계/해석 기술 개발
- 열이송, 계통 및 안전 해석기술 검증
- 5 kWth 노심 모사 히트파이프 집합체 시험 및 100 kWth 노심 모사 시험장치 설계
- 100 kWth 노심 모사 히트파이프 집합체 시험
- 히트파이프 제조 자동화 기술 개발
- 원자력급 히트파이프 제조 품질보증 기술 개발
- 히트파이프 시작품 공급 및 운전기술 개발

기존 원자력 관련 연구개발 성과

- 환형핵연료(경수로용 핵연료) 제조 기술
- 3D 프린팅 기술

노심제조기술

- HALEU 핵연료 및 노심구조물 제조 기술 개발 (3D 프린팅)
- HALEU 핵연료 및 노심구조물 중성자 조사시험
- 수화물 감속재 고온 거동 평가

후속 사업

- 초소형 히트파이프 원자로 기본설계 및 지상 실증
- 우주 임무 및 비행/모빌리티 플랫폼 개념 개발
- 원자로 지상실증용 알칼리금속 히트파이프 제작 및 공급
- 원자로 지상실증용 핵연료 및 노심 구조물 제작 및 공급

최종 활용

- 국제 달 유인기지 및 국내 현지자원활용 플랜트용 한국형 히트파이프 원자로 개발

- 특수목적용 히트파이프 원자로 개발

창의형 융합연구 사업

- 히트파이프 집합체 시험 장치 구축 및 시험자료 생산
- 히트파이프 원자로 설계 기술 검증 및 히트파이프-스털링엔진 연계 시험

전력변환계통 연계 기술

글로벌 탑 전략연구단 (KIGAM 주관)

- 히트파이프 집합체-브레이튼싸이클 및 달 현지자원활용 플랜트 연계 기술 개발

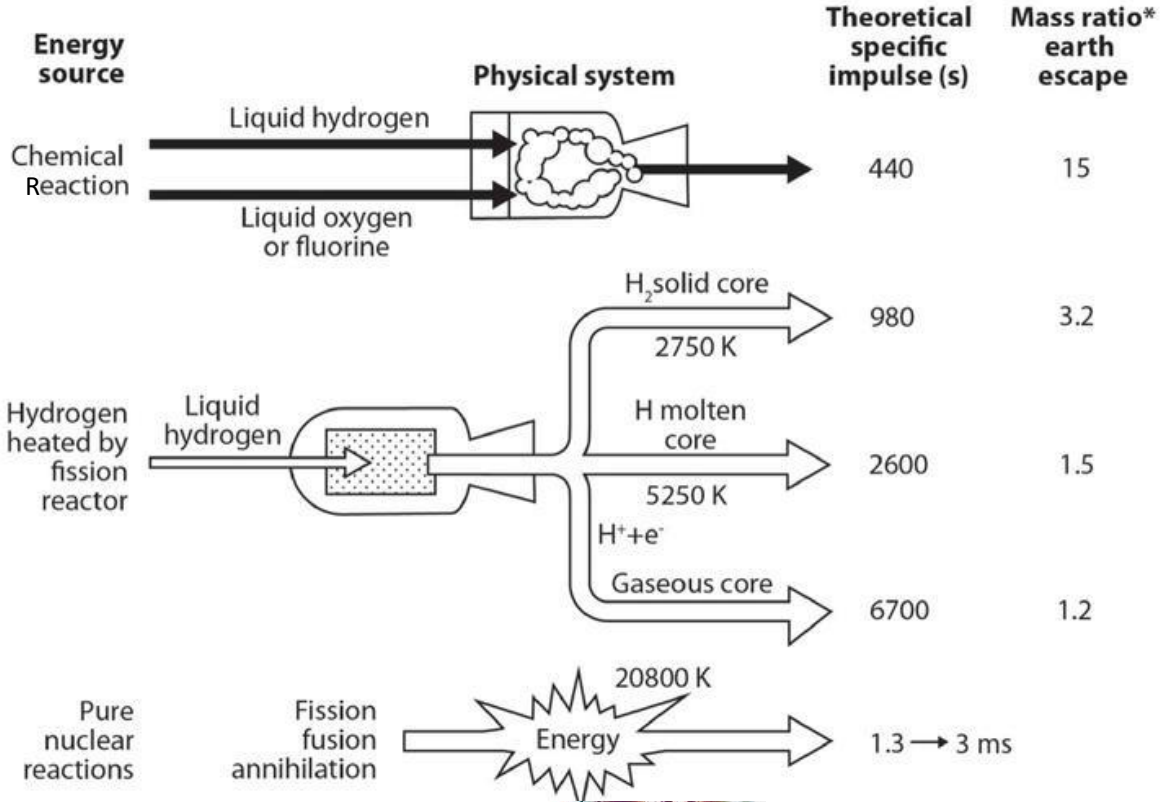
차세대 비경수형 SMR 관련 원자력연구개발사업

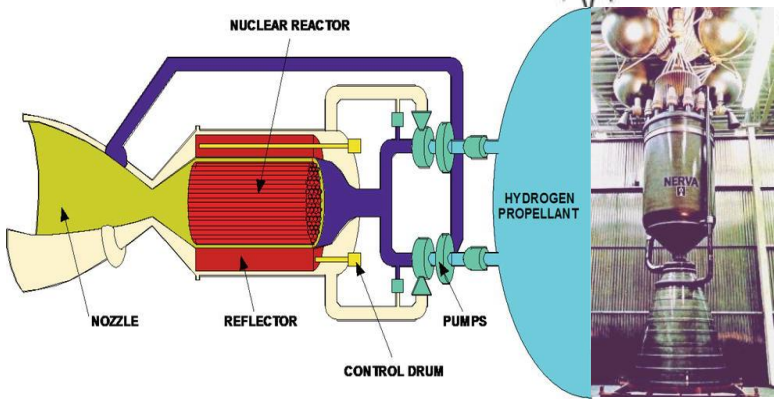
- 비경수형 핵연료 (TRISO 및 UN, UCO 등) 및 관련 인허가 경험

기 수행되었거나 수행 중인 사업

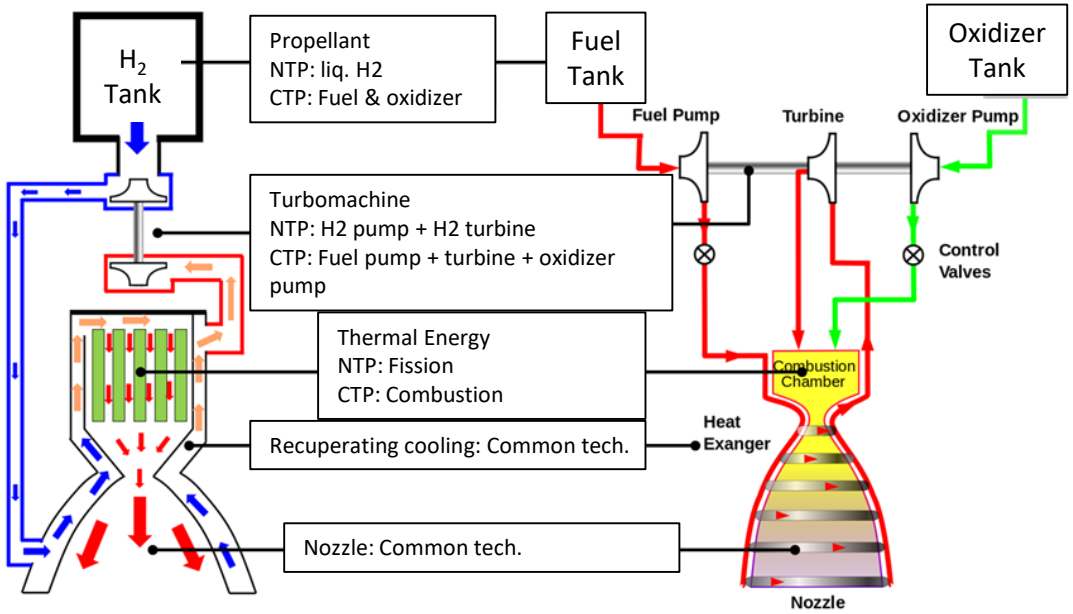
선정 중이거나 기획 예정인 사업

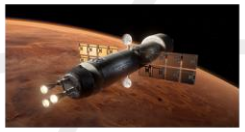
원자력열추진(NTP)

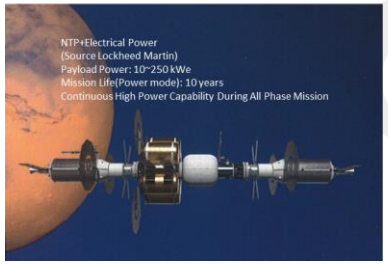




- **NERVA Project (~'70)**
  - 수소추진재, 블록형, 23회 지상시험
- **DOD PBR Project ('80~'94)**
  - 페블형 노심, BWXT
  - 대륙간탄도미사일







Power-Adjusted Demonstration Mars Engine (PADME)

KARI와의 화성탐사용 원자력추진 개념 연구

원자력전기추진		원자력열추진	
전기출력	500 kWe	Thrust	10 kN
ISP	> 3,000 sec	ISP	>950s
Thruster Efficiency	>60%	T/W_eng 비	>3
Specific Mass(Total)	≤ 10kg/kWe	System Restart	>8
Specific Mass (Power)	≤ 6 kg/kWe	Operation Time	>4hour
Specific Mass (EP)	≤ 2 kg/kWe	Thermal Power	~50MWth
Operation Time	> 4 years	Propellant	LH2
Thermal Power	TBD	LH2 Flow Rate	<1.1 kg/s
Reactor Coolant T	TBD	Fuel Temperature Limit	TBD
Propellant	Xe	Cycle Type	TBD
Conversion Cycle	TBD	Fuel/Moderator/Reflector	TBD
우주선 중량	10,000kg	우주선 중량	10,000kg
Entry 중량	1,441 kg	Entry 중량	4,379kg
페이로드	793 kg	페이로드	1,921kg

NEP 노심개념
-TRISO, 환형핵연료

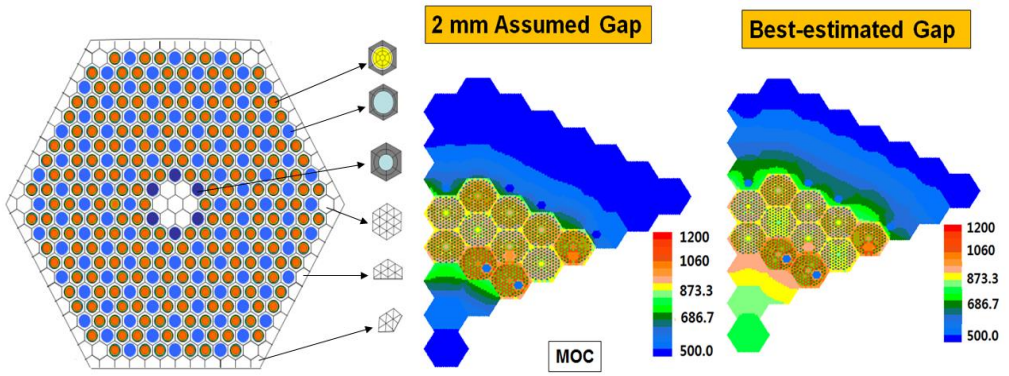
Component	Item	Case 3	Case 4
원자로	외경(D)	77.7 cm	
	높이(H)	70.0 cm	
	Active core 높이	50.0 cm	
	총 질량	1120.1 kg	1125.4 kg
핵연료	Compact 외경/내경	3.0 / 1.0 cm	
	Hole 개수	120 (5 rings)	
	Packing fraction	35 %	45 %
	핵연료 Compact 질량	88.4 kg	93.7 kg
	우라늄 질량	19.5 kgU	25.1 kgU
감속재	육각형 너비	50.0 cm	
	재료	$ZrH_{1.5}$ (5.6 g/cc)	
	질량	363.6 kg	
반사체 (BeO, 3.01 g/cc)	두께	10.0 cm	
	질량	668.1 kg	

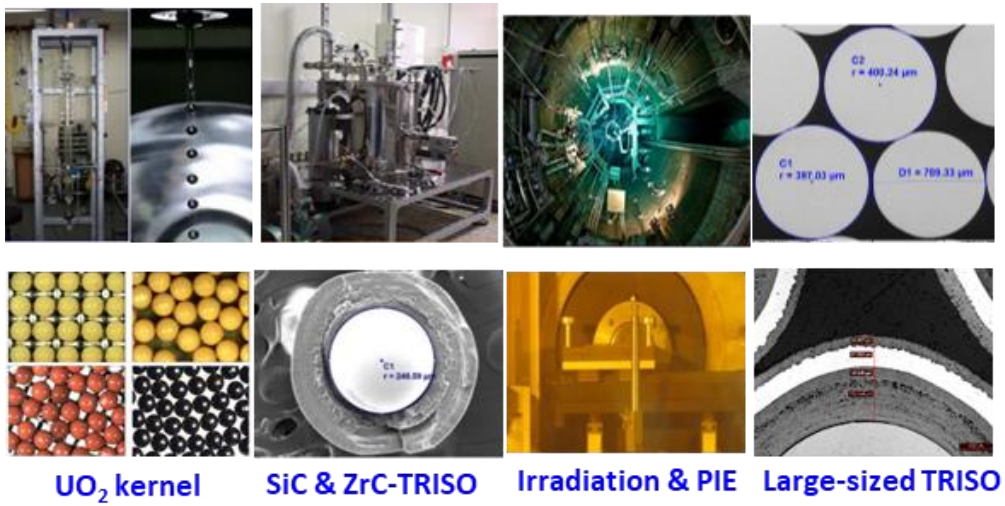
NTP 노심 예비개념
-UN-TRISO, $ZrH_{1.66}$, 50MWth, 5시간 이상

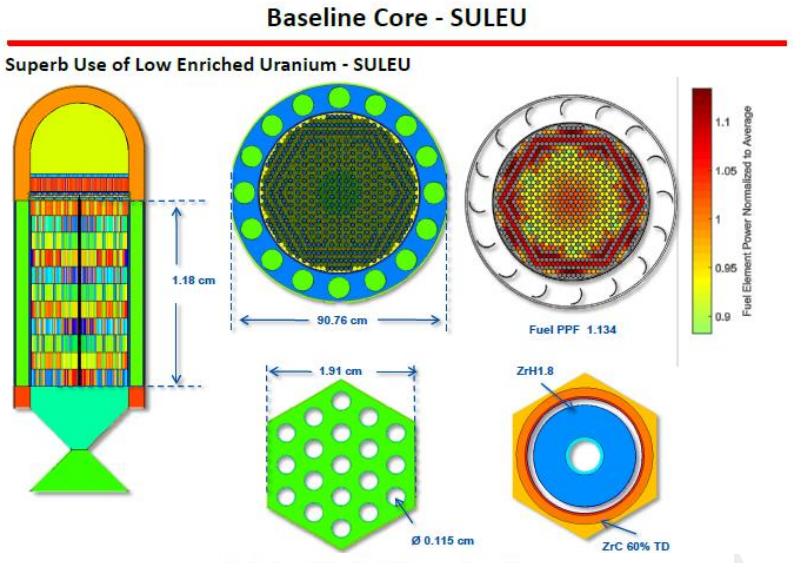
Component	Item	치수
원자로	외경(D)	66.0 cm
	높이(H)	70.0 cm
	Active core 높이	50.0 cm
	총 질량	569.74 kg
핵연료 (UN TRISO, packing fraction 40%)	외경/내경	1.7 / 0.5 cm
	Fuel Element 개수	61
	우라늄 질량	44.61 kgU
	핵연료 컴팩트 질량	85.64 kg

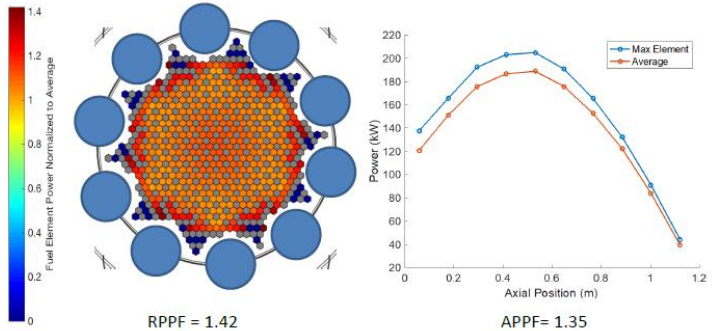
NTP 국내 기술 수준 및 국내 현황

- 한국 과학기술원의 기초적인 연구를 제외하고는 연구경험이 없음.
- 원자로 설계 및 핵연료 제조를 위한 기반기술은 제4세대 원전 개발을 통해 확보
- 초고온 핵연료와 강력한 다물리 연계 원자로 설계/해석코드 개발 필요





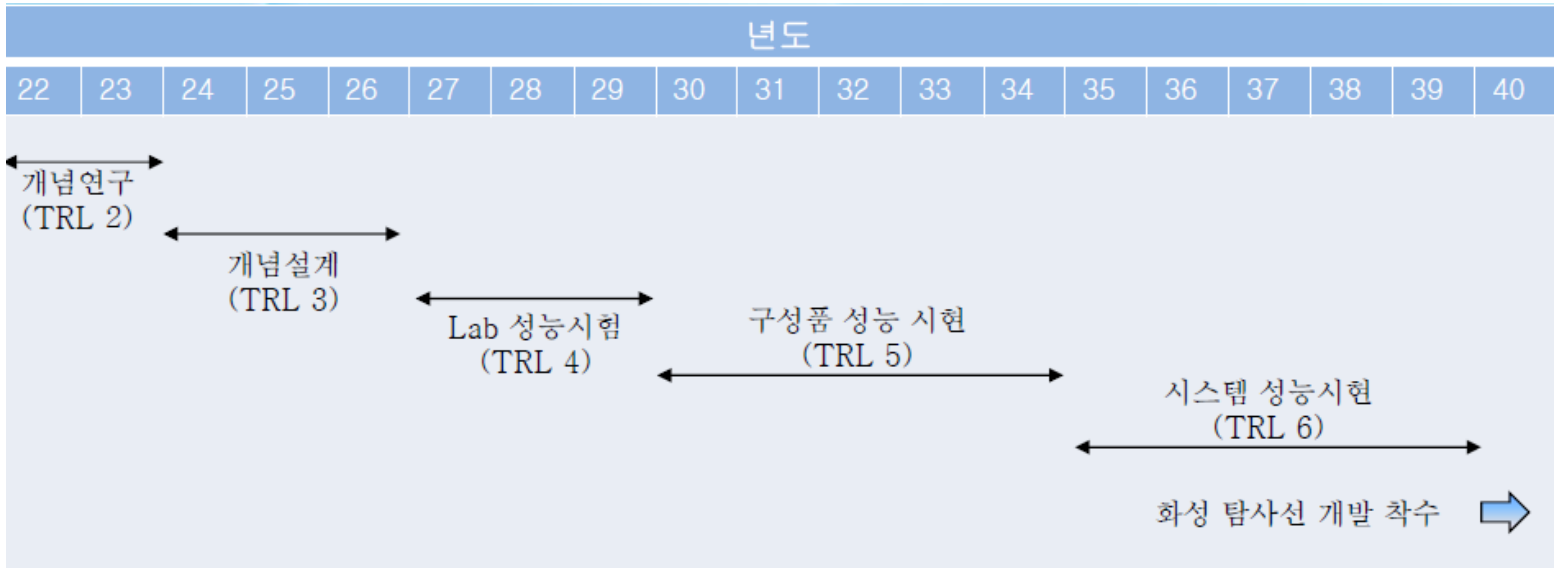




General Description	
SULEU is a LEU Graphite Composite Fuel, $ZrH_{1.8}$ moderated nuclear thermal propulsion concept relying largely on heritage design.	
Reactor System Mass	
Fuel Mass (600 Elements) (kg)	800.1
Tie Tubes (427 Elements) (kg)	588.6
Radial Reflector + Control Drums (kg)	757.4
Axial Reflector (kg)	86.7
Barrel+Vessel+Other Core Structure (kg)	265.2
Total Mass (Excluding Shield) (kg)	**2498.0**
Key Performance Parameters	
Nominal Isp (150:1 Nozzle)	**897.7**
Chamber Temperature (K)	2712.9
Nominal Thrust (kN)	**155.7 (35k lbf)**
Reactor Power(MW)	**768.9**
Fuel Temperature Max (K)	**2850.0**

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

원자력추진우주선 개발 로드맵(안)



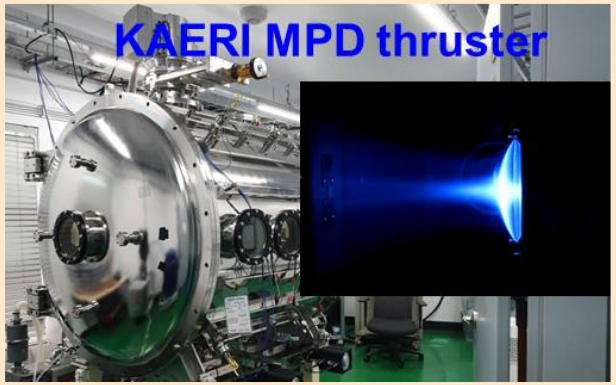
TRL 4까지는
우주-원자력 융합연구로 수행

연도	1	2	3	4	5	6~10	11~15		16~20
원자력 추진 연구 항목	우주 미션 개발 및 원자력추진 우주선 개념 연구					원자력추진 우주선 및 원자로 개념/기본 설계	우주모듈 지상시험		우주 실증시험
	원자력 추진 우주 미션 개발			원자력 추진 우주선 개념					
	우주선 임무 설계 연구								
	원자력추진 원자로 개념 설계 해석 체계 개발						핵연료 설계 코드 성능 검증	지상종합 실증시험	
	LEU 기반 원자로 개념 개발 및 평가			노심해석방법론 검증 및 성능 최적화					
	몬테칼로 기반 정상 및 과도 다물리 방법론 개발								
	원자력열추진 핵연료 기반 기술 개발					핵연료 조사성능 및 임계시험			
	핵연료 제작 및 물성 측정 기술 개발			노외 핵연료 개별효과 시험					
	핵연료 성능해석 코드 개발			핵연료 예비설계		노외실증시험			
	원자로 설계요건 및 설계방법론 개발			핵연료 노외 실증시험 완료					
		노외 핵연료 개별효과 시험 완료							
우주-원자력 융합연구로 원자력 추진 우주선 개발 대형사업 추진									

한국원자력연구원의 우주 관련 기술

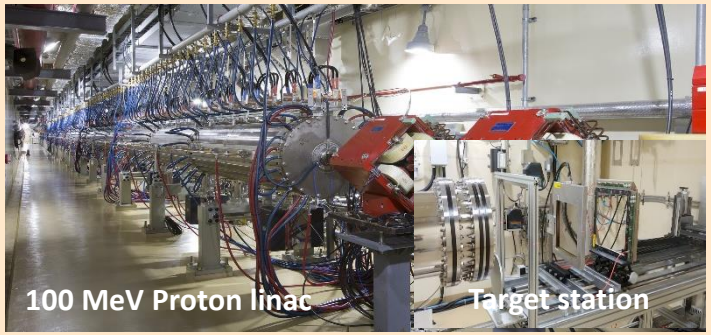
전기추진 요소기술

10kWe급 고출력 추력

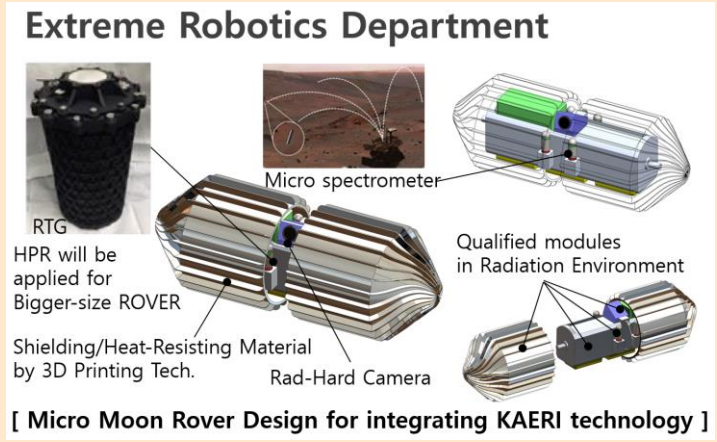


우주 방사선 환경

양성자 가속기를 활용한 우주 방사선 환경 모사 및 방사선 측정

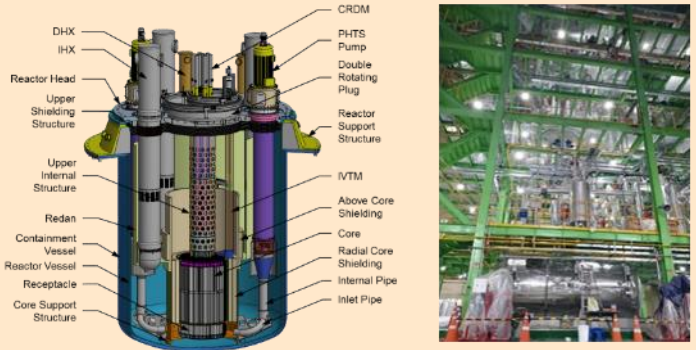


우주 로봇



소듐냉각고속로 & 고온가스로

대용량 핵분열발전시스템 후보노형



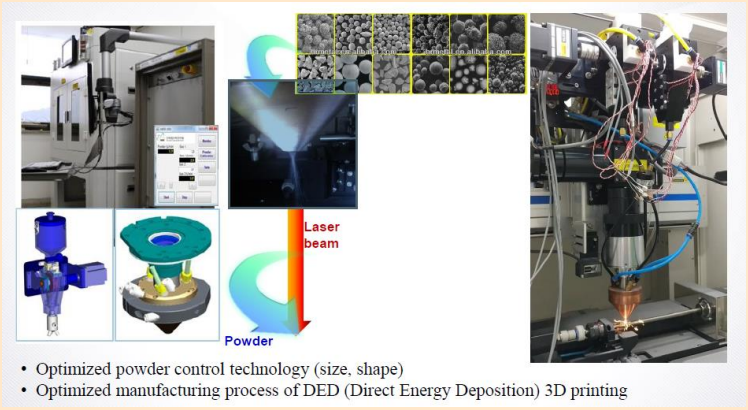
< PGSFR Plant Layout >< Sodium Integral Effect Test Facility >

초임계 CO_2 브레이튼 사이클

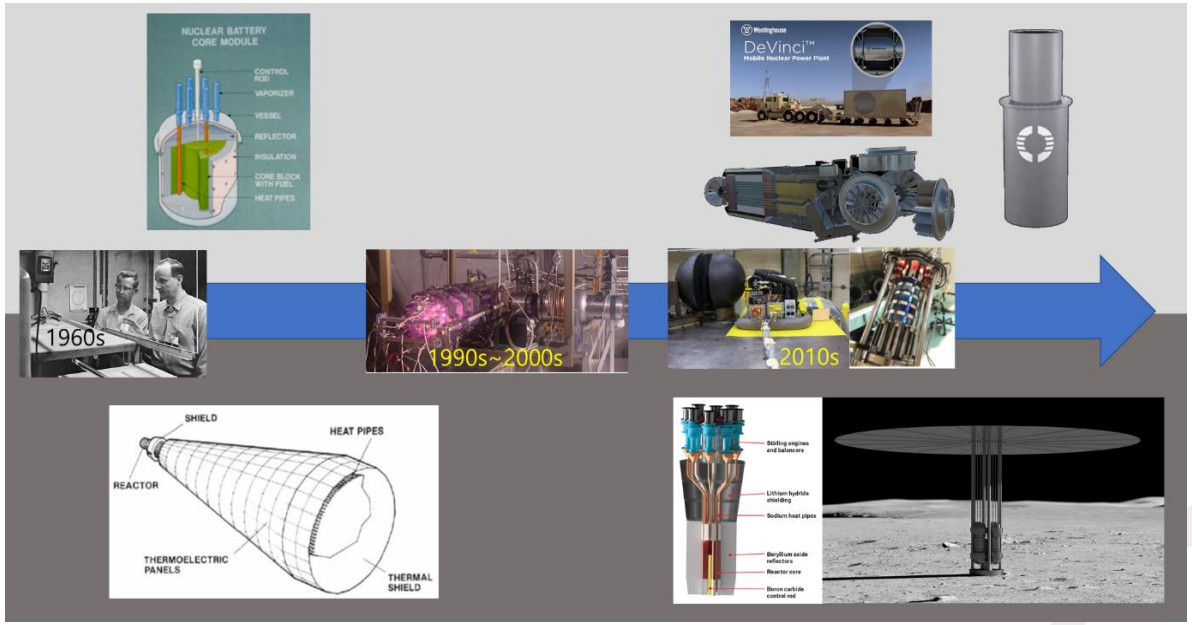
대용량 핵분열발전시스템을 위한 전력변환 계통에 활용 가능

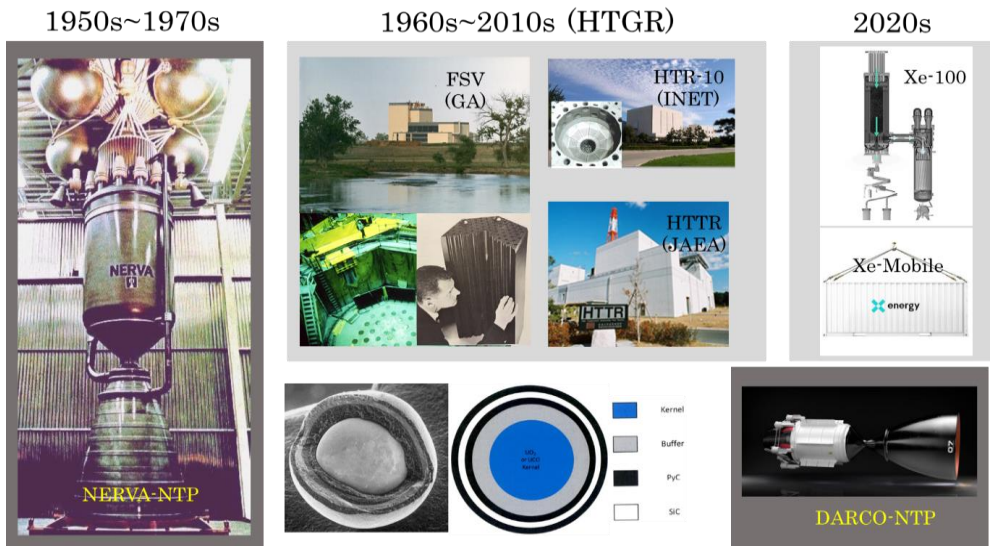
3D 프린팅 및 소결 기술

우주 활용 가능한 구조물 제작



우주 원자력 기술의 Spin-in & Spin-off

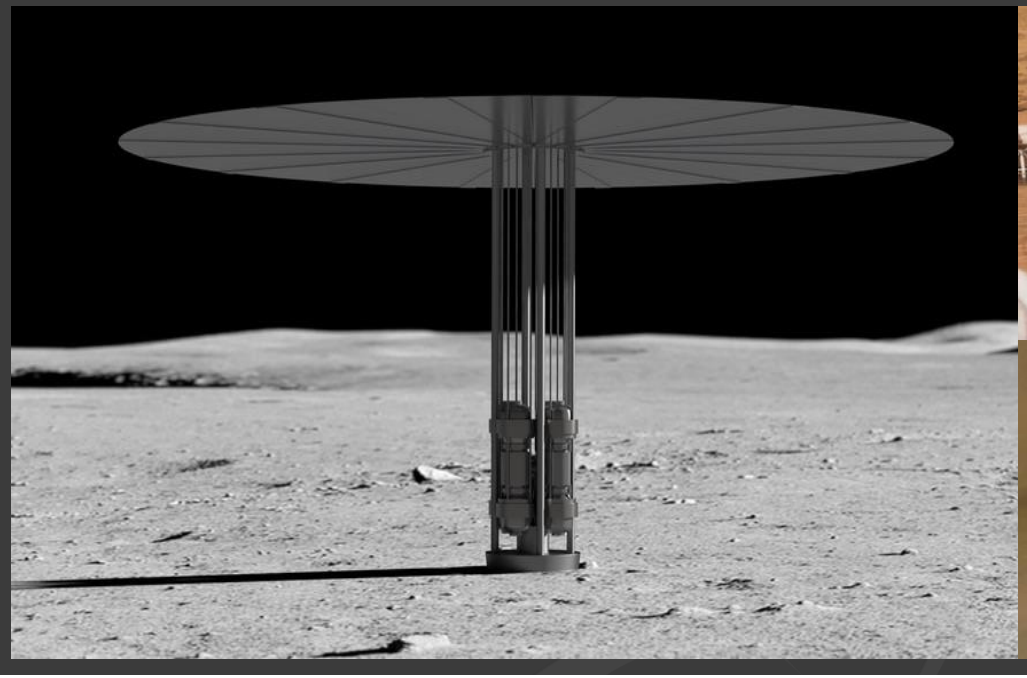


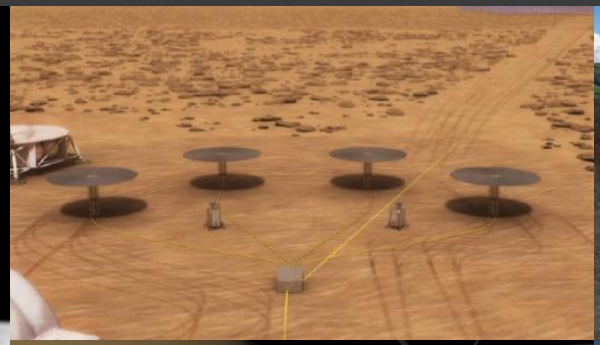


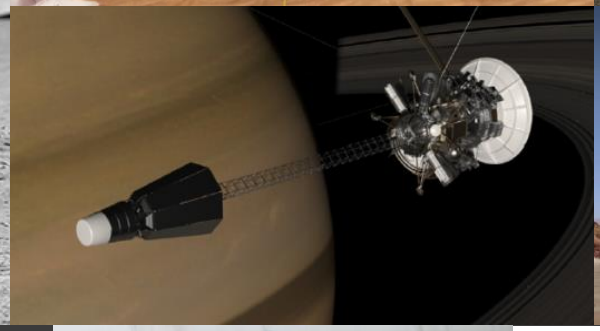
우주 원자력 기술의 특징
-우주 공간의 특성 상 다양한 신기술 제안
-다양한 기술이 Spin-off 되면서 기술 혁신 및 발달
-뉴스페이스 시대를 맞아 우주 원자력 활성화로 발달된 기술을 활용한 우주 원자력 실증 가속화

결론 및 제언

- ❖ 우주 분야 국제 협력 참여를 위해서는 자체 개발이 필수
  - No Fund Exchange, No Technology Exchange
- ❖ 시스템 개발과 요소기술 개발 분리 필요 (최대한 입증 기술 활용)
- ❖ 방사성동위원소 발전시스템은 현재 국내 달탐사 계획에 기여 예정
  - 국내 초우라늄 원소 취급 불가능: Pu-238, Am-241 수입 필요
- ❖ 핵분열발전시스템의 경우 대부분의 기반 기술이 개발되었고, 향후 SMR 개발을 통해 개발되는 기술의 우주 원자로 적용이 가능할 것으로 기대 (10년내 지상 실증 가능), '30년대 중반 달기지용 전력원 공급 가능, **국내 우주 탐사 전략 고려 필요**
  - 미국 설계요건을 만족하는 40 kWe 용량의 달기지용 핵분열발전시스템
  - 원자력-수전해-수소연료전지-ISRU 등을 포함하는 통합에너지시스템 (kWe급)
  - kWe급 심우주탐사 원자력전기추진우주선
- ❖ 우주 원자력 전력의 경우 지상실증은 원자력 R&D 주도로 이후 개발은 우주 사업으로 수행
  - 기존 KARPA 해양 원전 개발 사례 적용도 가능(예: 원자력 주도, 해양수산부 일부 투자)
- ❖ 원자력 추진은 우주/추진 분야와의 융합연구로 우주청 주도의 국내 독자 개발
  - 우주선 개발이 병행 요구, 핵연료와 같은 요소기술은 원자력분야에서 개발 필요
  - 원자력전기추진은 비경수형원자로 기술 활용 가능







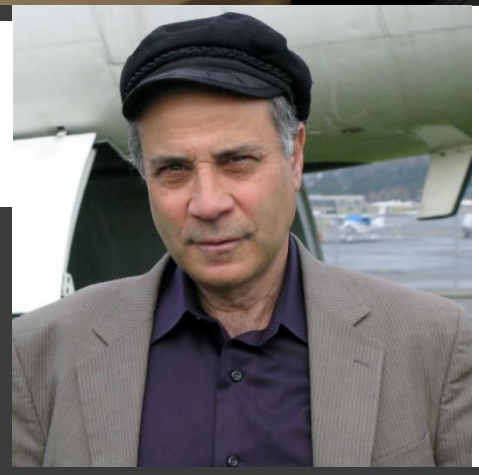
원자력-항공우주 협력으로 뉴스페이스 시대 이끈다

입력 2023.05.02. 오후 3:14 기사원문

박희윤 기자

현대차그룹, '달 탐사 전용 로버(Rover)' 개발모델 제작 착수

현대차그룹은 지난해 7월 탐사용 로버 개발을 위해 ▲한국천문연구원(KASI) ▲한국전자통신연구원(ETRI) ▲한국건설기술연구원(KICT) ▲한국항공우주연구원(KARI) ▲한국원자력연구원(KAERI) ▲한국자동차연구원(KATECH) 등 국내 우주 분야 6개 연구기관과 다자간 공동연구 협약(MOU)을 체결한 바 있다.



서울경제

"원전 강국 韓, 우주산업 잠재력 충분"

입력 2022-05-23 18:01:17 수정 2022.05.23 18:01:17 한동훈 기자

[미리보는 서울포럼 2022]
■기조강연자 '로버트 주브린 화성협회장' 인터뷰
"아직 규칙 없는 '우주 개척' 시대
압도적 K원전 중추적 역할할 것
컨트롤타워·민간육성 체계 필요"

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

감사합니다.

김찬수 / kcs1230@kaeri.re.kr