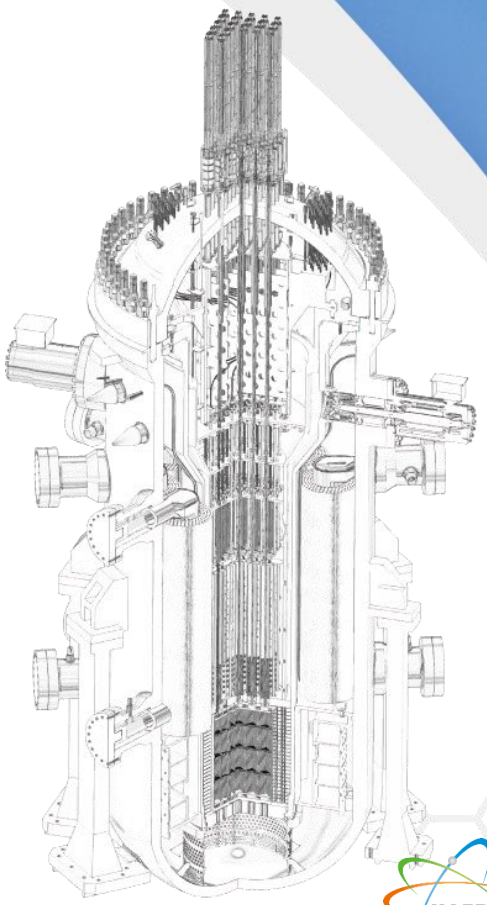
더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원

히트파이프 원자로 기술개발현황 및 사업 전망



10/25/2023, 경주 HICO
한국원자력학회 2023추계학술대회 SMR기술조사보고회

한국원자력연구원 김찬수

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

*더 나은 세상을 위한 **원자력기술***
*국민과 세계가 지지하는 **한국원자력연구원***

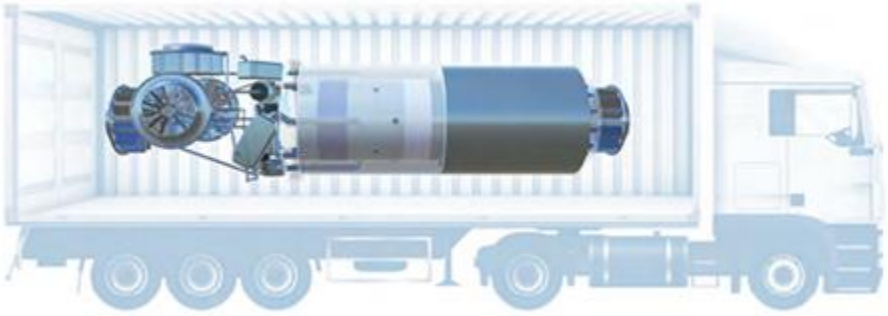
KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

CONTENTS

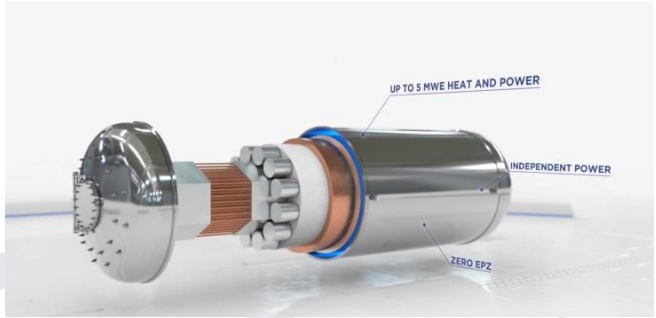
01 히트파이프 원자로 소개
02 국외 개발 현황
03 국내 현황
04 맺음말 및 향후 전망

히트파이프 원자로(HPR) 소개

- 블록형 고온가스로와 유사
  - 고체 노심의 냉각홀에 히트파이프 설치
- 원자로형
  - 열외중성자로(Epithermal) ~ 고속로(Fast)
- 냉각재
  - 히트파이프의 작동유체인 알칼리금속 (Li, Na, K, NaK)
- 중력과 전기 공급 없이 원자로 열제거
- 1차계통 펌프와 배관 제거로 단순한 원자로 설계
- 대기압 이하의 1차계통 압력, LOCA/감압사고가 없는 원자로
- 도플러효과, 열팽창 중성자 누설, 재료 변화로 노심 반응도 제어
- 원자로 개발비 크게 저감
  - 실증이 필요한 고압 기기 전무
- 냉각재와 핵연료 사이의 직접적 접촉 전무
- 원자로 내 구동부와 고압 기기가 없어 설치/해체/유지보수 용의



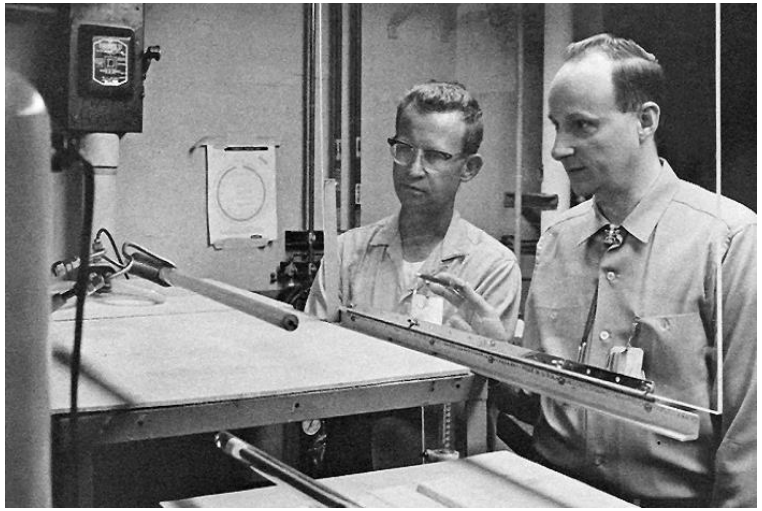
Portable Micro Reactor (http://www.energy.gov)



eVINCI
(http://www.westinghousenuclear.com)

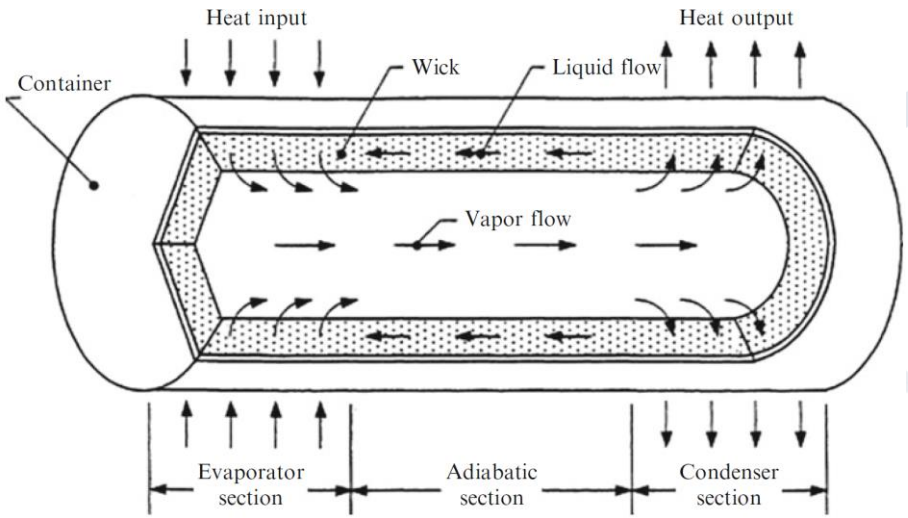
히트파이프란?

- `60년대 LANL 과학자 G. Erickson이 파이프 내부에 윅구조물이 설치되어 액체를 머금고 있는 열이송기기 제안
- 히트파이프 작동 원리
  - 별도의 구동부나 외부 전원 없이 자연적인 증발부와 응축부의 상변화를 통한 대량의 열이송 (온도차 최소화)
  - 포화증기압차로 인한 증발부에서 응축부로의 증기 유동: 고속 열전달
  - 윅구조물 내 액체 유동(모세관력, 액막)
  - 증기와 액체의 역방향 분리 유동
  - 원자로 1차계통 펌프 및 배관 대체



George Erickson
(1929~2019)

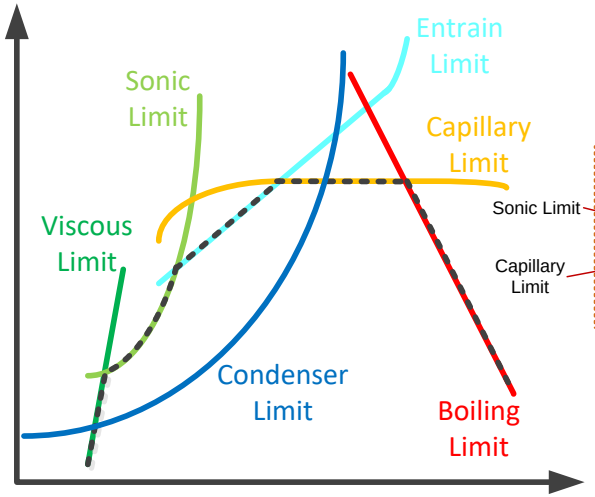
http://www.lanl.gov

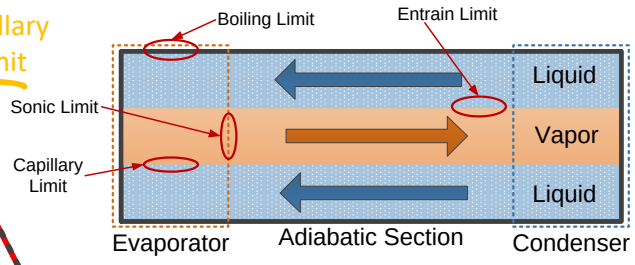


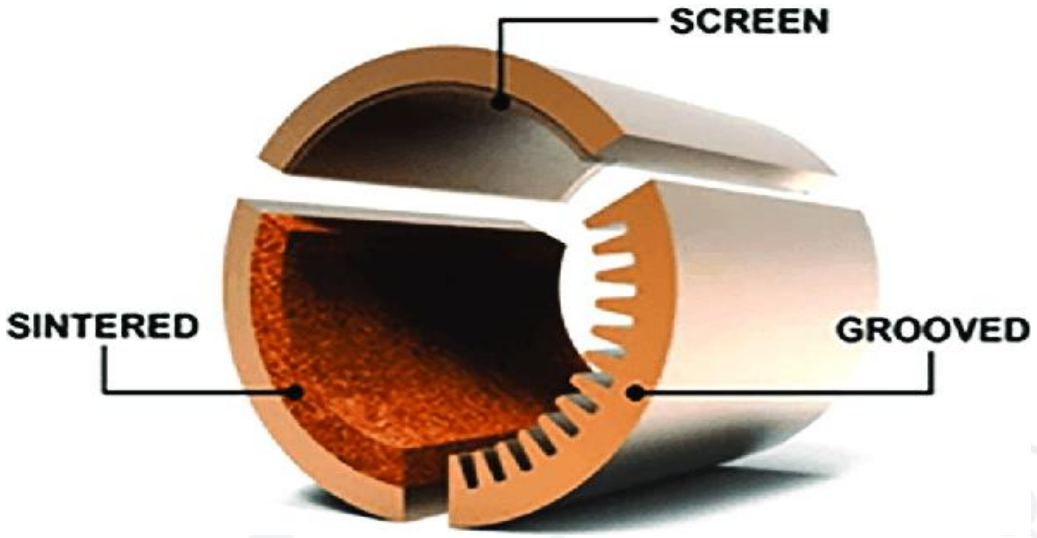
B. Zohuri, Heat Pipe Design and Technology, Second Edition, Springer, 2020

히트파이프 설계

- **운전한계**
  - 점성한계, 음속한계, 비산한계, 모세관한계, 비등한계
  - 응축한계 (냉각기 설계에 의존)
- **작동유체 선정**
  - 윅과 벽면 재료와의 적합성 및 열적 안정성
  - 적합한 어는점과 유동점, 온도와 포화증기압 영역
  - 윅과 벽면 재료의 습윤성, 높은 표면 장력
  - 큰 잠열과 높은 열전도도, 낮은 액체와 증기 점성
- **윅구조물 선정**
  - 응축부 액체를 증발부로 이송시키는 모세관력
  - 증발부에 액체 분배
  - 작은 윅 포어 직경
    - 모세관력 및 여과 압력강하 증가
  - 두꺼운 윅 두께
    - 여과 압력강하 및 증기 유동 면적 감소, 열저항 증가







히트파이프 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
- UO_2: 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

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)	—	–	–	+++	++	+++	——

Advantages of Be	*Advantages of BeO*
- Lower mass density	- Higher macroscopic scattering
- Easier fabrication	- More chemically inert
- Better structural material	- Higher temperature potential
- Higher conductivity at high temperatures	- Higher conductivity at low temperatures
- Less potential for cracking, swelling	- Better shielding effect
- More neutron moderation	- Less neutron moderation

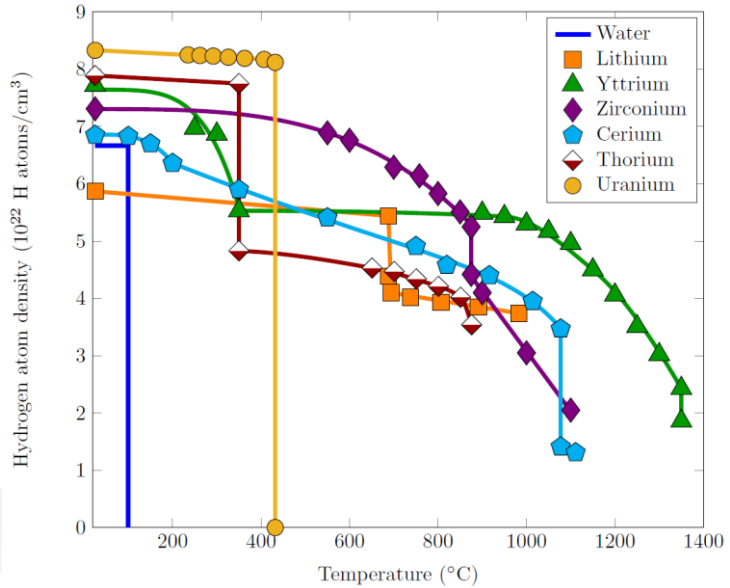
반사체 선정 기준

- 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)

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)
- H2O: ZrH보다 감속능이 우수하나 사용온도가 낮음
- 흑연: 소형화에 비효율적
- Be, BeO
  - 감속블럭 등을 통해 충분한 두께가 확보되면 사용가능

Hydride	H density [10^{22} atoms H/cc]	H density [gH/cm^3]	Hydride density [g/cm^3]	Slowing-down power	Moderating ratio
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_2O	6.6	0.110	0.98	1.35	70
$ThZr_2H_7$	7.7	0.129	7.75	1.55	14
$ThTiH_6$	8.8	0.147	(8.15)	1.8	6



M. Cinbiz et al., "Considerations for Hydride Moderator Readiness in Microreactors, Nuclear Technology, Vol. 209, No. 3, pp. 1-10, 2022.

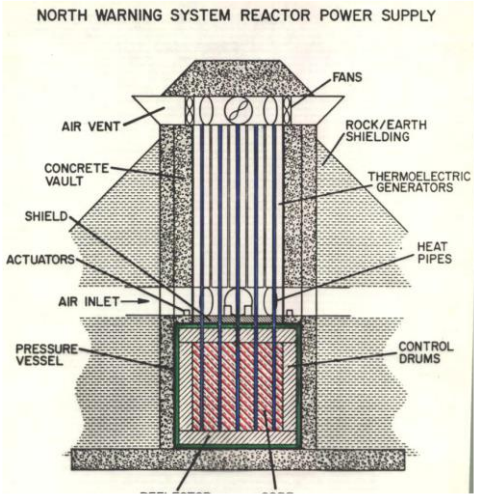
초소형원자로 냉각 방식 별 비교

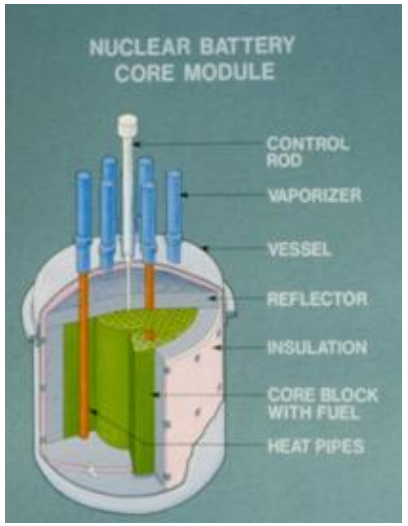
	액체금속로	가스로	히트파이프 원자로
장점	• 고출력에 유리 (1MWt 이상) • 탁월한 열전달 성능으로 발전계통 기술이 발달한다면, 성능 극대화 가능	• 작은 기기 수에 따른 단순한 설계 • 일반적인 원자로 개념 활용으로 검증 용이 • 1차계통만으로 시스템 설계 가능	• 다중성 및 설계 자유도 • 온도 균질화 • 전기가열로 검증 가능 • 안전성(낮은 공극률)
단점	• 고화 및 액화 문제 해결 필요 • 초고순도 선행 요구 • 모든 기기 완성 후 실제 유동현상 규명 시험 가능 • 펌프 및 열교환기 개발	• 신뢰성: 계통 장기 운전성 • 브레이튼 사이클 민감도 • 침수 사고 시 미임계를 위한 추가 설계 필요 • 핵연료 사고 영향	• 모노리스 블록 제조 • 히트파이프 손상사고 평가 • 열교환기 제작 난이도
자료 미확보	• 계통의 복잡성에 따른 신뢰성 및 수명 확보 • 가스분리기, 냉각재 방사화 • 집합체 실증 시험	• 노심 내 유동 분배 혹은 냉각재로의 오염 같은 시험자료 확보 • 붕괴열 제거 설계 경험 부족	• 운전한계: 대용량화에 어려움
설계 현안	• 발전계통 운전조건 변화 시 기기 보호 장치 추가 • 노심 유동 설계 • 제어시스템 및 펌프 출력	• 노심설계 여유도 • 반응도 제어(큰 노심) • 배관 및 발사하중 • 노심 온도 편차	• 열교환기 접합 공정 • 차폐체 결합 • 운전 온도 여유도: HP 작동 온도에 따른 최적화 필요

임무의 성격에 따라서 선택이 달라질 수 있음. GCR은 100kWe이상일 경우에만 효과적임. 낮은 질량으로 고출력이 필요할때는 LMR 선택이 될 수 있으나, 타 노형에 비해 해결해야할 이슈들과 미확보 기술이 많아 장기간의 연구개발이 필요함. 100kWe이하인 경우 HPR가 최상의 선택이라고 할 수 있음.[Bennett, 2021]

'80년대 북부 캐나다 레이더 기지 원자로

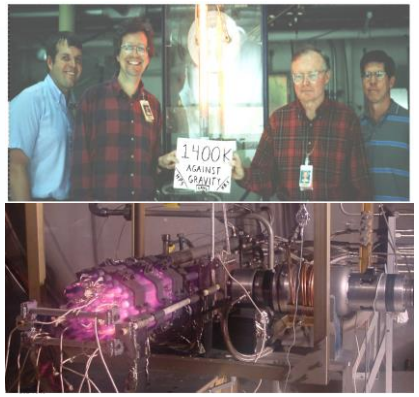
- 20kWe 개념
  - TRISO 피복입자핵연료
  - K(칼륨) 히트파이프
  - 발전방식: 열전소자
  - 비상냉각: 공기 자연대류
  - 용도: 북아메리카 레이더 기지 전력
- 600kWe 개념
  - TRISO 피복입자핵연료
  - K(칼륨) 히트파이프
  - 발전방식: 증기 터빈
  - 용도: 북부 분산 전원
- 실증을 위한 연구기관과 원자로 필요한 시기의 불일치로 연구 개발 중단

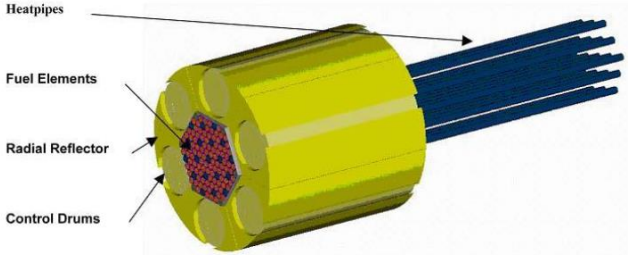




K. S. Kozier, "The Nuclear Battery: A Very Small Reactor Power Supply for Remote Locations," Energy, Vol. 16, No. 1/2, pp. 583-591, 1991.

미국 LANL의 우주용 HPR 연구



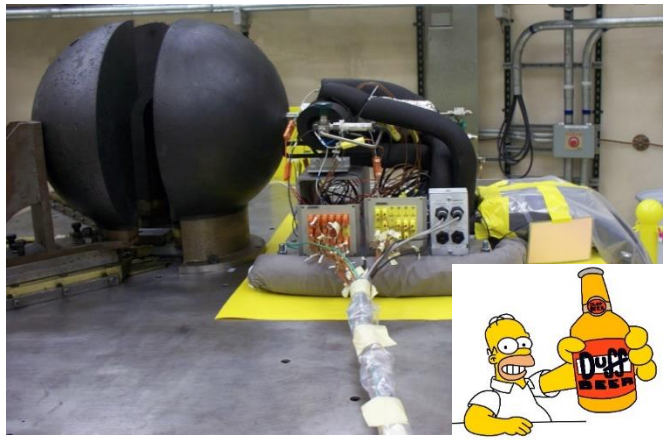


SP100 과제 중단 이후 NASA와 LANL은 HPR 관련 연구 수행

HOMER (Heat Pipe Operated MARS Exploration Reactor)

스털링엔진, 제어드럼

Mo-Li HP 시험, 전체노심 검증시험



DUFF (2012)
(Demonstration Using Flattop Fissions)

기존 임계시험장치에 물HP 를 통해 스털링엔진 연결

핵분열열을 이용한 전기 생산

원자로 개념 및 설계코드 입증

HEU 노심

Source: LANL

KRUSTY (2018)
(Kilopower Reactor Using Stirling TechnologY)

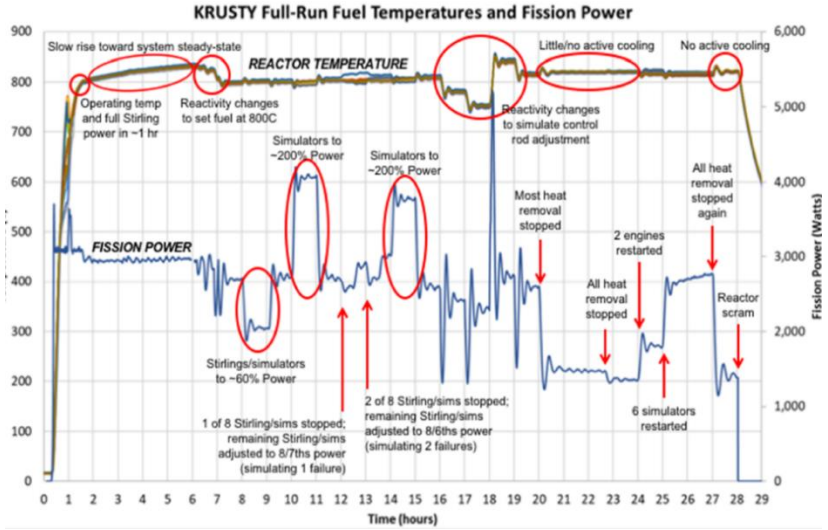
1 kWe HPR 지상실증 시험

1차: SS316 노심 전기가열 시험
2차: U8Mo DU 노심 전기가열 시험
3차: U8Mo HEU 노심 전구기 실증 시험

총 비용: 20M$

KRUSTY 실험의 의의

- DOE에서 실증 시험이 완료된 첫 번째 원자로
- TRL 5 수준의 기술 확보 (우주기준)
- 실제 우주 환경이 모사된 진공로 안에서 시험 수행
- 원자력 전주기 및 다중 고장 모사
- 자가 출력 조절 및 안전성 실증
- LANL HPR 원자로 개념 및 설계 기술 검증
- 굽힘가공이 가능한 Na 히트파이프 제작 실패 (열싸이펀으로 실험)



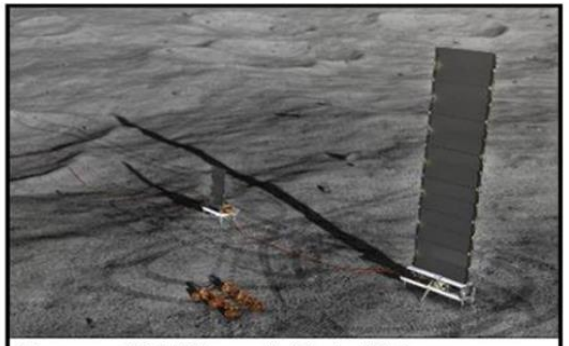
Event Scenario	Performance Metric	KRUSTY Experiment	Status
Startup	< 3 hours to 800 C	1.5 hours to 800 C	Exceeds
S.S Performance	4 kWt at 800 C	> 4 kWt at 800 C	Exceeds
Total Loss of Coolant	< 50 C transient	< 15 C transient	Exceeds
Maximum Coolant	< 50 C transient	< 10 C transient	Exceeds
Convertor Efficiency	> 25 %	> 30 %	Exceeds
Convertor Operation	Start, Stop, Hold, Restart		Meets
Turn-Down Ratio	> 2:1 (half power)	> 16:1	Exceeds

P. McClure, D. Poston (2021)

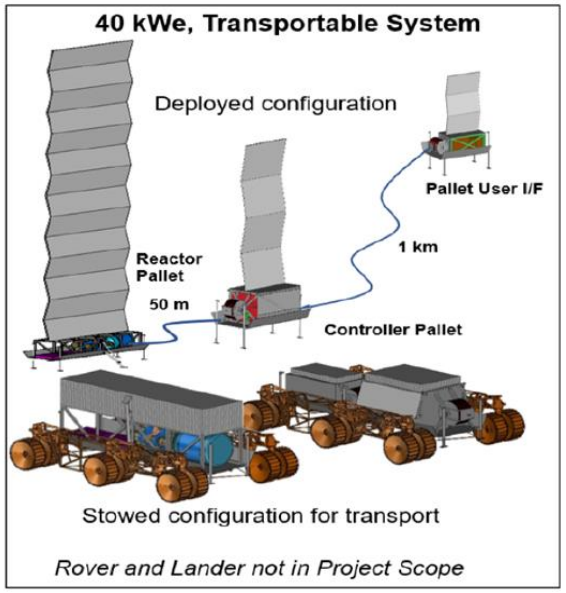
미국의 달기지 원자로 실증 (`29년 목표)

- **사업개요**
  - 40kWe 원자로를 통한 달/화성 미션 지원
  - 산업체의 기술 개발, 설계, 공학, 종합시스템 제공 포함
  - 사업의 단기 목표는 기술 개발 및 공식화에 초점
  - 미국 에너지부(DOE)와 INL의 원자력 산업체 설계 계약 관리
  - 1단계 원자로 설계 계약 (`23년 10월에 종료)
- **3개의 우주-원자력 산업체 콘소시엄 참여**

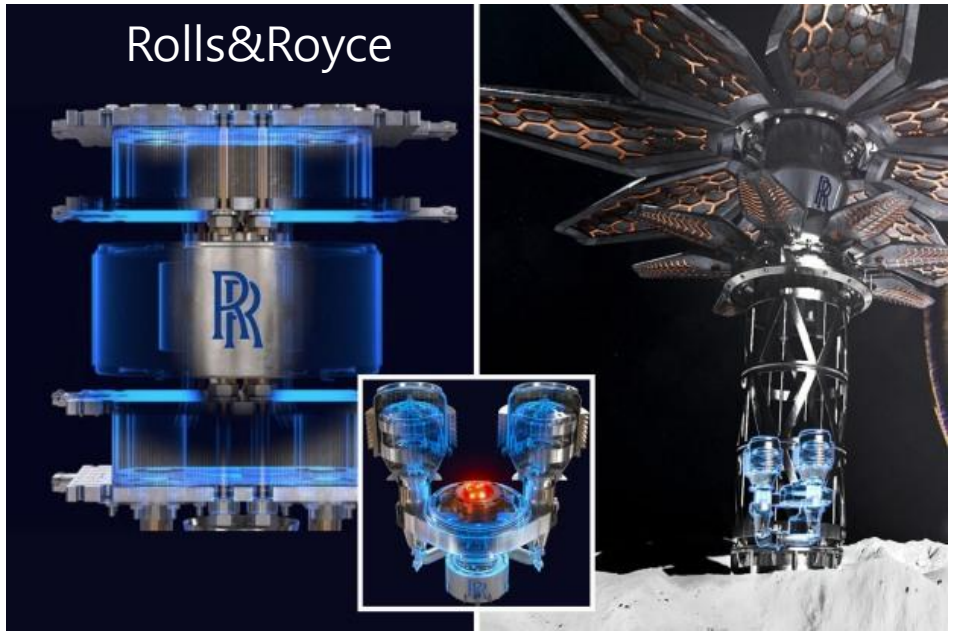
- **미국 정부의 기술개발 지원**
  - 감속재, 차폐, 계측 및 제어 관련 연구, 정기 웨비나
  - NASA의 참조설계 제공
  - PMAD 개발 조사 착수 및 히트파이프 –스털링엔진 연계시험

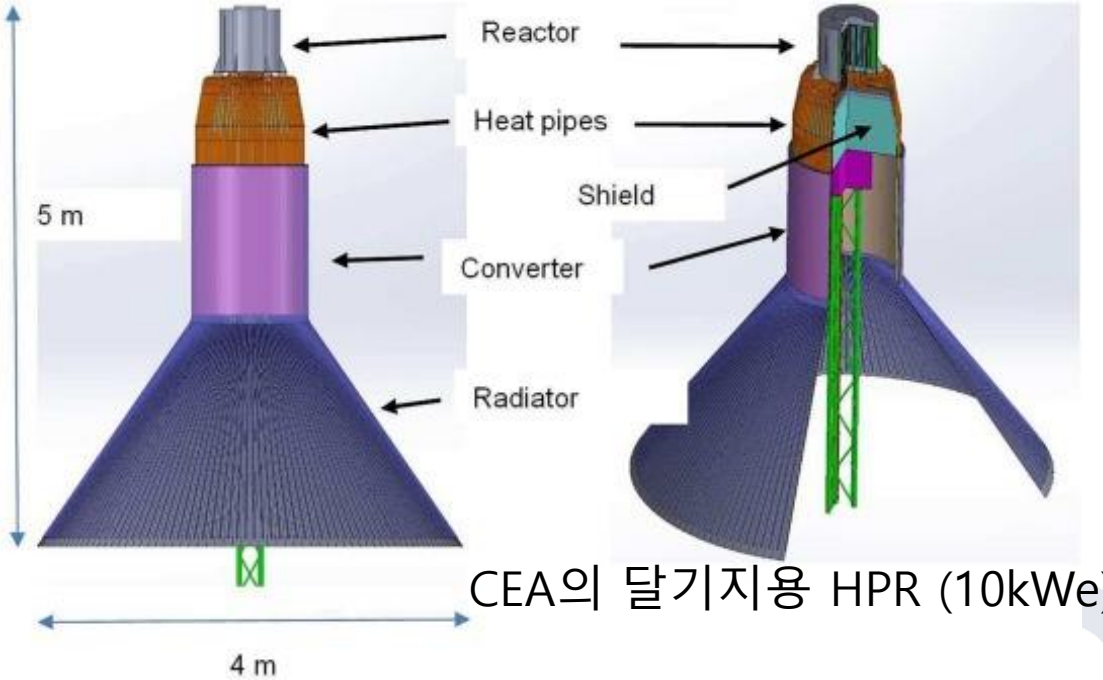


Power: 40 kWe scalable to higher power
Mobility: Capable of being transported
Mass: less than 6,000 kg
Life: 10 years

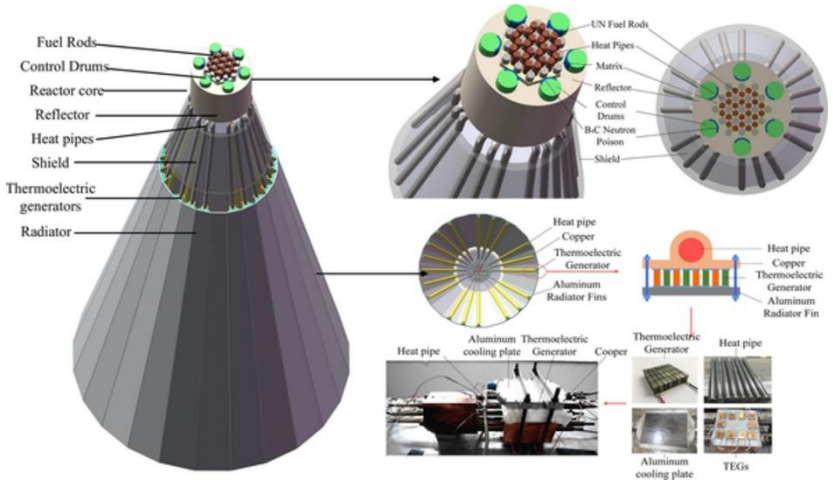


타 국가의 달기지용 히트파이프 원자로 개발



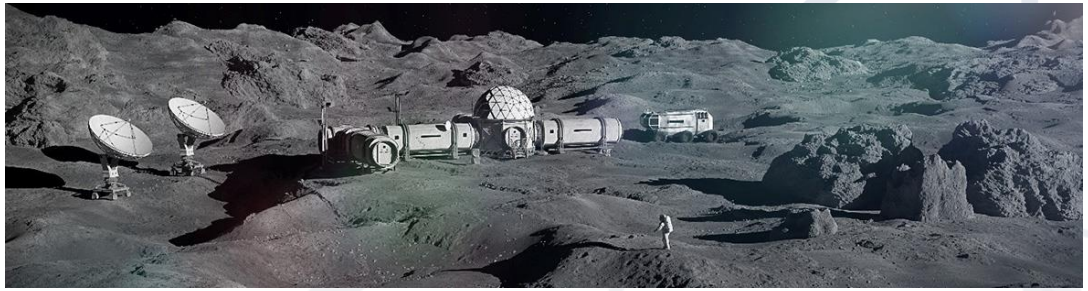


CEA의 달기지용 HPR (10kWe)



중국의 HPR
(NUSTER-100kWe)

Wang et al., NET
Vol 52, Issue 1(2020)



CSA의 달기지용 인프라 설계 공모: MDA Ltd.의 달기지용 원자로 포함(0.25 M$)

지상용 MWe급 히트파이프 원자로 개발

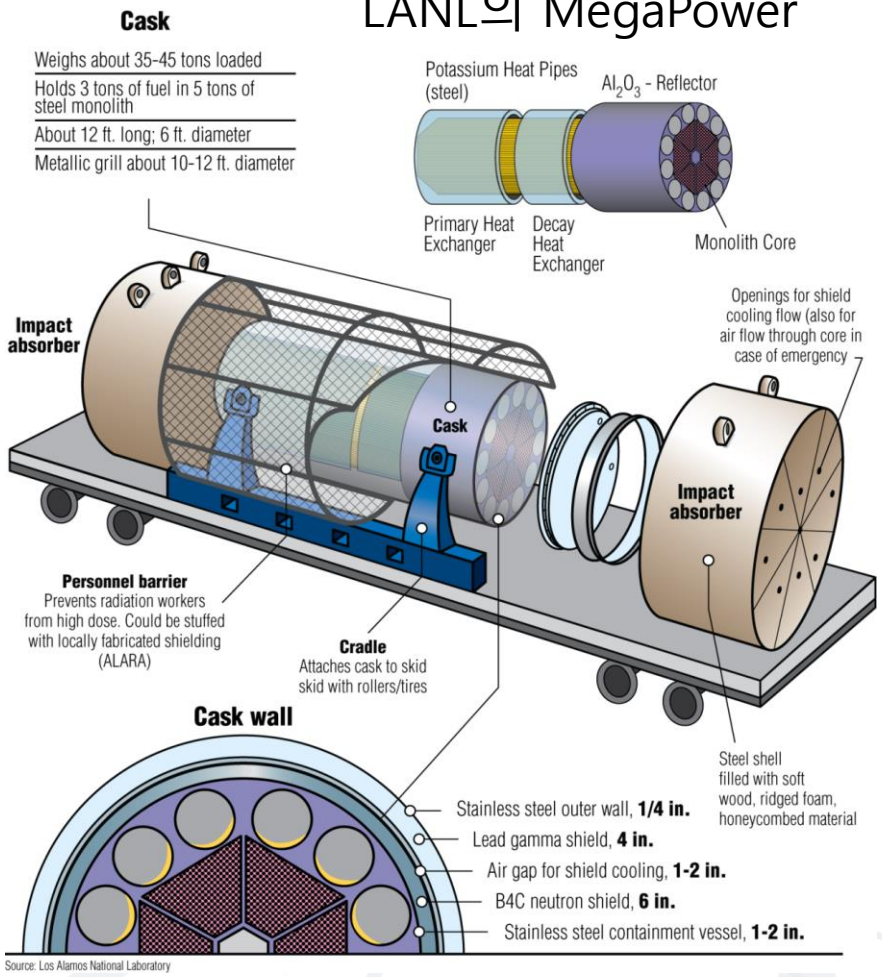
WEC, eVINCI: TRISO-흑연

Oklo, Aurora: UZr-고속로

Toshiba, Movelux
U_3Si_2
CaH_2
육각형집합체

IAEA (2022)

LANL의 MegaPower



McClure (2013)

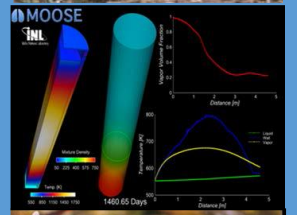
INL의 히트파이프 원자로 설계 체계

MOOSE 기반 DIRE WOLF
(LANL과 INL이 공동으로 개발한 HPR 설계 체

BISON
(Nuclear Fuel Analysis)

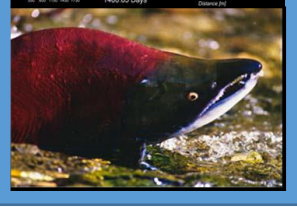
RATTLESNAKE
(Transient Radiation Transport)

MAMMOTH
(Reactor Physics)

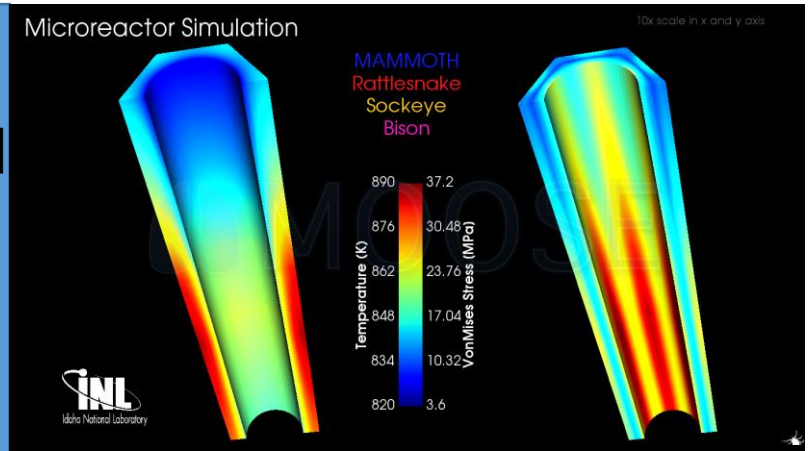


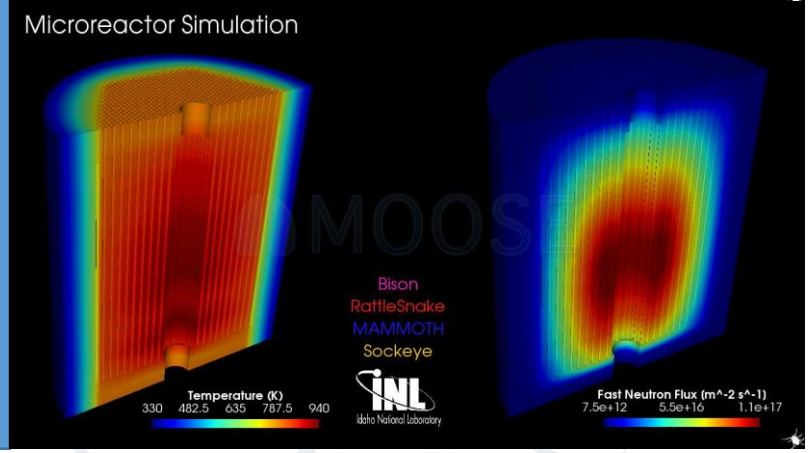
RELAP 7
(Multi-physics Integration)

GRIZZLY
(Structural Anlaysis)



SOCKEYE
(Heat Pipe Analysis)

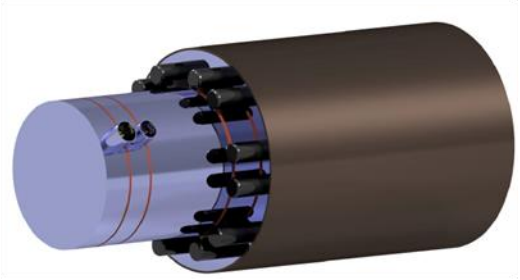




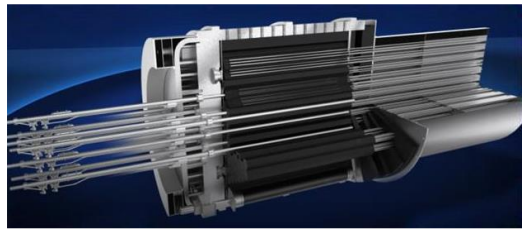
R. C. Martineau, "DireWolf: MOOSE-based Multiphyiscs Simulator for Megawatt Scale Micro Reactor," GAIN-EPRI-NEI-US NIC Micro-Reactor Workshop, April 3-4, 2019.

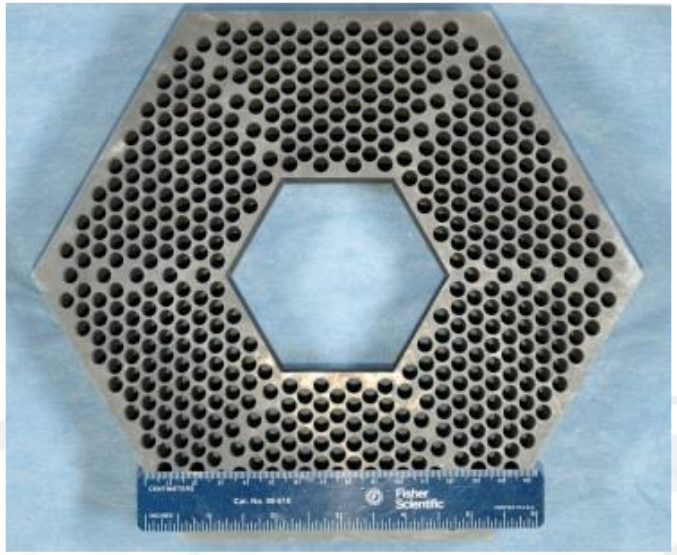
Westinghouse社의 eVINCI

- eVINCI 초소형원자로 기술(`15~), 지상용과 우주용 원자로 관련 경험



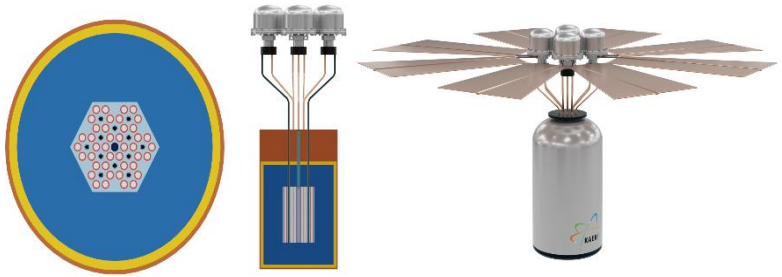
- eVINCI는 TRISO 핵연료 활용
- 선진 히트파이프 기술
- UN 핵연료, Yttrium Hydride 감속재
- 5kWe에서 5MWe 까지 적용 가능
- 달기지에서 인공위성이나 전기 추진까지 전력 공급 가능





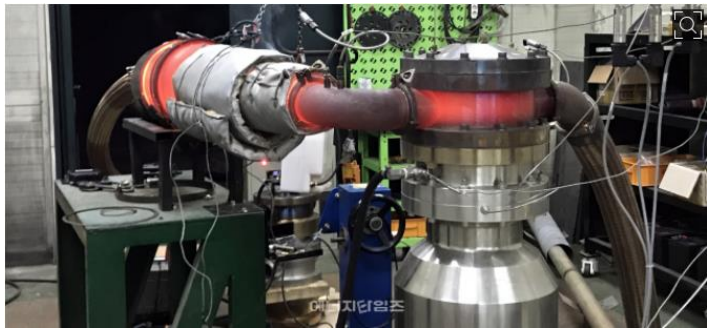
국내 히트파이프 원자로 기술

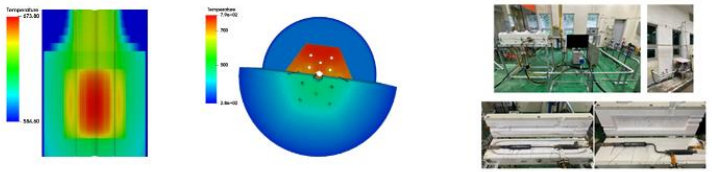
- KAERI는 `19년부터 착수된 원자력융복합기술개발사업을 통해 원자로 설계기술 확보
- 세계 최초 굽힘가공 가능한 소듐히트파이프 열성능 입증
- 스털링엔진 및 방열판 기술은 국내 산업체와 대학이 보유
- 핵연료 및 노심구조물 기술은 국내 SMR 요소기술 최대 활용
- 서울대학교, UNIST, KAIST, POSTECH은 HPR 기초 연구 수행

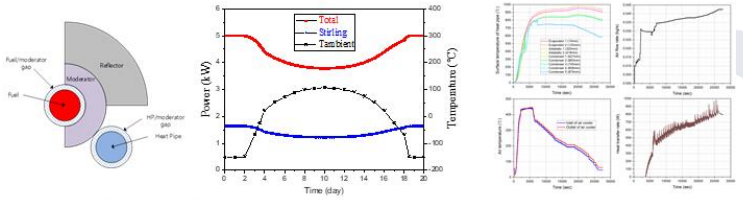


<Single-acting 스털링> <Duble-acting 스털링> <실증용 Duble-acting 스털링>

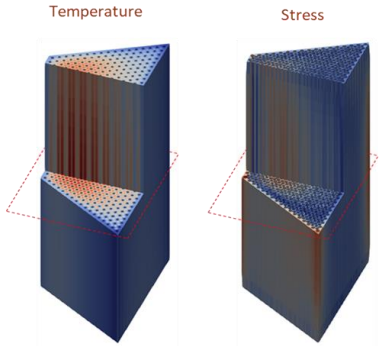
국내 스털링엔진

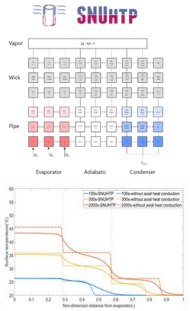




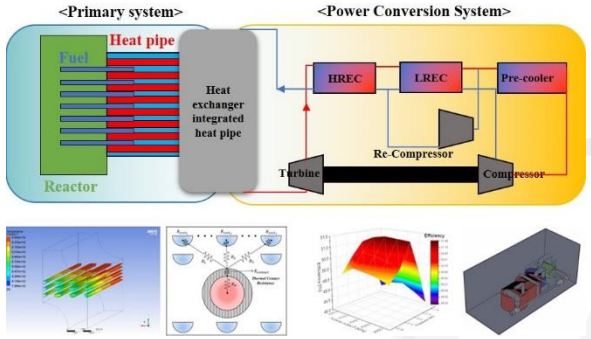


PRAGMA OpenFOAM ANLHTP





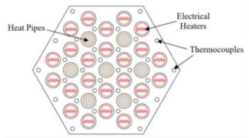
1. Multiphysics Analysis System for Heat Pipe Cooled Micro Reactors Employing PRAGMA-OpenFOAM-ANLHTP, Nuclear Science and Engineering, 2023
2. Multiphysics analysis of heat pipe cooled microreactor core with adjusted heat sink temperature for thermal stress reduction using OpenFOAM coupled with neutronics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

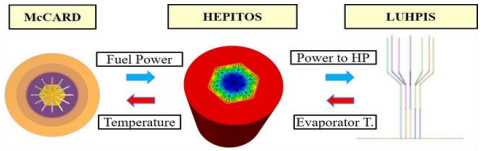


Source: POSTECH

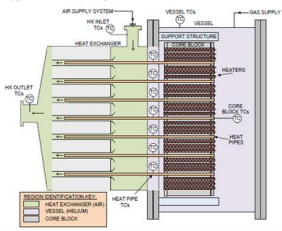
KAERI와 KIMM의 창의형융합연구사업(`23.7~`28.6)

- 목표
  - 달기지용 히트파이프 원자로 설계/해석기술 검증 및 핵심기기 개발
- 한국원자력연구원
  - 설계/해석기술 검증용 히트파이프 집합체 시험
  - 히트파이프 원자로 고정밀 해석체계 개발 및 검증
  - 히트파이프 원자로 설계기술 검증 및 아르테미스 기지용 히트파이프 원자로 개념 연구
- 서울대학교: 고정밀 해석 요소기술 개발
- 경희대학교: 히트파이프 윅구조물 최적화
- 한국기계연구원
  - 250We 스털링 엔진 시작품 발전시험 및 5kWe 스털링엔진 개념 설계
  - 원자로 모의시스템과 스털링엔진 연계기술 개발

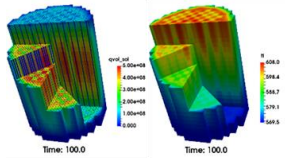


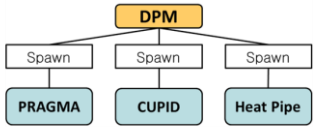


히트파이프 원자로 노심 열설계 연계 체계

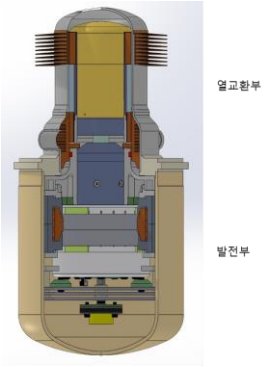


히트파이프 집합체 시험장치 예시 (eVINCI EDU) Source: Westinghouse

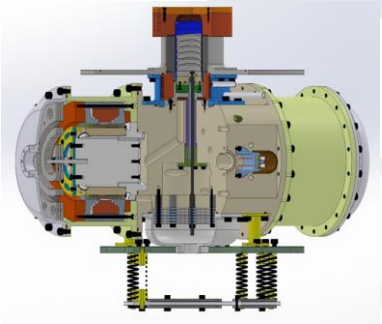


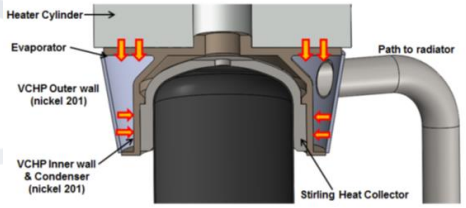


MPI 기반 DPM 모듈 적용, 과도해석 위한 다물리 연계 체계



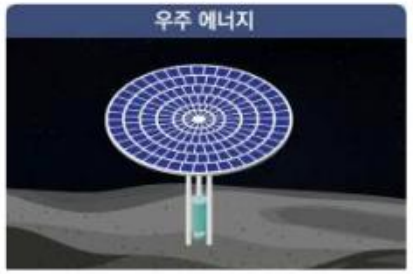
[스털링엔진 단면]





국내 우주 원자력 관련 동향

- 한국의 아르테미스 협정 서명 (현재 29개국)
- 제4차 국가우주개발진흥기본계획: 우주 원자력 포함



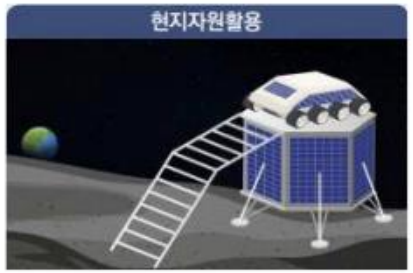
- 지구↔달 수송선
- 심우주 원자력 추진

- 현지자원활용 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

4차 기본계획 상의
달 탐사와 관련된 임무 요소

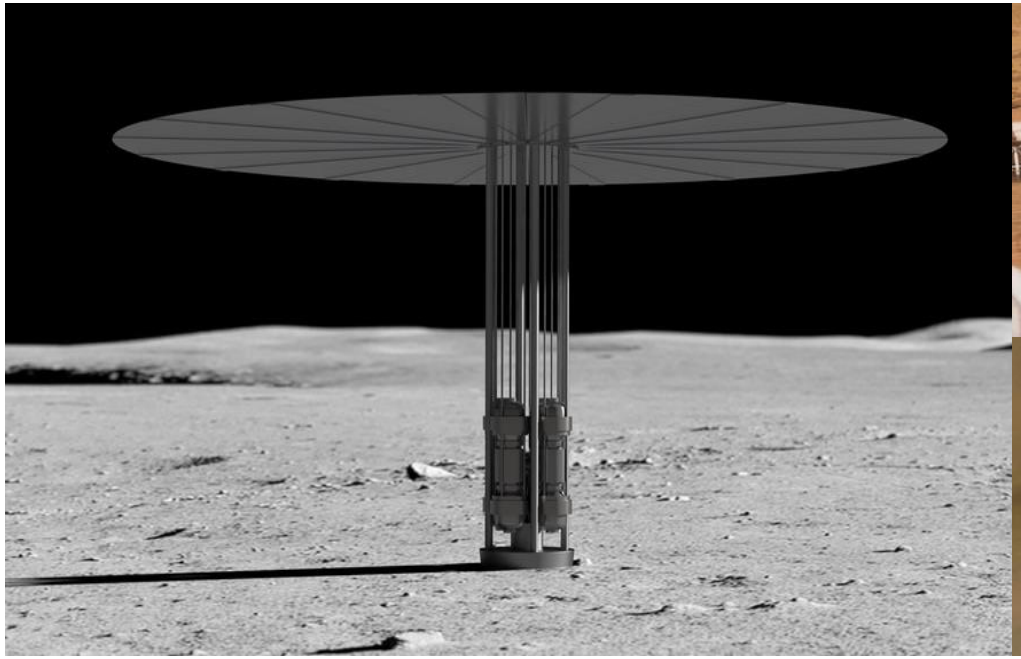


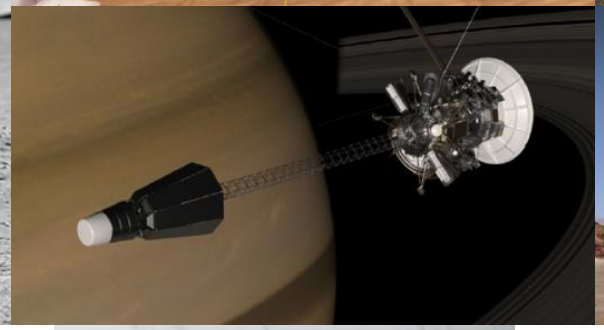
- 얼음/물→수소 생성 기술

- 지구↔달 초고속 인터넷 기술

Source: 국가우주정책연구센터

19 맺음말





원자력-항공우주 협력으로 뉴스페이스 시대 이끈다

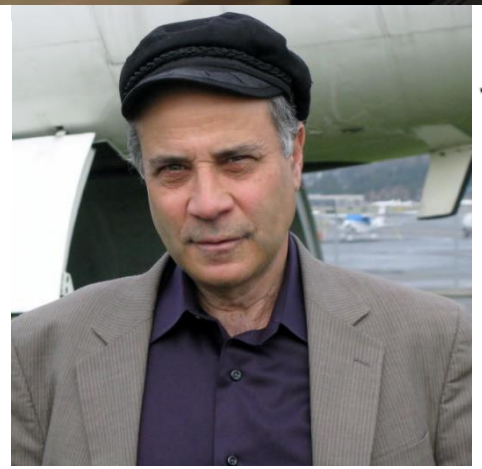
입력 2023.05.02. 오후 3:14 기사원문

박희윤 기자

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

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"

한국원자력연구원
KAERI
Korea Atomic Energy Research Institute

내용을 입력하세요.

감사합니다.