

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원

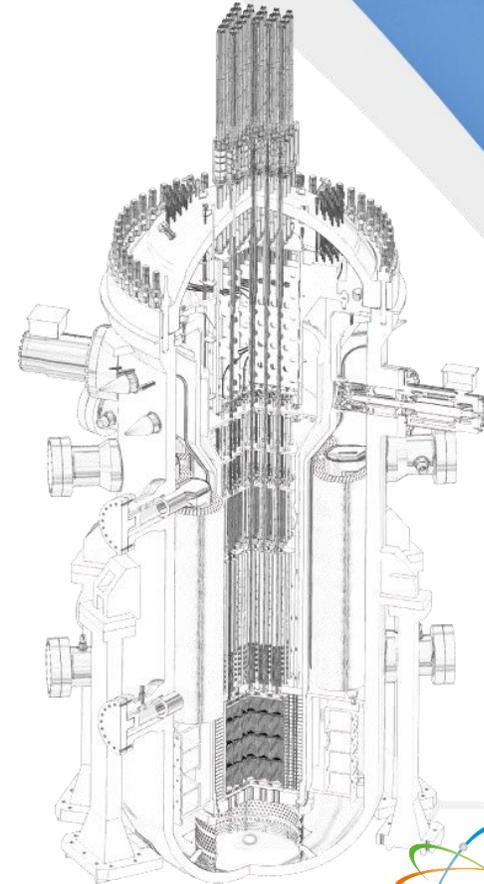


우주용 원자로 개발 현황 및 전망

10/25/2023

한국원자력학회 2023 추계학술대회
혁신 원자력 시스템의 개발 현황 및 전망

한국원자력연구원 김찬수



더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



- 01 우주 원자력 필요성
- 02 국내외 정책 동향
- 03 우주 원자로 개발 현황
- 04 우주 원자로 핵연료 및 노심재료
- 05 맺음말

CONTENTS

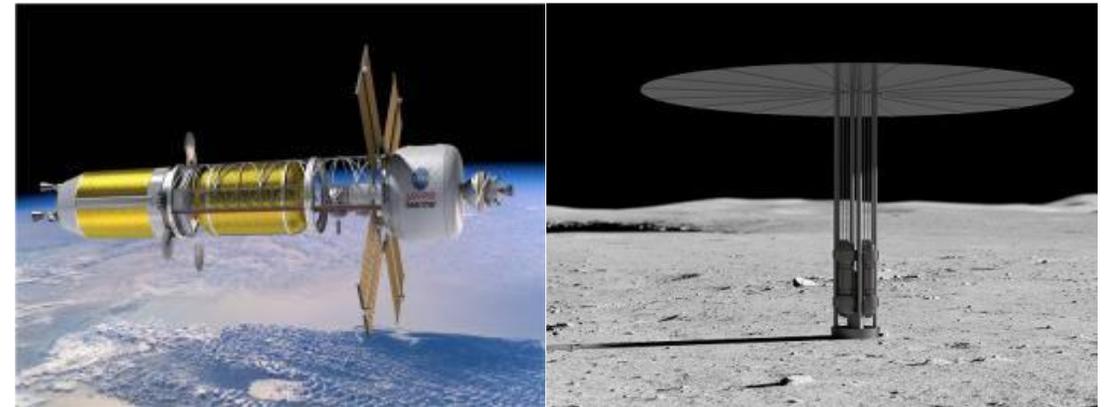
01 뉴스페이스 시대와 우주 원자력

- 미 스페이스 X社의 재사용 로켓 개발 성공을 기점으로 뉴스페이스 시대(New Space Era)의 본격적인 도래
 - 군사적 목적, 국가 위상 제고 → 민간 주도 상업 우주 개발
 - 국내산업체 참여: 한화에어로스페이스, KAI, 현대자동차 등 국내 기업의 우주산업 참여



우주 관광
심우주 탐사
행성/위성 탐사
우주 수송
달/화성기지
우주 거주 시설

Source: 블루오리진, NASA, USNC, ESA, SpaceX

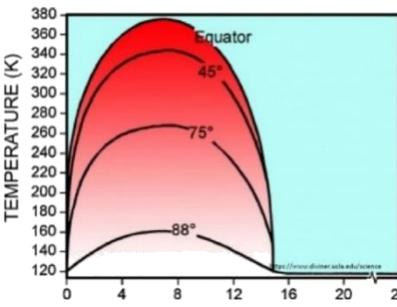
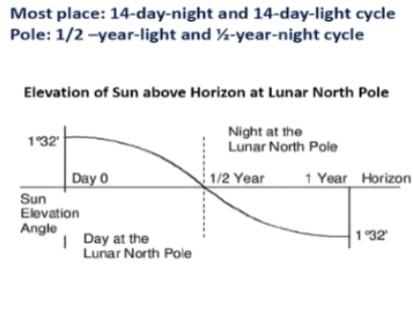
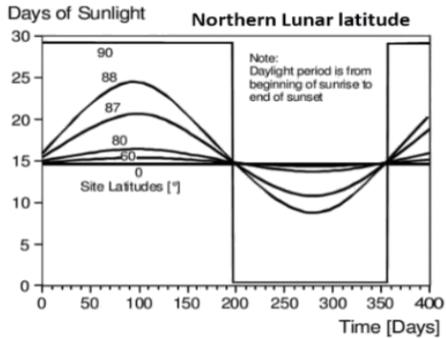


원자력 **전력** 및 추진
→ **안정적 전력생산**
→ **이동시간 단축**

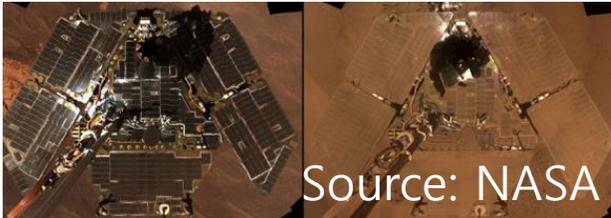
Source:
NASA

02 우주용 원자력 에너지원의 필요성

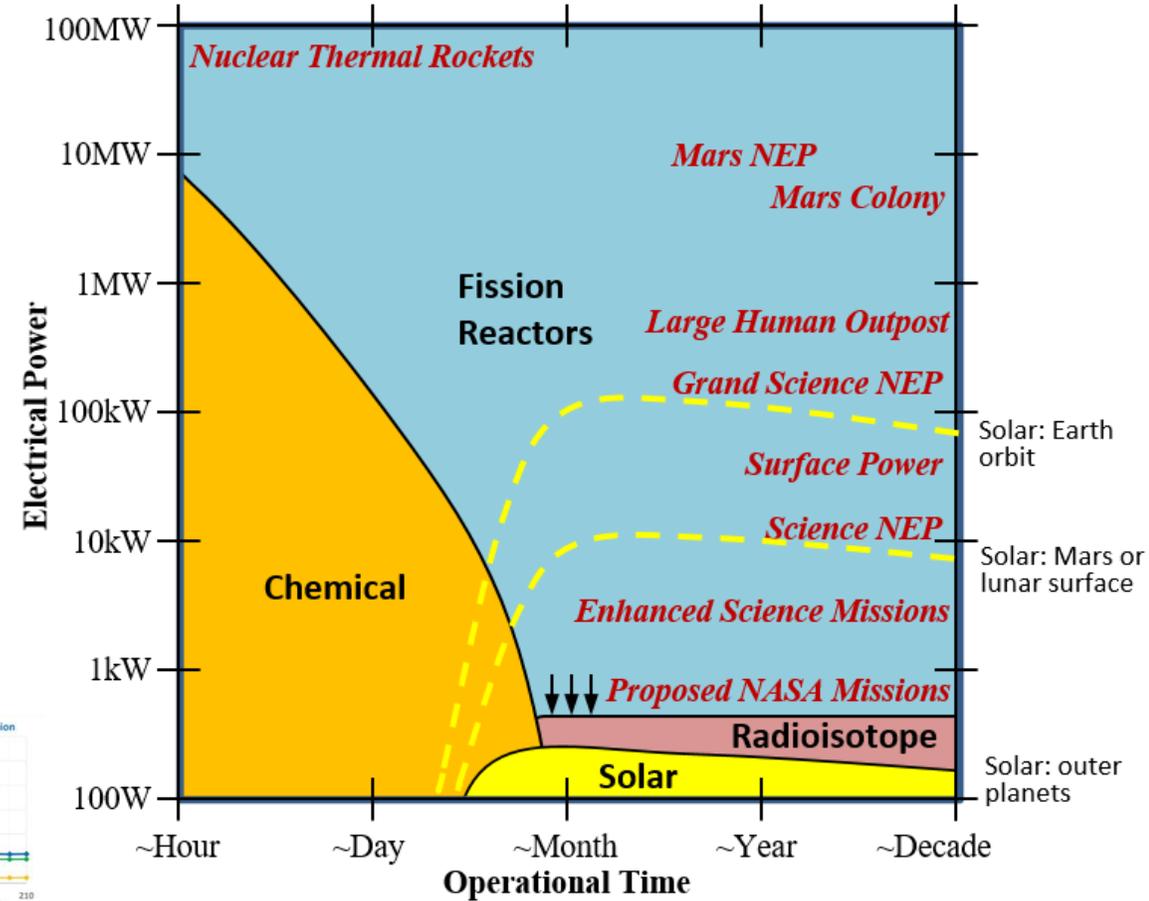
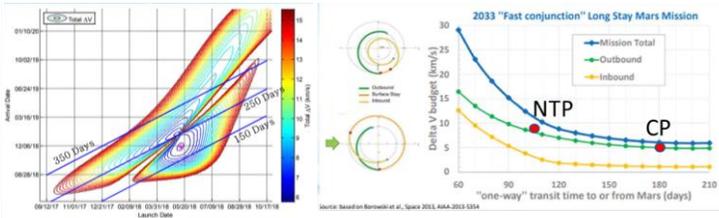
에너지원	에너지밀도	최대 열출력
LH ₂ -LO _x 연소	13 MJ/kg	공학적 설계
Pu-238 붕괴열	2.1 × 10 ⁶ MJ/kg	0.54 kW/kg
U-235 핵분열	82 × 10 ⁶ MJ/kg	공학적 설계
D-He3 핵융합	354 × 10 ⁶ MJ/kg	공학적 설계
Antimatter	90 × 10 ⁹ MJ/kg	공학적 설계



Elrod, 1995; Heiken, 1991



Source: NASA



Qualitative Regimes of Space Power Applicability

Source: DOE, NASA, D. Poston Studies

G. L. Bennett (2021)

- 태양 거리, 입사각, 환경에 독립적인 에너지원
- 장수명/안정적 고출력 경량화 에너지원
- 고 비추력 제공, 우주 탐사 임무 유연성 증진

03 국제 우주 원자력 관련 동향

UN COPUOS

- 지구 궤도 군사위성용 원자로 위주의 UN 원칙 (1992) 검토
- 우주 원자로 상업화에 대비한 기존 원칙 개정 요구 (미국, 유럽)
- IAEA와 협력하여 뉴스페이스 시대에 맞는 우주 원자력 안전 기준 도출 준비
 - 우주 기지용 원자력 발전, 원자력 추진 우주선 관련



국제우주탐사조정그룹

- '20년 10월부터 원자력 전력 및 추진 관련 국제 기술 격차 분석
- 국제 유인 우주 탐사를 위한 원자력 전력/추진 기술 개발 관련 국제협력 모색

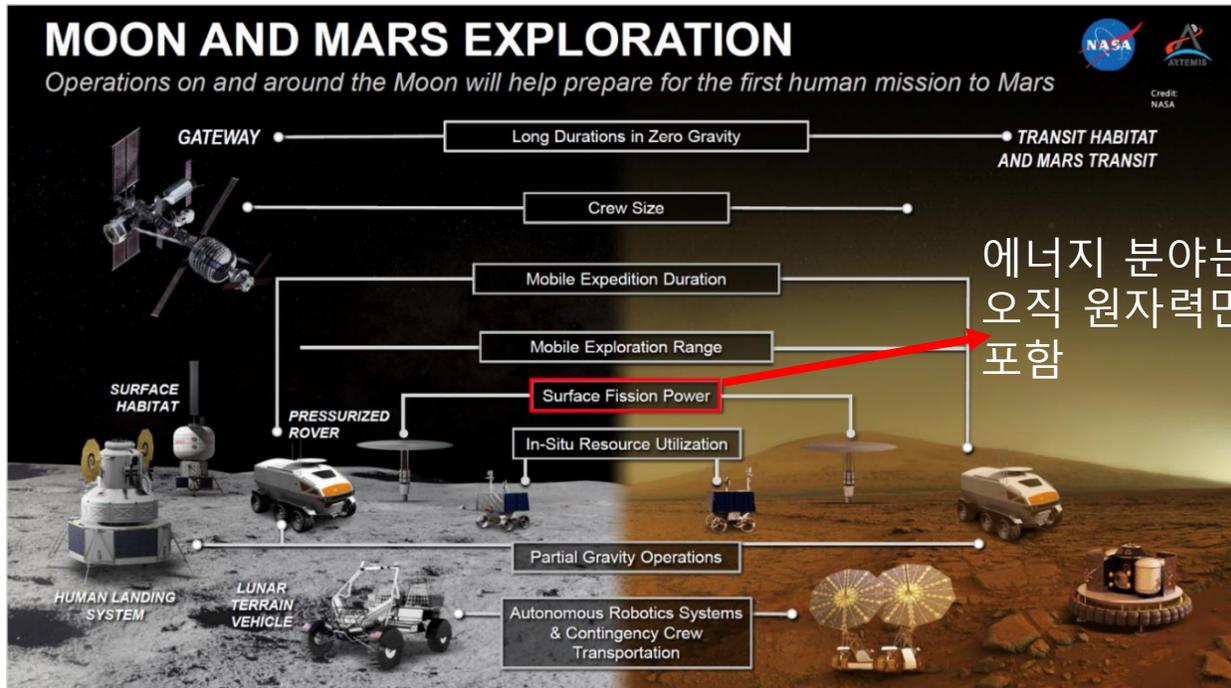


04 미국의 우주 원자력 정책

- NSPM-20 (Launch of Spacecraft Containing Space Nuclear System, '19)
 - 발사승인과정(3 Tired Approach)
 - Tier I(소형 RHU), Tier II (대형 RPS, LEU 원자로), Tier III (HEU 원자로, 리스크 초과 원자력시스템)
 - 발사승인 기관: 상용 (DOT), 과학탐사용(NASA), 국방용(해당 부처장, DOD 등)
 - 안전 지침(위험도 기반 접근), 안전 분석 및 검토 (NASA INSRB의 SAR 검토)
- Presidential Space Policy -6 ('20)
 - 미 백악관이 발표한 우주 원자력 전력 및 추진 기술에 대한 국가전략
 - 대상기술: 고성능 RPS(원자력전지), FPS(원자로), NTP(열추진), NEP(전기추진)
 - 정책집행주체: 미국내 유관 부처(NASA, DOE, DOD) 및 **유관 산업체**
 - **미 국무부 동의 하에 국제협력 파트너의 참여기회 오픈**
 - 고농축 우라늄 대신 저농축 우라늄 사용 권고
- Presidential EO 13972 (국가 안보와 우주탐사를 위한 SMR개발 진흥, '21)
 - kW(로버 탐사), ~100kW(인류 거주, 달/화성 탐사), MW(장기간 심우주 탐사)
 - **HALEU 핵연료 공급, 공통기술개발로드맵(DOS, DOD, DOC, DOE, and NASA)**

05 아르테미스 계획 및 협정

- ❏ '17년부터 시작된 미국 주도 국제 달탐사 프로그램 및 회원국이 준수해야할 원칙
- ❏ 한국의 아르테미스 약정 가입 ('21년 5월 27일)
 - 미국, 유럽, 일본, 한국 포함 25개국 참여
 - 국제 유인 우주 탐사 계획에서 한국 역할 증대 추구



에너지 분야는
오직 원자력만
포함



06

한국의 제4차 국가우주개발진흥기본 계획

우주 탐사의 핵심목표

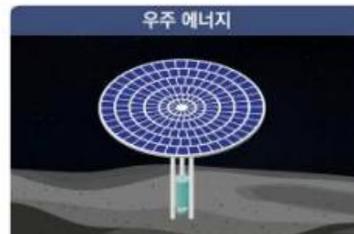
- 달 착륙(~'32년), 화성궤도선(~'35년), 화성 착륙(~'45년)
- 달표면 기술 시연(~'35년), ISRU 기반 달기지 건설('35년~)

우주 탐사 추진전략

- 달, 화성 탐사의 독자적 역량 확보와 동시에 국제협력을 통한 ISRU 달기지 건설 활동 시작



연도	주요 임무
2027	무인 궤도선/착륙선
2032	달 착륙
2035	화성 궤도선
2045	화성 착륙



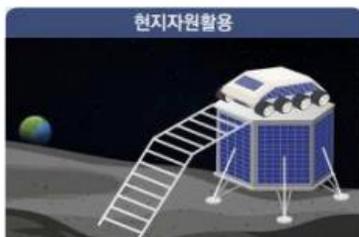
- 지구↔달 수송선
- 심우주 원자력 추진

- 현지자원 활용 3D 프린팅 시공 기술
- 태양광 차폐 기술
- 기지 환경 및 상태 모니터링 기술
- 생활 폐기물 재활용 기술

- 소형모듈원자로(SMR) 에너지 기술
- 수소 기반 에너지 기술



- 수소연료 기반 모빌리티



- 얼음/물 → 수소 생성 기술

4차 기본계획 상의
달 탐사와 관련된 임무 요소

- 지구↔달 초고속 인터넷 기술



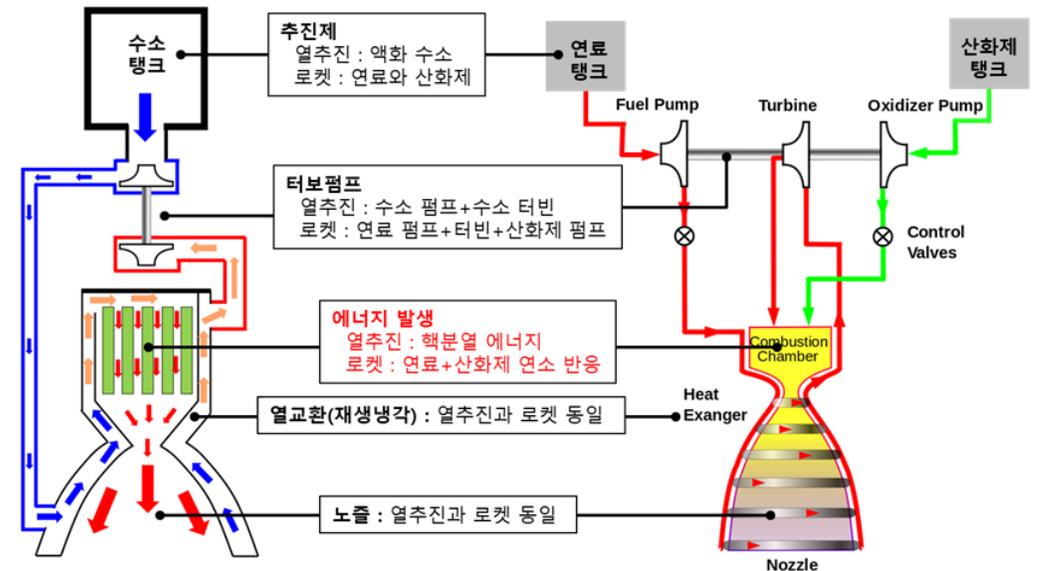
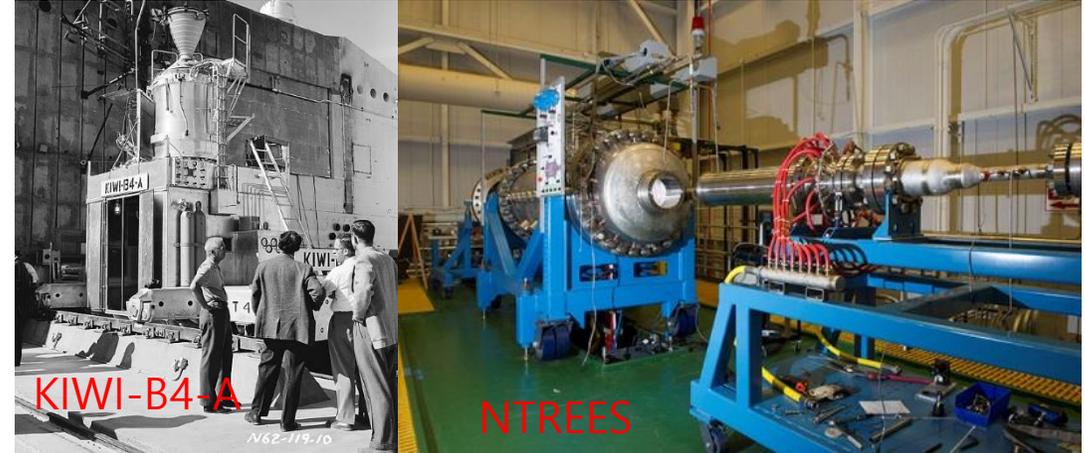
07 원자력 열추진

기술포개

- 극저온의 액체수소가 원자로에서 발생한 열을 통해 3000°C 이상의 초고온 기체 상태로 바뀌면서 우주선이 추진력을 얻는 방식
- 기존 화학 추진에 비해 더 큰 추진력, 더 적은 비용, 운전 유용성이 커서 대용량의 화물수송이나, 장거리 유인 우주선에 적합

국외연구현황

- 미국과 러시아가 원자력열추진 시스템 개발 주도
- LANL을 중심으로 1950년대부터 원자력열추진로켓을 개발(Project Rover): 1970년대에 중단
- 최근 NASA Marshall Space Flight Center(MSFC) 주도로 원자력 열추진 로켓 설계 및 추진체 실증 연구 등을 수행
- NASA MSFC는 1MW급 원자력열추진 환경 모의 실험시설 (NTREES) 구축
- NASA와 국립연구소들은 원자로 개념, 핵연료 및 품질관리전략도 병행하여 개발

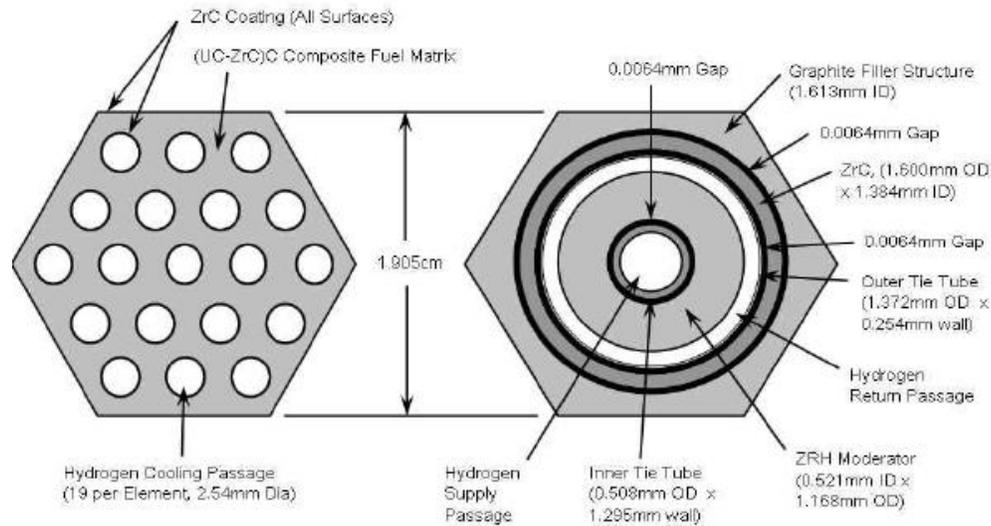
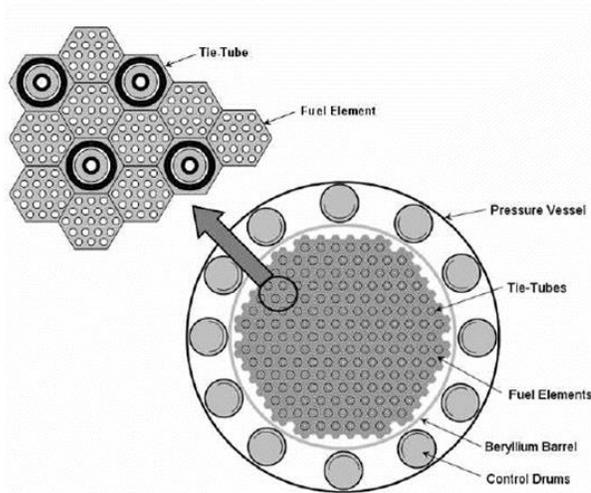
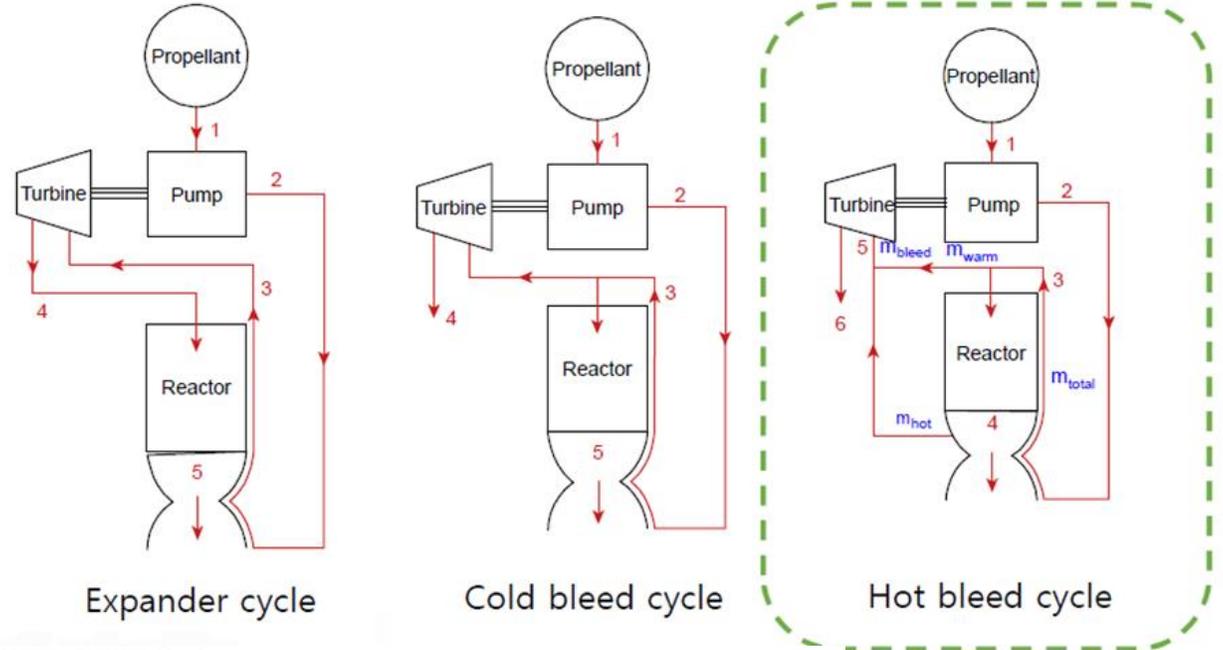


원자력 열추진 시스템 구성

- 추진제 탱크, 터보펌프+터빈
- 재생 냉각유로, 밸브
- 압력용기, CD노즐

원자로 노심

- 핵연료, Tied Tube
- 배럴, 반사체, 제어드럼



Source:
Principles of Nuclear Rocket Propulsion
William Emrich, Jr., Senior Engineer, NASA/Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL, USA
Elsevier, Butterworth-Heinemann, ISBN: 978-0-12-804474-2

09

핵분열발전시스템 개발 현황

- 미국은 SNAP10A 이후 우주용 원자로 개발만 진행
 - (연구비 문제로 프로젝트 중단)
- 러시아는 지구저궤도 군사위성으로 37기의 고농축우라늄(HEU) FPS 활용 (수명 1년)
- 미국은 NASA와 LANL의 KiloPower 과제의 일환으로 지상실증 시험 KRUSTY 성공('18년)
 - '60년대 SNAP 프로그램 이후 미국 최초의 지상실증 우주용 원자로 (노형은 HPR)
- 미국 NASA는 '28년 달기지 실증을 목표로 40kWe급 FPS 개발 및 미국 내 산업체 참여 독려
 - 100kWe 이상의 대용량 FPS도 미국 산업체(USNC, GA, Radiant 등)이 개발
- 중국도 달기지와 화성 전기추진 우주선을 위해 HPR 개발 중
- 영국 Rolls&Royce, 프랑스 CEA는 달기지용 HPR 개발
- 캐나다도 달기지용 원자로 개발 중



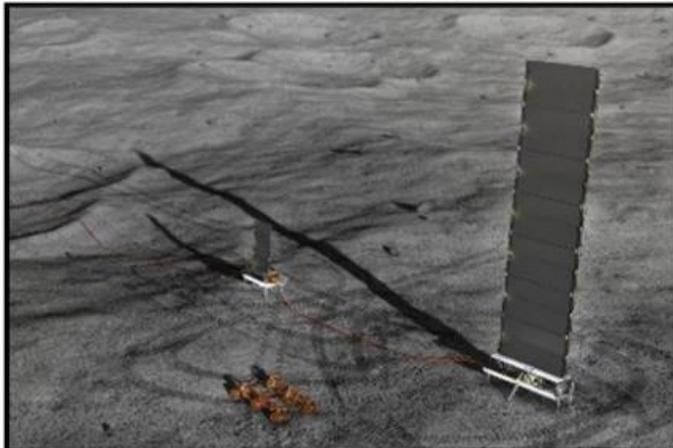
NASA의 KiloPower과제 및 KRUSTY 지상실증 시험



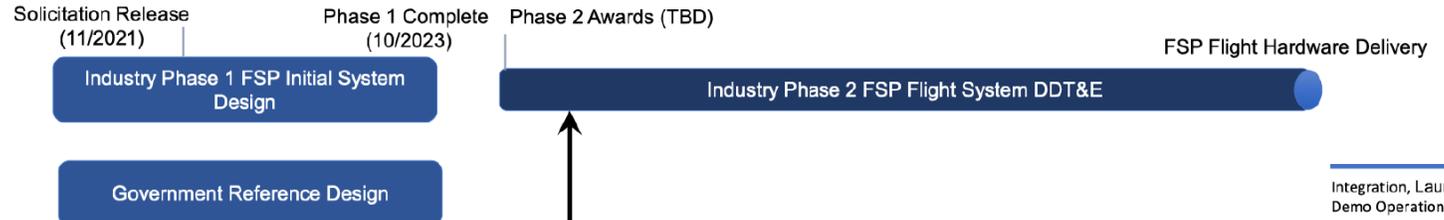
영국 Rolls & Royce의 히트파이프 원자로
 → 영국 산/학/연 협력
 → 히트파이프 냉각
 → 질소 브레이튼사이클
 → 피복입자핵연료

10

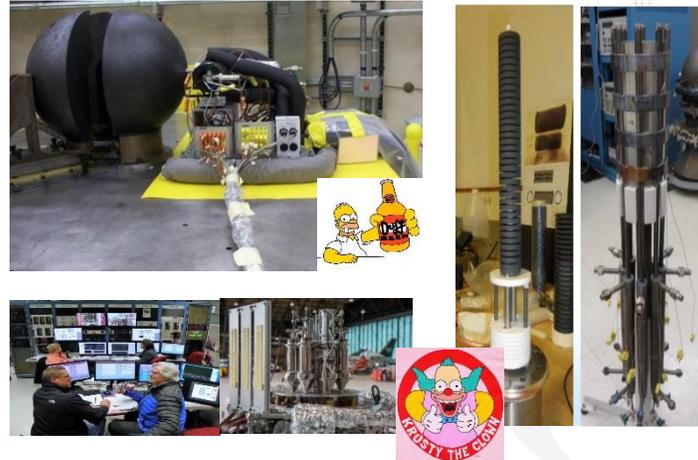
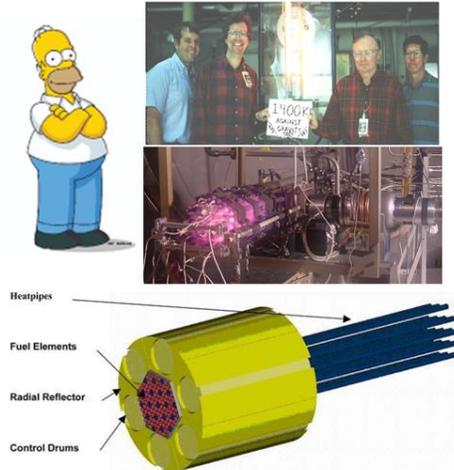
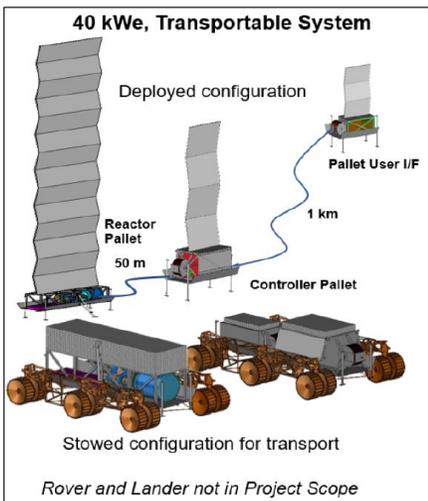
미국 NASA의 달기지용 핵분열발전시스템 개발



Power: 40 kWe scalable to higher power
Mobility: Capable of being transported
Mass: less than 6,000 kg
Life: 10 years



Nuclear and Non-Nuclear Technology Maturation

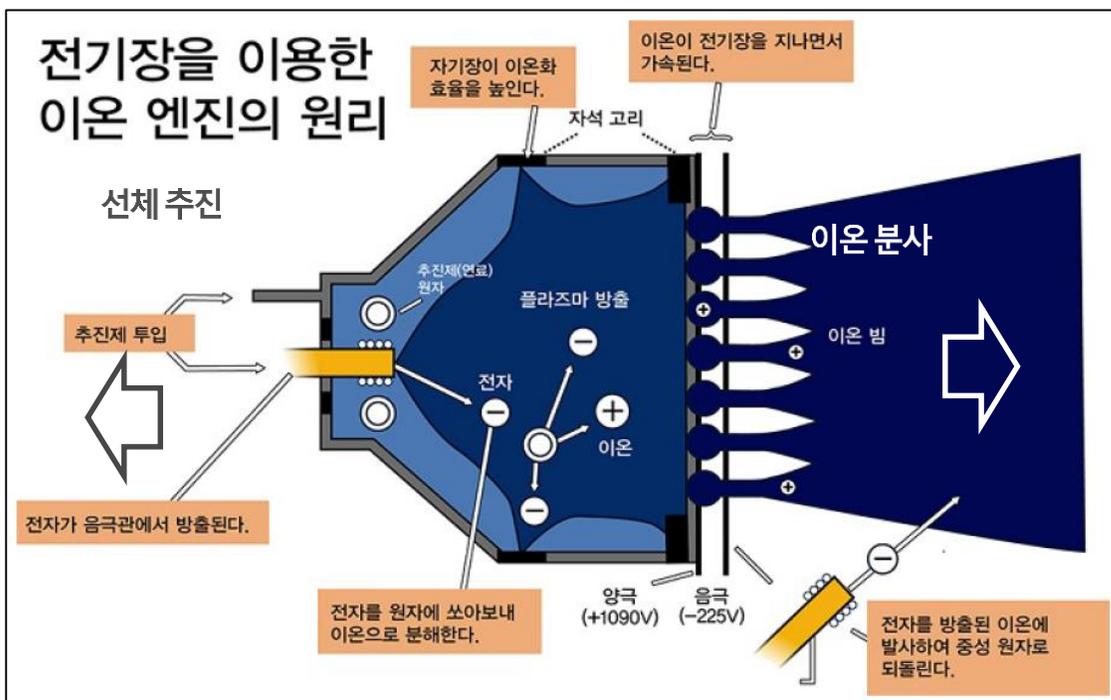


Source: NASA, LANL, WEC

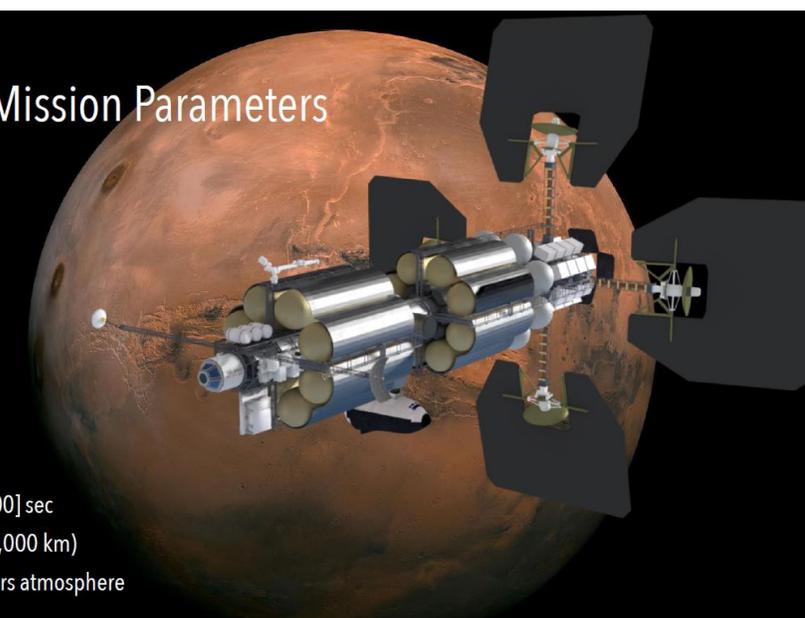


11 원자력 전기추진

- ❑ (정의) 플라즈마 이온 분사로 선체에 추력 제공
- ❑ (추진 방식 간 비교) 전기추진(낮은 추력, 월등한 비추력), 원자력열추진(높은 추력, 해외 R&D 성숙도 높음),
- ❑ (국내 현황) 1kW 이하 전기 추력기 상용화, 스페이스 파이오니어 사업으로 5kW급 전기추력기 개발
- ❑ (미국 현황) NASA의 Lunar Gateway용 수십kW급 전기추력기 개발, 화성 유인탐사 원자력전기추진우주선 개발
- ❑ (중국 현황) 화성탐사 원자력전기추진 유인 우주선 개발 ('33년 발사 목표), 511일 왕복, 30일 화성 거주



Notional NEP Mission Parameters

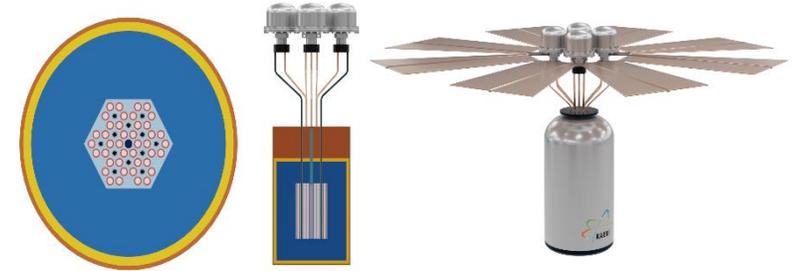


- Departure date: May 20, 2035
- Payload: 62 t
- Stay on Mars: 30 days
- Tank/Propellant ratio: 10%
- Power: 40 MW
- System efficiency: 70%
- Total specific mass: 2 - 4 kg/kW
- Departure: $IM_{L1} = 300 - 600$ t
- Variable I_{sp} range: [2000; 30,000] sec
- Arrival: Medium Mars Orbit (20,000 km)
- Relative velocity: 10 km/s at Mars atmosphere

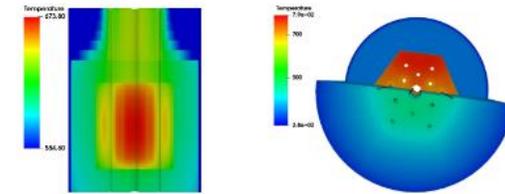
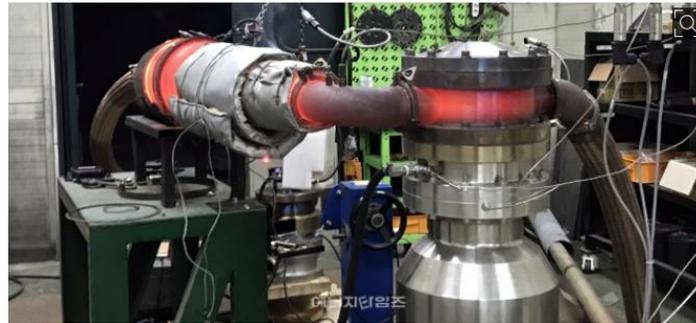
NEP, Ad Astra의 화성탐사용 원자력전기추진 우주선(Source: Ad Astra)

12 국내 히트파이프 원자로 기술

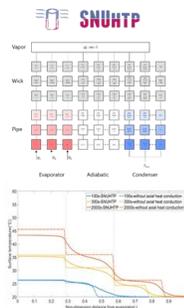
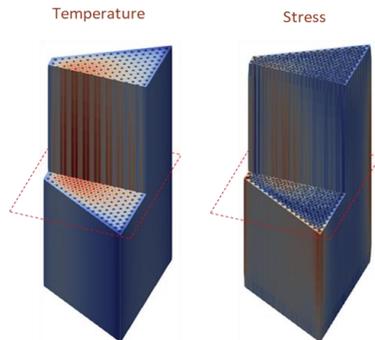
- ❑ KAERI는 '19년부터 착수된 원자력융복합기술개발사업을 통해 원자로 설계기술 확보
- ❑ 세계 최초 급합가공 가능한 소듐히트파이프 열성능 입증
- ❑ 스텔링엔진 및 방열판 기술은 국내 산업체와 대학이 보유
- ❑ 핵연료 및 노심구조물 기술은 국내 SMR 요소기술 최대 활용
- ❑ 서울대학교, UNIST, KAIST, POSTECH은 HPR 기초 연구 수행



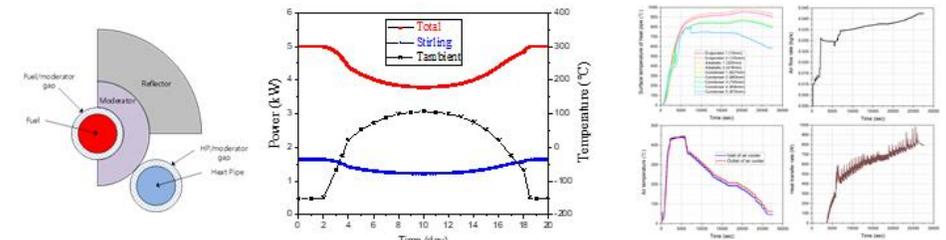
국내 스텔링엔진



PRAGMA OpenFOAM ANLHTP



1. Multiphysics Analysis System for Heat Pipe Cooled Micro Reactors Employing PRAGMA-OpenFOAM-ANLHTP, Nuclear Science and Engineering, 2023
2. Multiphysics analysis of heat pipe cooled microreactor core with adjusted heat sink temperature for thermal stress reduction using OpenFOAM coupled with neutronics and heat pipe code, Frontiers in Energy Research, 2023



14 원자로 농축도 및 핵연료

■ 농축도

■ HEU (>90wt%)

- 고속로 노심, 고 중성자속, 작고 단순한 노심 설계
- 열팽창에 따른 반응도 피드백

■ HALEU (<20wt%)

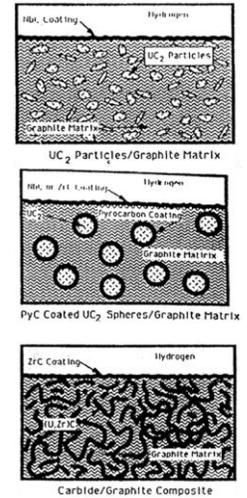
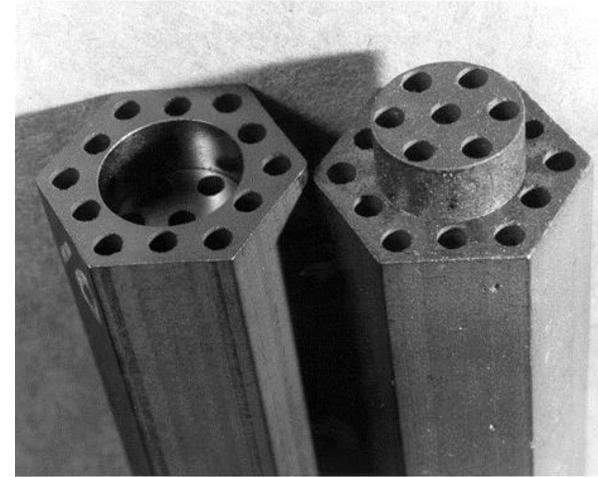
- 고속로: 단순한 설계, 두꺼운 반사체 요구, 열팽창에 따른 반응도 피드백
- 열외중성자로: 감속재 필요, 도플러 효과에 따른 반응도 피드백, 감속재에 따른 작동온도 결정

■ 핵연료

- UN: 고밀도, 고열전도도, 작은 노심, 낮은 작동온도, 불안정성, 어려운 제조
- UO₂: 상용화 핵연료, 단기간 내 인허가 가능
- UZrH: 매우 빠른 음의 반응도 피드백, 짧은 수명
- UMo: 작은 노심, 고온 온도
- TRISO: 열외중성자로, 안전성, 상대적으로 큰 노심, 복잡한 노심 설

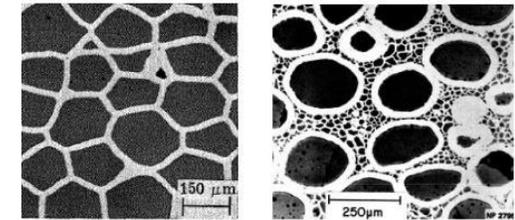
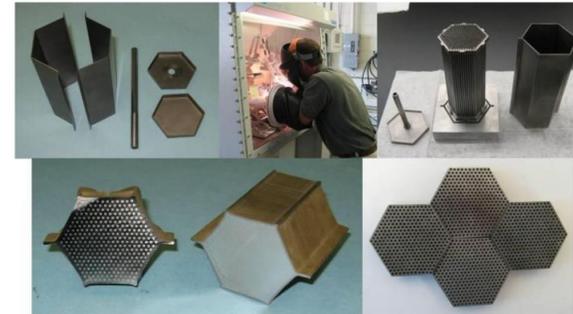
NERVA/ROVER 탄소 기반 핵연료

- 20개 원자로 지상 성능 시험을 통해 원자력열추진 구현성 검증 (TRL 5~6 수준)
- UC2 핵연료 입자/흑연기지/외부 NBC 코팅: 열응력 및 충격에 의한 NbC 코팅층 손상
- PyC 코팅 UC2 핵연료 입자/흑연기지/외부 ZrC코팅: ZrC 코팅층 손상 감소, 요건 불충족
- (U,Zr)C/흑연 복합체: 109분 장기 운전 경험, 최대온도 2450K
- UC-ZrC 탄화물 핵연료: 고융점을 위해 우라늄 농도 저하 필요, 제조 기술 및 물성치 확보 필요



CERMET 핵연료

- 탄소 기반 핵연료 대비 핵연료 부피분을 증가
- 열전도도, 내수소침식성 및 고온강도 우수
- 고농축우라늄 핵연료에 유리
- 조사시험자료는 주로 저온에 국한됨
- 3270K(1시간) 시험 후 핵연료 휘발에 의한 노심-피복 결합 손상 발견



W - light phase, UO2 - dark phase

피복입자핵연료

- 고온가스로 기술 기반 핵연료 단위부피당 표면적이 높고 열응력이 낮음
- 현재 핵연료 중 이용가능성이 가장 높은 수준의 기술/자료 축적
- DARPA DRACO 과제는 TRISO 명시
- 초기 UC, UN 장기적으로 혼합탄화물 핵연료 이용



16 피복재 및 반사체



피복재 선정 기준

- 기계적 특성 (강도, 연성)
- 열물리 특성 (열팽창계수, 열전도도 및 열용량)
- 중성자 특성 (흡수단면적)
- 재료 양립성 (냉각재, 물질이동)
- 조사저항성
- 제작성 및 인프라
- 재료성능 데이터베이스
- 밀도 (경량화, 소형화)

	SS	Ni-Alloy	NbZr	Mo44Re	TZM(Mo)	W	SiC
Reasonable Temperature Limit	1000 K	1150 K	1400 K	1550 K	1600 K	1800 K	???
Fabricability	++++	+++	++	+	-	-	-
Experience /infrastructure	++++	+++	+	-	-	-	-
Materials database (incl. nuclear)	++++	++	+++	-	+	-	-
Cost	++++	+++	+	-	-	-	-
Availability (stock and vendor)	++++	+++	+	-	+	-	-
Cold ductility (launch/shipping loads)	++++	+++	++	+	-	-	-
Oxidation resistance	++++	+++	---	-	-	-	+++
Heat pipe performance, experience	++++	+++	+	+	++	-	-
Na and/or K compatibility	+++	++	+	++	+++	+	-
Density	++	+	++	-	+	-	++++
Thermal conductivity	-	-	-	-	++	+++	+
Neutronic performance (nominal)	+++	+	+	-	+	-	++++
Neutronics (water immersion)	-	-	-	+++	++	+++	---



반사체 선정 기준

- 낮은 밀도
- 높은 고온 안정성 및 열전도도
- 큰 중성자 산란 단면적과 작은 흡수단면적
- 후보재료 Be: 우수한 차폐효과 및 조사팽윤 저항성 (800K 이하)
- 후보재료 BeO: 출력평탄화에 유리 (1000K 이상 고온에서 조사팽윤 저항성)

Advantages of Be

- Lower mass density
- Easier fabrication
- Better structural material
- Higher conductivity at high temperatures
- Less potential for cracking, swelling
- More neutron moderation

Advantages of BeO

- Higher macroscopic scattering
- More chemically inert
- Higher temperature potential
- Higher conductivity at low temperatures
- Better shielding effect
- Less neutron moderation

17 감속재

- **감속재 선정 기준**
 - 동일 농축도 조건에서 핵연료 장전량 현저히 감소 (경량화 용이)
 - 낮은 중성자속을 위한 큰 핵분열단면적
 - 중성자 누설율이 낮아 반사체 및 차폐체 질량 경감
 - U-Z-H, 탄소기반 핵연료 사용 시 감속 용이
 - 감속재 기능 유지를 위해 추가적인 냉각시스템 필요 (비용, 일정, 신뢰성)

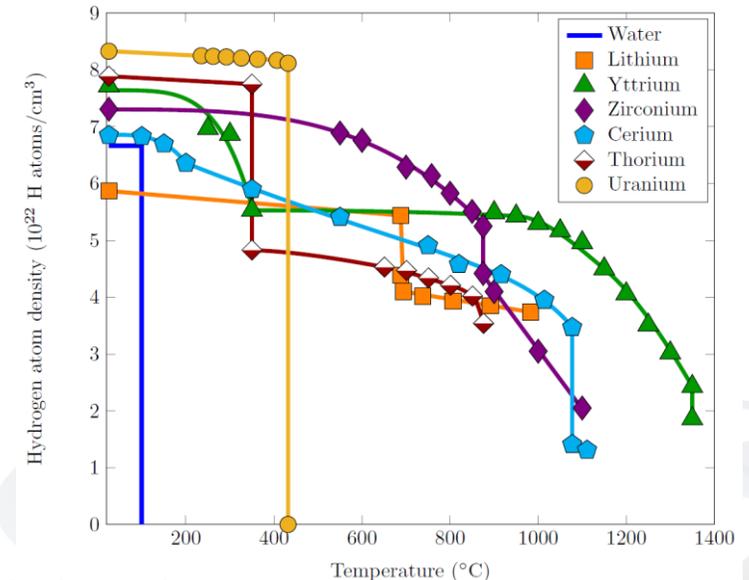
- **ZrH, YH**
 - 감속능 뿐만 아니라 경량화, 소량화 용이
 - 감속능 (수소비 : 1.6~2.0)은 ZrH가 우수
 - 온도에 따라 수소 손실율은 지수적으로 증가
 - 수소 손실 방지를 위해 냉각 및 cladding/liner 혹은 코팅 필요 (ZrH : 950K, YH : 1100K)

■ **LiH: ZrH보다 감속능이 우수하나 사용온도가 낮음**

■ **흑연: 소형화에 비효율적**

- **Be, BeO**
 - 감속블럭 등을 통해 충분한 두께가 확보되면 사용가능

Hydride	H density		Hydride density [g/cm ³]	Slowing-down power	Moderating ratio
	[10 ²² atoms H/cc]	[gH/cm ³]			
TiH ₂	9.1	0.152	3.78	1.85	6.3
ZrH ₂	7.3	0.122	5.62	1.45	55
LiH	5.8	0.095	0.78	1.2	3.5
YH ₂	5.8	0.097	4.3	1.2	25
ThH ₂	4.9	0.082	9.5	1.0	5.2
H ₂ O	6.6	0.110	0.98	1.35	70
ThZr ₂ H ₇	7.7	0.129	7.75	1.55	14
ThTiH ₆	8.8	0.147	(8.15)	1.8	6



18 NASA 참조 설계 요건 및 핵연료

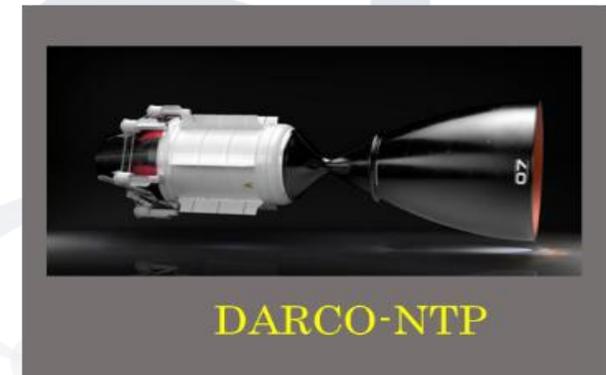
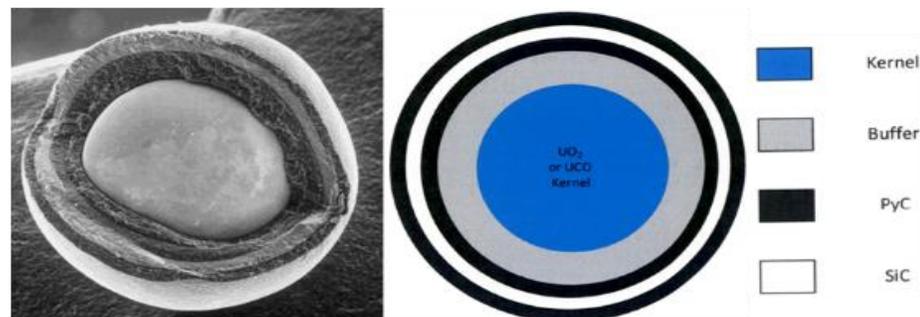
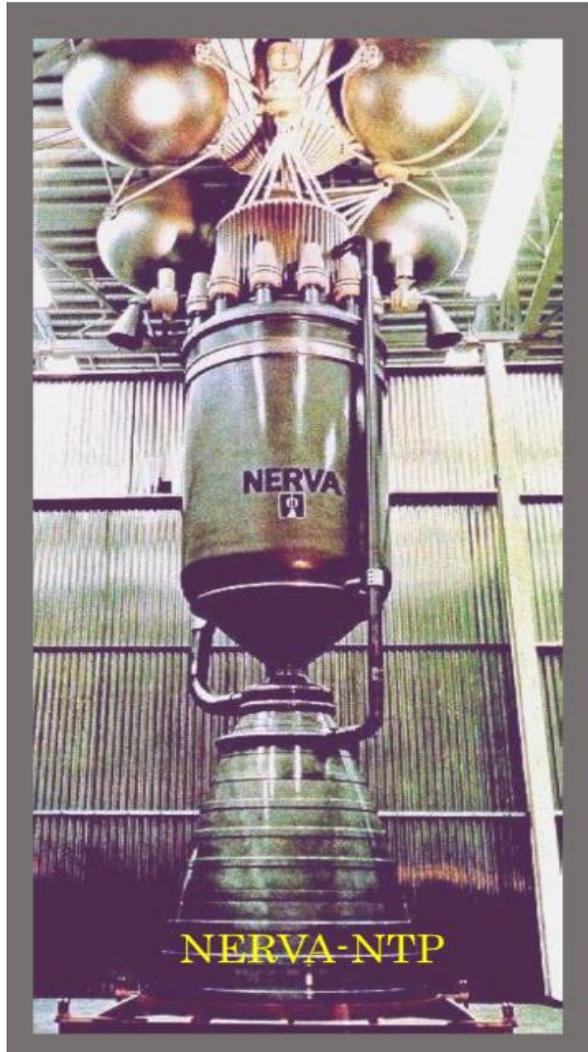
	핵분열발전시스템	원자력열추진	원자력전기추진
열출력	50 kWth	500.0 MWth	10.0 MWth
출구온도	1200 K	2700 K	1200 K
냉각재	Na 히트파이프	수소	Li or HeXe
운전 시간	10 년	10 시간	5년
현재 핵연료 및 DB	UO2 펠렛	UC2-흑연 매트릭스 (Rover/NERVA 흑연 매트릭스)	UN 펠렛
	가동 원전 및 과거 우주 원자로 개발 관련 DB 구축	2500K까지 과거 원자력 열추진 개발 시 DB 구축	SP100 프로그램 개발 시 관련 자료 DB 구축
미래 핵연료 및 DB	AGR TRISO in 흑연	개량된 피복입자핵연료 in 흑연 혹은 ZrC (CERCER with 개량된 피복입자핵연료)	개량된 피복입자핵연료 in 흑연
	고온가스로 개발 관련 AGR 프로그램	제한된 시험자료 (몇몇 핵연료와 대리 시험자료)	피복입자핵연료 관련 제한된 시험자료 (AGR로 불충분)

19 피복입자핵연료의 Spin in & Spin off

1950s~1970s

1960s~2010s (HTGR)

2020s



맺음말

- 미국은 우주 원자력에 현재 가치로 총 18.4 B\$ 투자
 - 27기의 지상실증시험
 - 원자력 열추진 20회, SNAP 프로그램 6회
 - 1기의 비행 시험 (SNAP10A)
- 시스템과 핵연료/재료 동시 개발 시 프로그램 비용 증가로 개발 실패
- 핵연료와 재료 혁신 없이 설계 혁신 불가능
 - 핵연료 및 감속재 개발 필요
 - 원자로 설계요건에 맞는 피복입자핵연료
 - 원자로 운전조건에 적합한 감속재
- 단기 활용 시스템은 기존 핵연료 및 재료로 실증에 주력
- 장기 개발 시스템은 핵연료/재료부터 개발

원자력-항공우주 협력으로 뉴스페이스 시대 이끈다

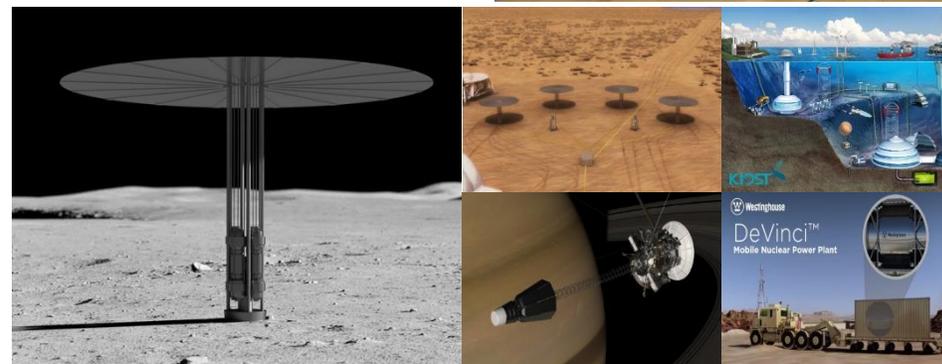
입력 2023.05.02. 오후 3:14 기사원문

원자력연, 항우연과 우주 원자력 전력 및 추진 기술 개발 MOU 체결
우주 원자력으로 K-우주시대 개막 본격화

박희운 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"

감사합니다. kcs1230@kaeri.re.kr



The image is a graphic of a NASA boarding pass for the Mars 2020 mission. On the left, there is a vertical barcode with the text 'NASAM2M BOARDING PASS: MARS 2020' and '072020'. Below the barcode is a photograph of the Mars 2020 rover on the red surface of Mars. The main body of the boarding pass is white with an orange border. It features the NASA logo and 'National Aeronautics and Space Administration' at the top left, and the identification number 'M2M270768310897' at the top right. The central text reads 'BOARDING PASS: MARS 2020' and 'CHAN SOO KIM'. Below this, there are three columns of information: 'LAUNCH SITE' (CAPE CANAVERAL AIR FORCE STATION, FLORIDA EARTH), 'ARRIVAL SITE' (JEZERO CRATER, MARS), and 'ROCKET' (ATLAS V-541). At the bottom left, it says 'SCHEDULED DEPARTURE JULY 2020'. At the bottom right, it shows 'AWARD POINTS EARNED' with two values: 313,586,649 mi / 504,668,791 km. A small icon of the rover is on the right side.

NASA National Aeronautics and Space Administration M2M270768310897

BOARDING PASS: MARS 2020

CHAN SOO KIM

LAUNCH SITE: CAPE CANAVERAL AIR FORCE STATION, FLORIDA EARTH

ARRIVAL SITE: JEZERO CRATER, MARS

ROCKET: ATLAS V-541

SCHEDULED DEPARTURE: JULY 2020

AWARD POINTS EARNED [313,586,649 mi / 504,668,791 km

MARS 2020