

日本衛星ビジネス協会 学生講演会

高熱伝導性CFRP組込型ループヒートパイプラジエータの提案 及び宇宙模擬環境下での放熱特性評価

○安江真穂 前川諒弥 (名古屋大)

秋月祐樹 小川博之 (JAXA)

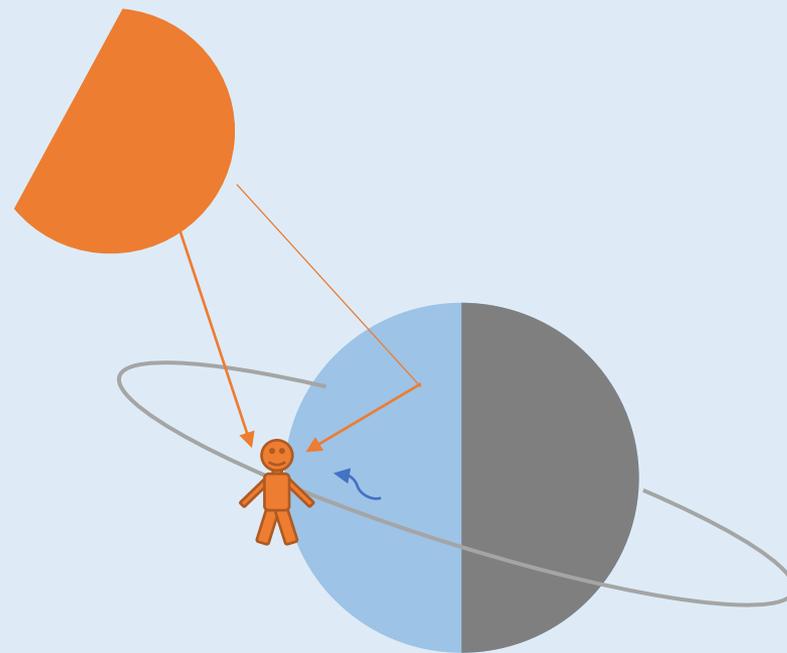
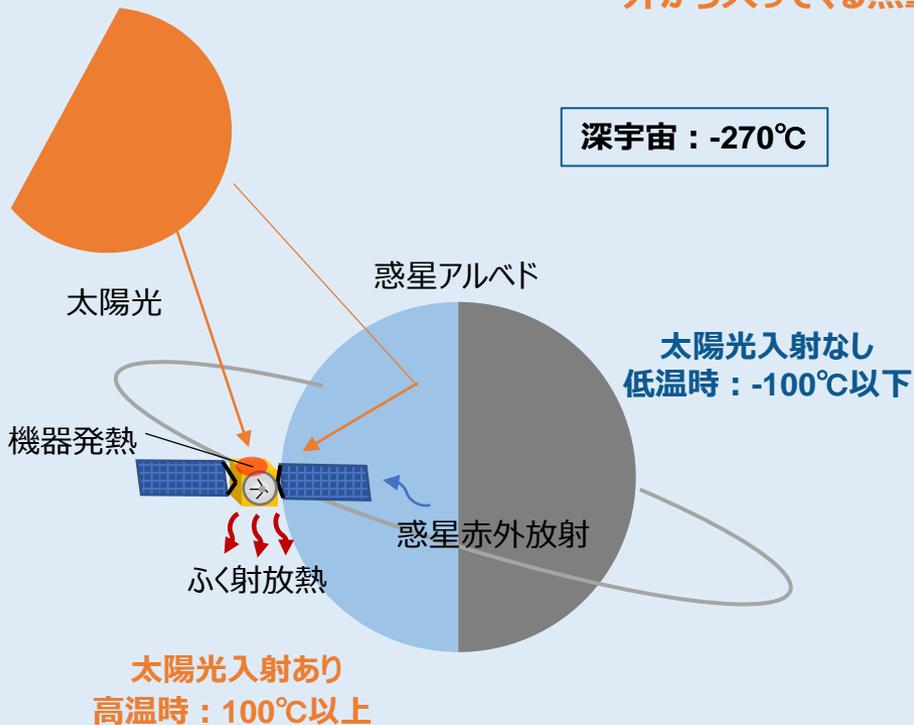
長野方星 (名古屋大)

■ 宇宙の環境

エネルギー保存則

$$\underbrace{A_S E_S \alpha_S}_{\text{太陽光入射}} + \underbrace{A_R C_A E_S \alpha_S}_{\text{惑星アルベド}} + \underbrace{A_E E_E \alpha_H}_{\text{惑星赤外放射}} + \underbrace{Q_S}_{\text{機器発熱}} = \underbrace{\varepsilon_H \sigma \bar{T}^4 A}_{\text{外へ出ていく熱量}}$$

外から入ってくる熱量



仮に人間が同じよう状況だったら... ?

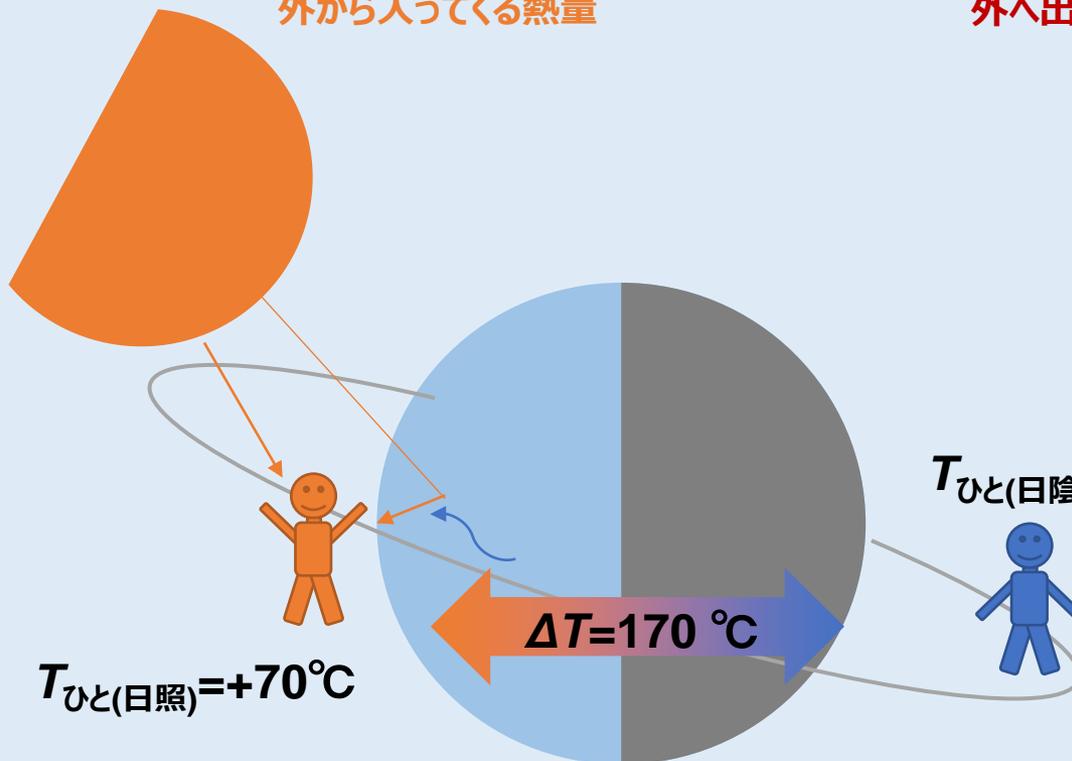
■ 宇宙の環境

エネルギー保存則

$$\alpha_{\text{ひと}} P_{\text{solar}} (A_{\text{ひと}} / 2) + Q_{\text{ひと}} = \varepsilon_{\text{ひと}} \sigma A (T_{\text{ひと}}^4 - T_{\text{space}}^4)$$

外から入ってくる熱量

外へ出ていく熱量



- $\varepsilon_{\text{ひと}} \doteq 0.98$
- $\alpha_{\text{ひと}} \doteq 0.70$
- $A_{\text{ひと}} \doteq 2.0 \text{ m}^2$
- $Q_{\text{ひと(食後)}} \doteq 100 \text{ W}$
- $T_{\text{宇宙}} = 3 \text{ K}$
- $P_{\text{太陽}} = 1350 \text{ W/m}^2$

熱くて寒い宇宙環境において熱制御は非常に重要。

■ 地上と宇宙の熱の伝わり方

地上



[1]対流イメージ図

対流

- 流体を媒介して伝わる

$$Q = hA(T - T_{amb})$$

h : 対流熱伝達率

A : 放熱面積

宇宙



[1]ふく射イメージ図

ふく射（電磁波）

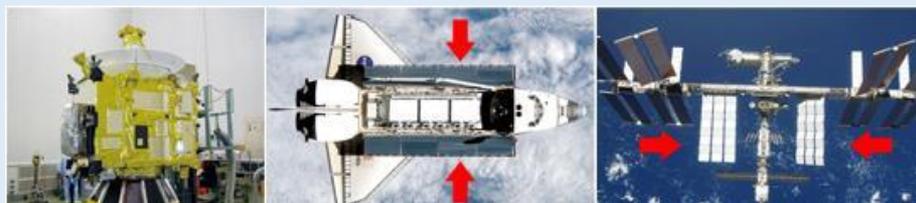
- 赤外線を媒介して伝わる
- 伝熱効率低

$$Q = \varepsilon_H \sigma A (T^4 - T_{amb}^4)$$

ε_H : 全半球放射率

σ : ステファンボルツマン定数

宇宙空間ではふく射でしか排熱できない



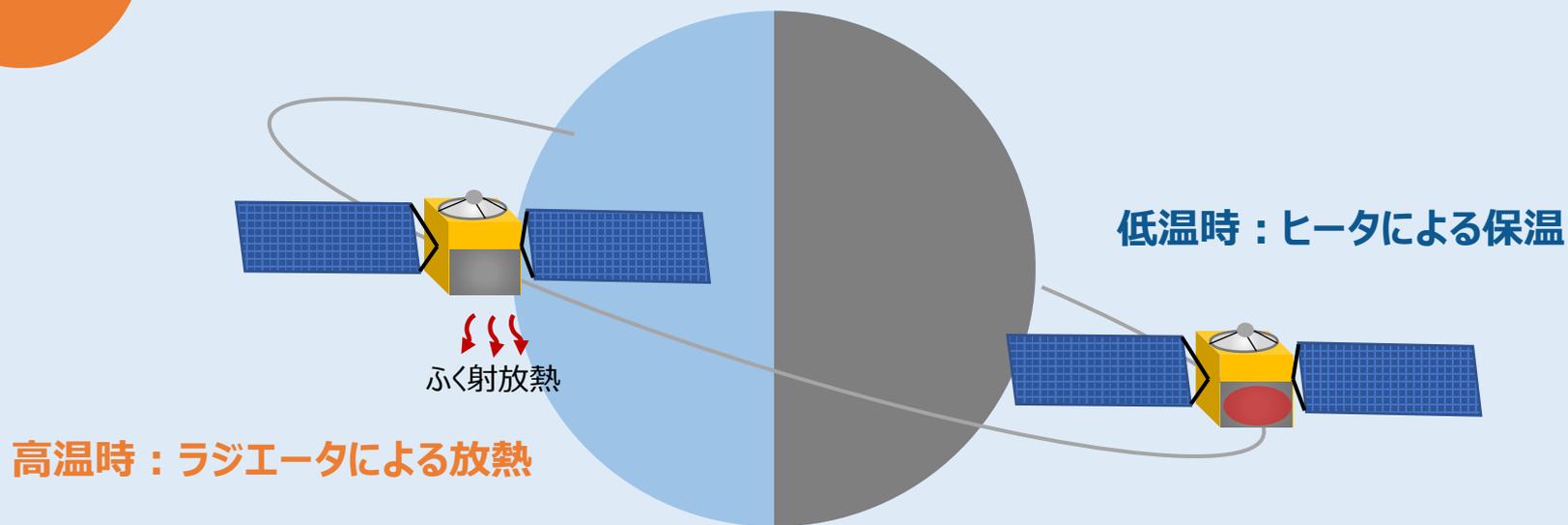
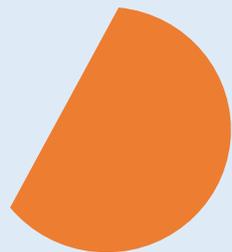
[2]宇宙空間で使用されているラジエータ

過酷な熱環境における宇宙機の熱制御は必要不可欠

[1]<https://archi-setsubi.com/air-conditioning/heat-conduction/>

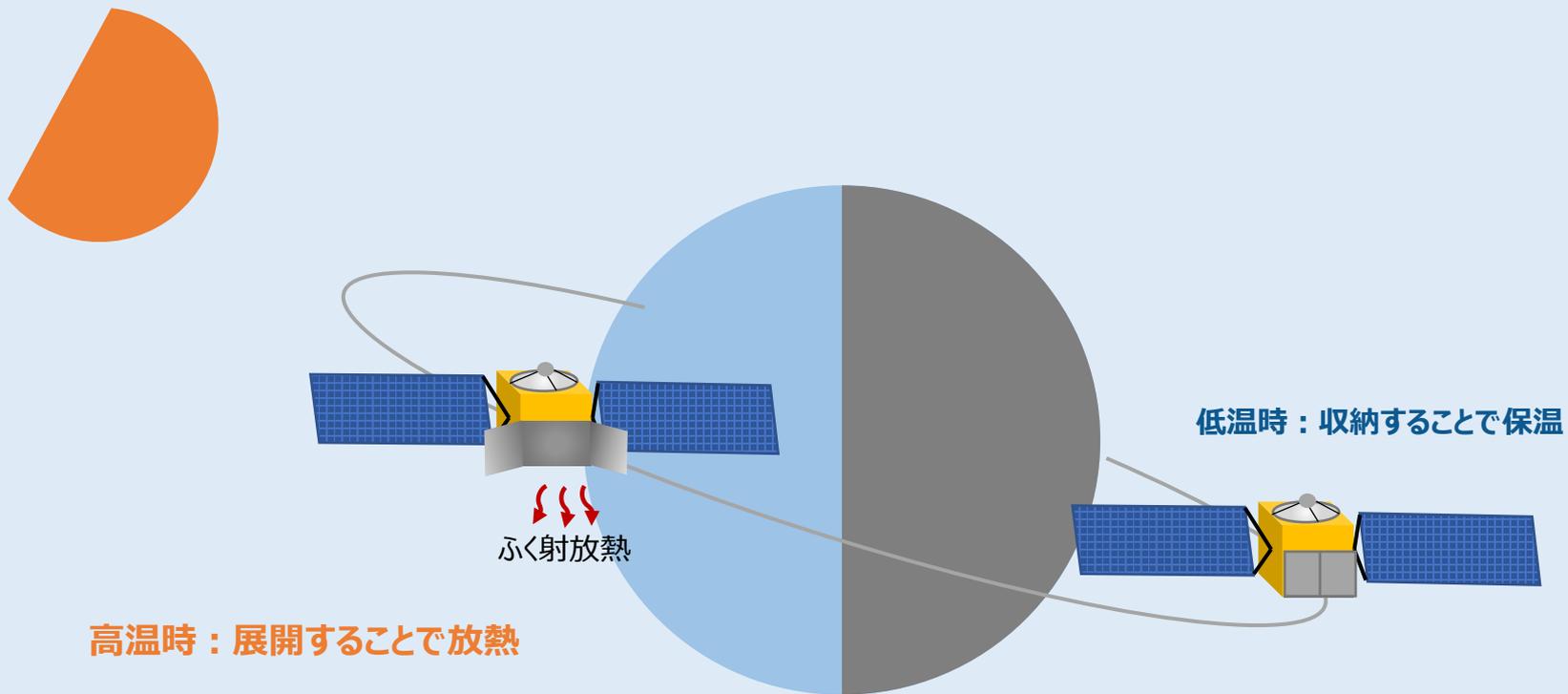
[2]<https://www.isas.jaxa.jp/j/forefront/2009/nagano/>

■ 従来の熱制御



課題

低温時にも放熱→大きなヒータ電力が必要



熱をすてる量が無電力でコントロールしたい

■ 今後の宇宙ミッション

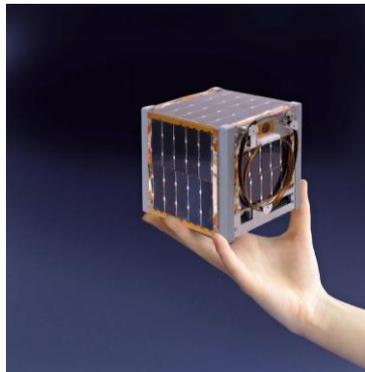


月面開発
有人ローバー[1]

超大型化



排熱量の増加



CubeSat [2]

超小型化



放熱面積不足



深宇宙探査機[3]

超深遠



太陽光発電ができない

軽量・高効率・無電力による熱制御デバイスの創出が急務

電力を使わずに、**熱を遠くに運ぶ技術**

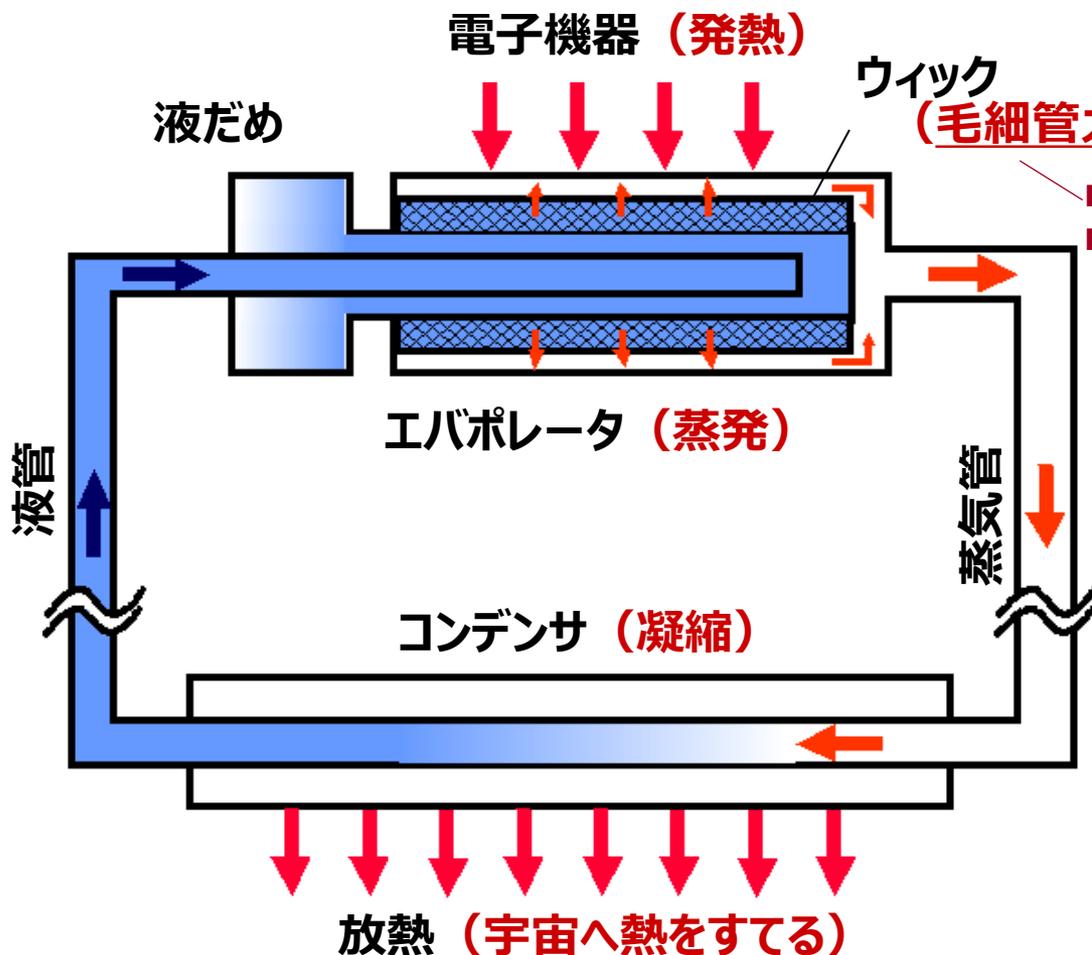
電力を使わずに、**熱を捨てる量を制御する技術**

[1] <https://humans-in-space.jaxa.jp/future/>

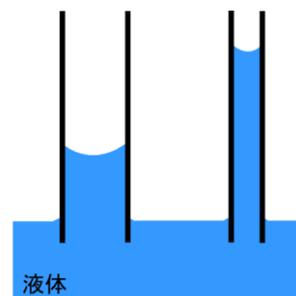
[2] <https://www.nikkei.com/article/DGXBZO32688860S1A720C1000000/>

[3] https://sorae.info/space/2017_09_21_jaxadlr.html

■ ループヒートパイプ (Loop Heat Pipe : LHP)



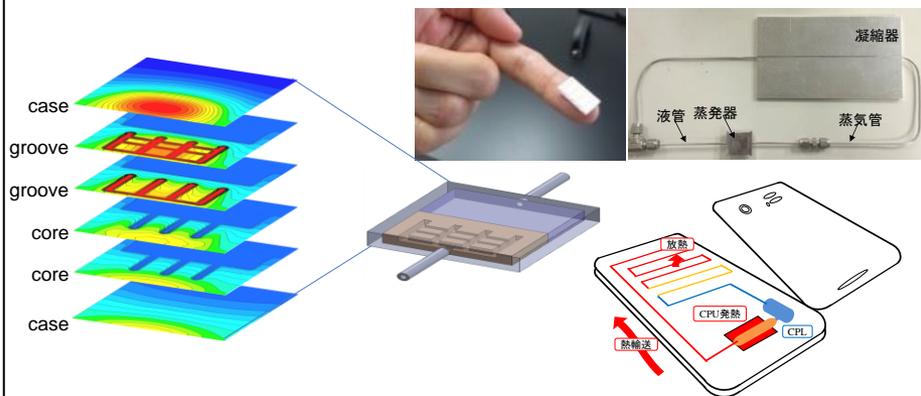
- 細い管や繊維のすきまを液体が浸透していく現象
- 目が細かいほど毛細管力が大きい



- ◆ 特徴
- ✓ 無電力による動作
- ✓ 長距離熱輸送可能
- ✓ 設計自由度が高い

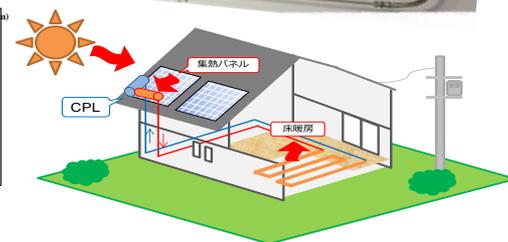
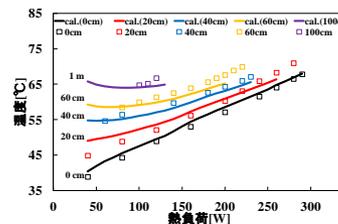
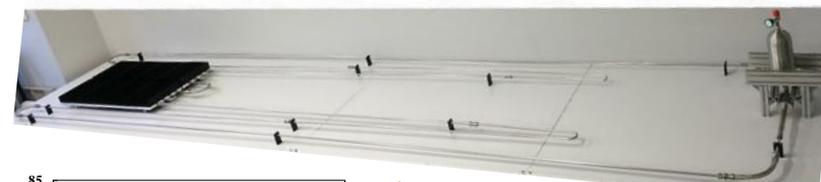
カーボンニュートラルな技術として宇宙・民生など様々な分野で期待

スマートフォン用LHP



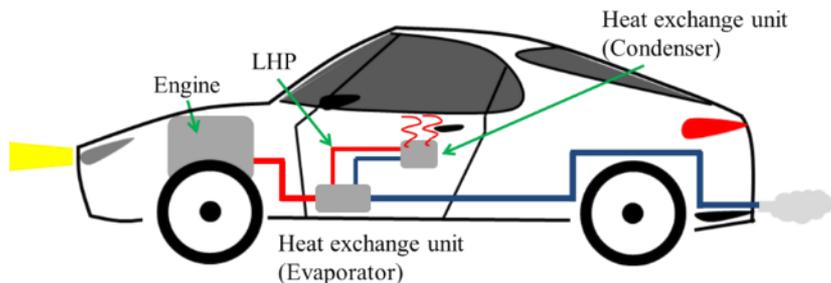
■ 薄さ1mmの超薄型LHPを実現

住宅用長距離LHP

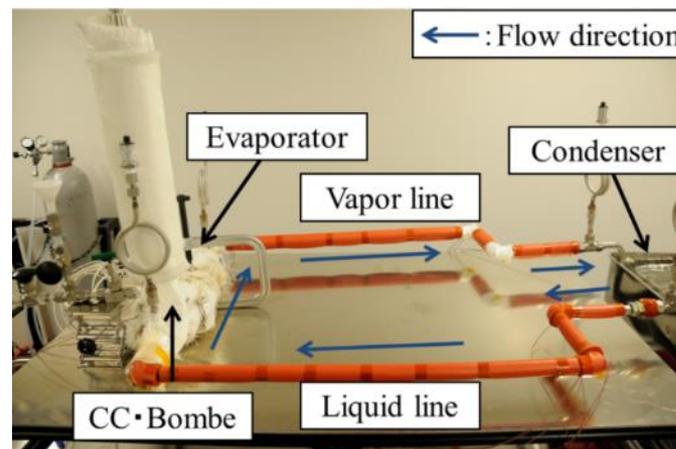


■ 世界最長の28mLHPを実現

自動車排熱回収用LHP

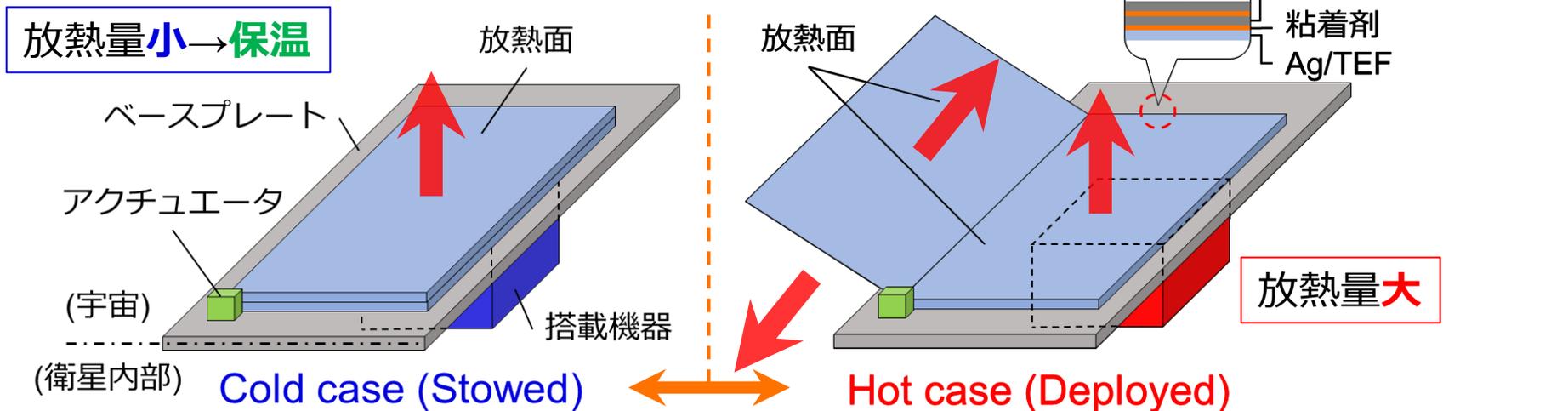


■ 大きな熱量 (4.2kW) が運べることを実証



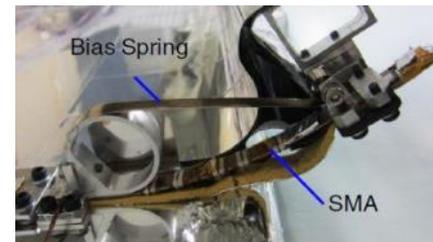
■ 可逆展開ラジエータ (Reversible Thermal Panel : RTP)

⇒ 自律的に放熱面を展開収納することにより放熱量を制御



◆ 特徴

- ✓ 高热伝導材によるラジエータ面内熱拡散
↳ グラファイトシート → 軽量
- ✓ 形状記憶合金 (SMA)によるフィンの展開収納
↳ 可逆アクチュエータ → 無電力



グラファイトシートと可逆アクチュエータ^[1]

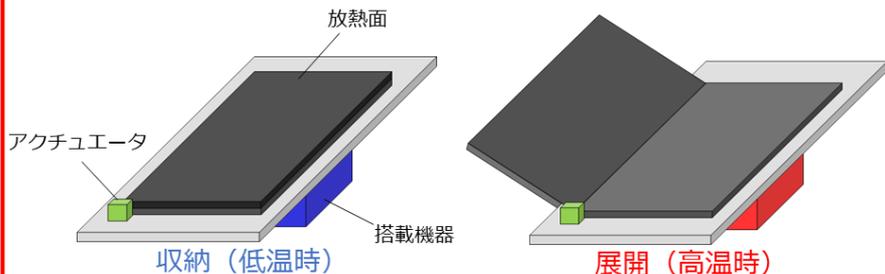


性能が認められ、DESTINY+の搭載が検討される

将来的な大型ミッション（月面計画等）に対する 大型かつ無電力熱制御デバイスの創出

可逆展開ラジエータ（RTP）

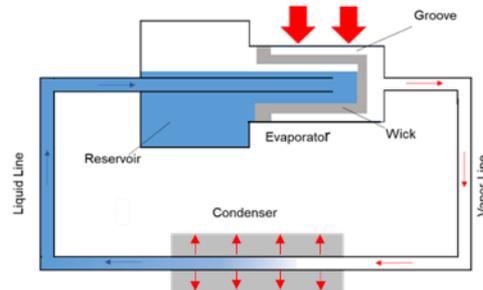
自律的に放熱面を展開収納する放熱デバイス



DESTINY+への搭載を目指したRTP-BBM (1)

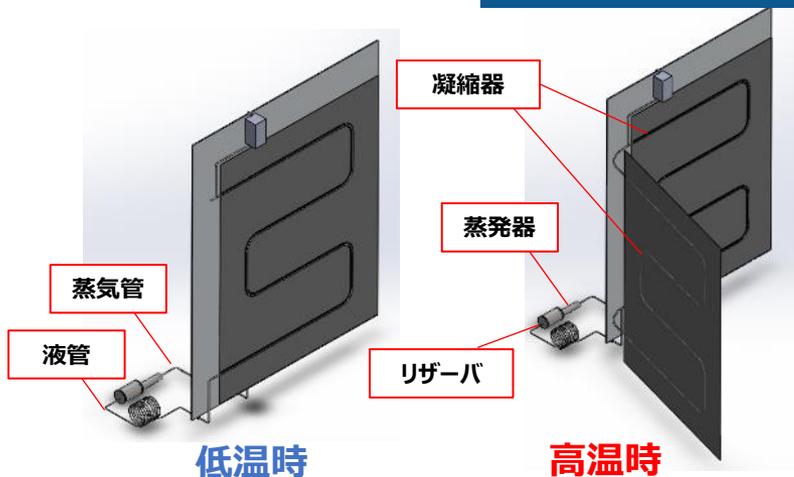
ループヒートパイプ（LHP）

毛細管力を駆動力とした潜熱利用の熱輸送デバイス



LHPラジエータ（LHPR）(2)

LHP流路埋め込み式CFRPラジエータ



- ✓ 無電力駆動
- ✓ 埋込み加工による高い熱結合性
- ✓ 高熱伝導CFRPラジエータによる軽量化
- ✓ マルチコンデンサによる面内熱拡散促進

軽量・高効率・無電力が期待できる

[1] Yuki akizuki et al., "Development and testing of the re-deployable radiator for deep space explorer", Applied Thermal Engineering, January 2020

[2] A. Okamoto, T. Miyakita and H. Nagano, "Initial Evaluation of On-orbit Experiment of Loop Heat Pipe on ISS", 49th International Conference on Environmental Systems, 7-11 July, 2019, Boston, Massachusetts

■ 設計要求及び計算結果

設計要求

作動流体	アンモニア
最大放熱量	500 W
最大動作温度	50°C
熱輸送距離	2000 mm



500Wとは？



一般的なデスクトップパソコン：約100W

5台分

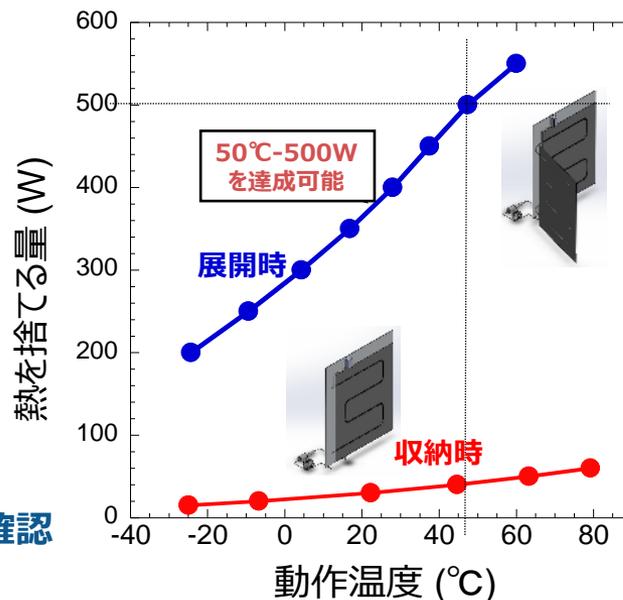
中肉の成人男性：約100W

5人分



解析条件

シンク温度	-270°C
放熱条件	ラジエータによる輻射
エバポレータ	シングルエバポレータ
コンデンサ	マルチコンデンサ
材質	SUS306 (LHP) CFRP (ラジエータ面)



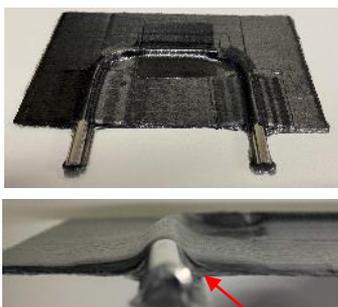
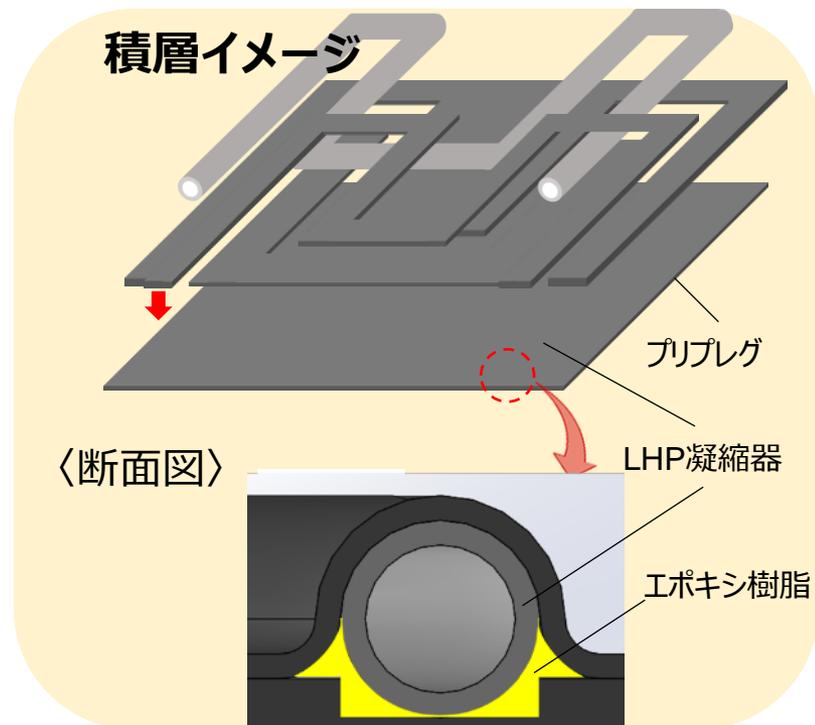
ラジエータ展開時に
目標放熱量の達成を確認

ラジエータを統合した定常モデルを構築し、500W級のデバイスを設計した

■ 埋め込み加工手順

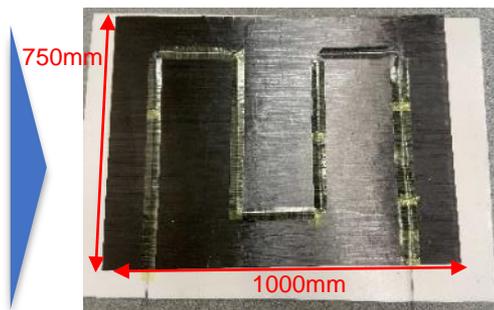
プリプレグ：炭素繊維にあらかじめ半硬化樹脂
を含浸させたシート状のもの

1. ベースの上に溝を掘った4層を積層
2. LHP凝縮器を乗せる
3. 2を覆うように積層
4. オートクレーブ内で加圧、加熱
5. 成形

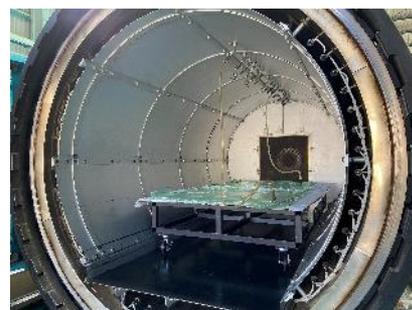


試作

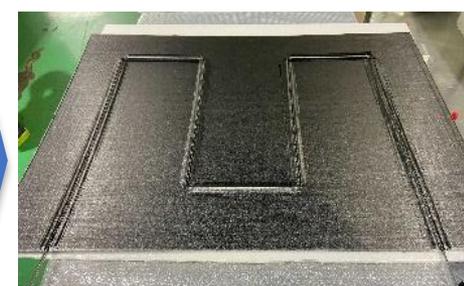
空隙がない
ことを確認



LHP埋込み積層



オートクレーブ加工 (1)



成形品

LHP流路をCFRPに埋め込む加工法を検討し、CFRPラジエータを製作した

■ 外観図



展開イメージ

蒸発器 + リザーバ製作



ウイック加工

焼き嵌め
+ 溶接



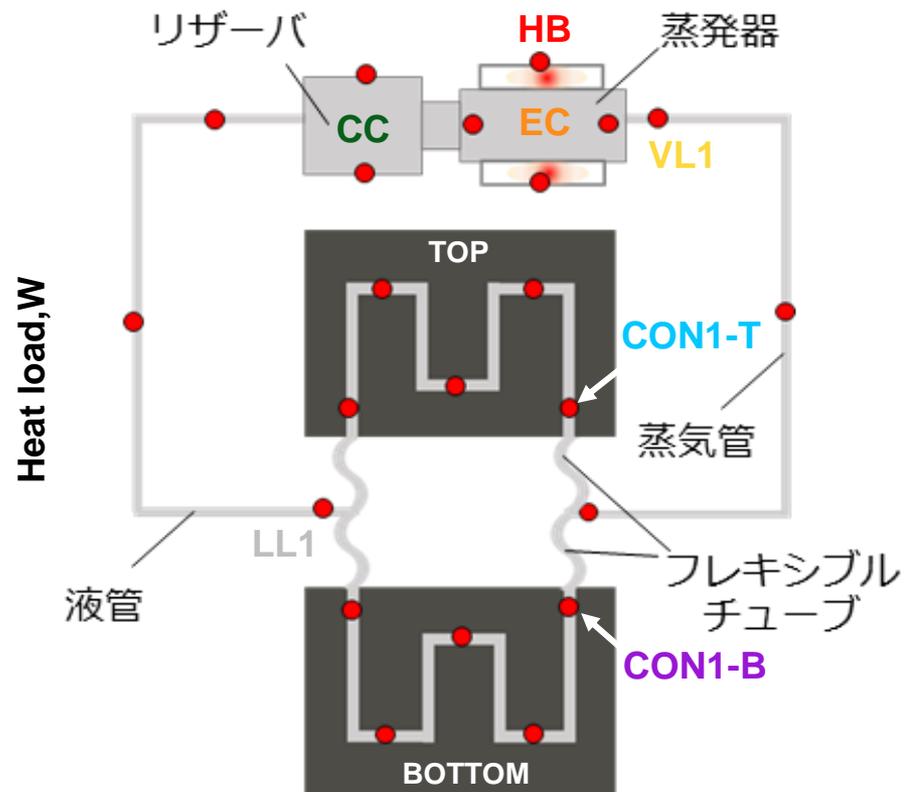
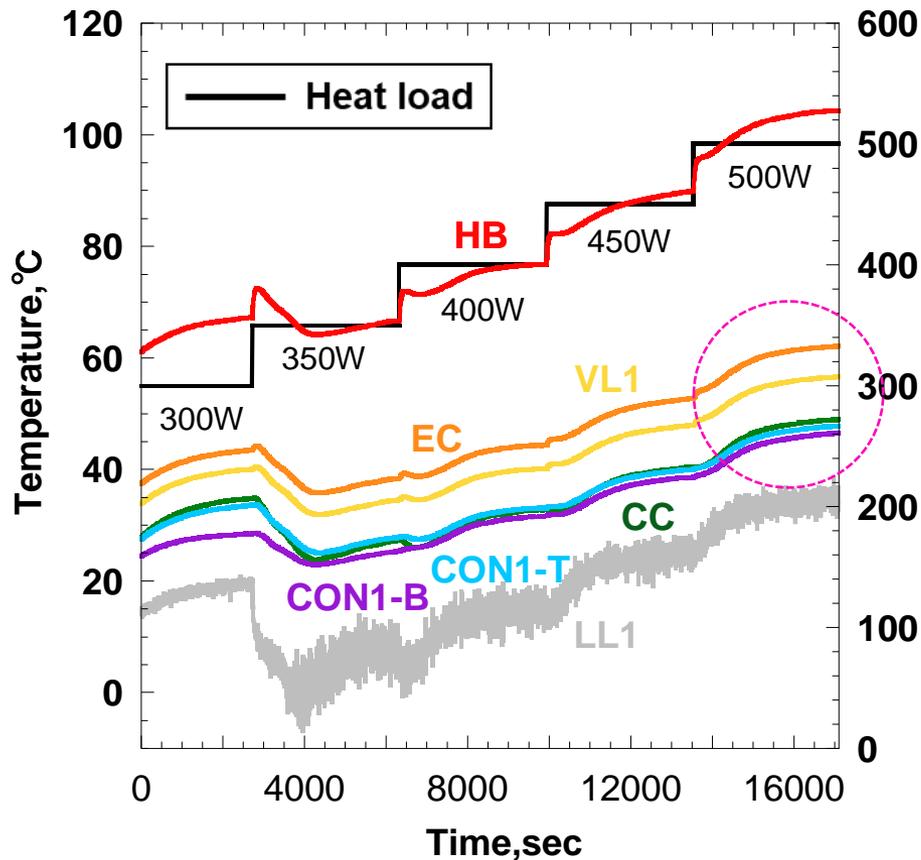
蒸発器 + リザーバ

◆ LHPラジエータ諸元

蒸発器	液管	リザーバ
内径 22mm	内径 1.7mm	内径 44mm
有効長さ 70mm	長さ 2000mm	長さ 75mm
蒸気管	ウイック	ラジエータパネル
内径 3.2mm	内径 16 mm	高さ 1000mm
長さ 2000mm	空隙率 0.6	幅 750mm
凝縮器	細孔半径 3.1μm	厚み 1.05mm
内径 3.2mm		
長さ 2000mm		



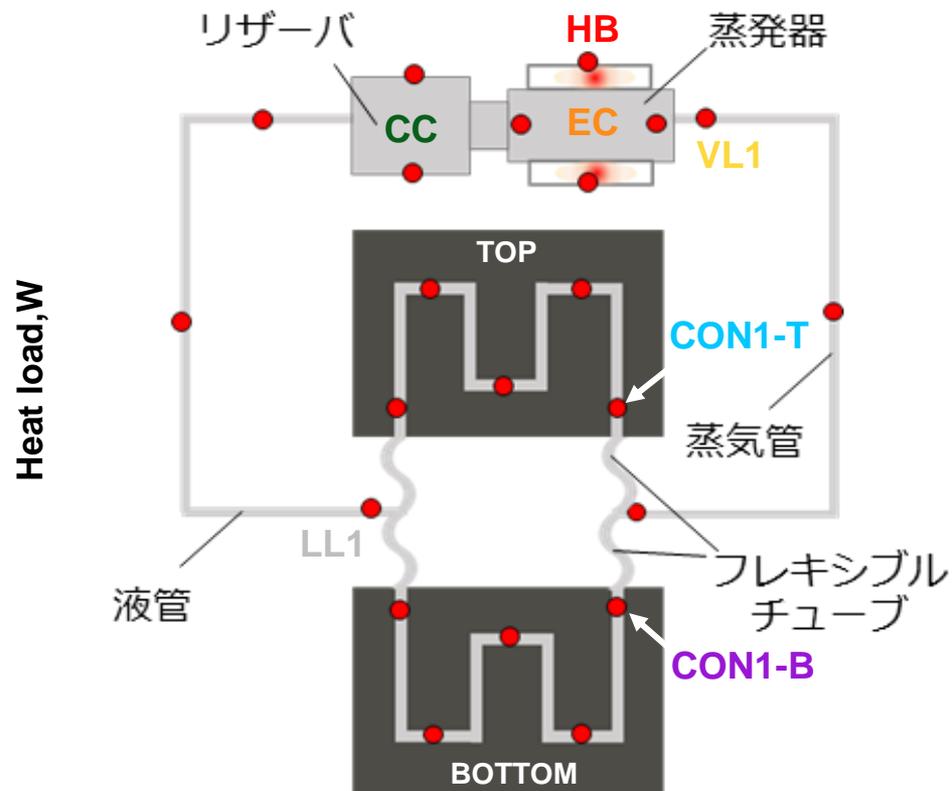
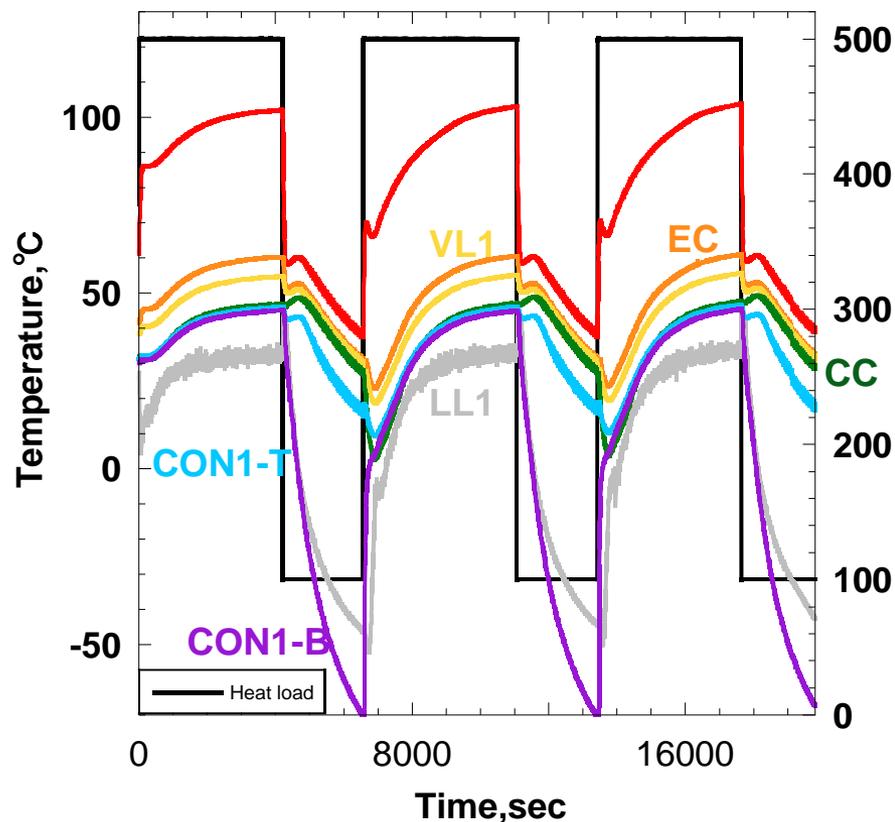
■ ステップアップ試験結果（熱真空試験）



結果

✓ 設計時に想定した目標熱輸送量**500W**まで安定動作

■ ステップサイクル試験結果 (100W⇔500W)



結果

✓ 全サイクルにおいて同様の温度挙動, 定常温度を確認した

■ 月面探査の活発化



[1]月極域探査機：LUPEX

無人探査から
有人探査へ



[2]有人と圧ローバー

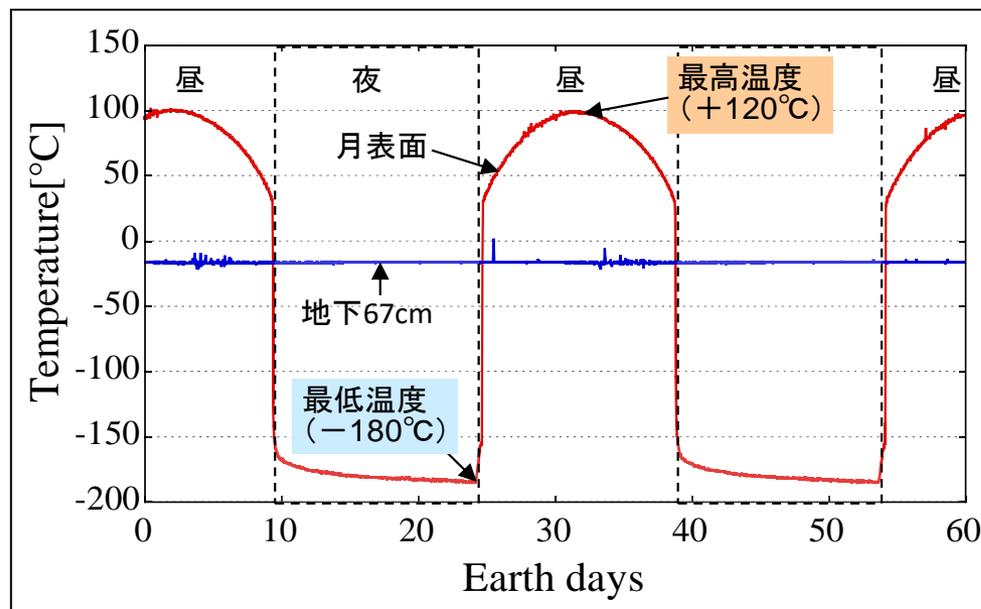
月面での
活動領域拡大



[3]月面基地

■ 月面の温度環境

- ✓ 昼夜の熱環境変化
(昼： $+120^{\circ}\text{C}$ ，夜： -180°C)
- ✓ 昼と夜が14日周期で続く
- ✓ 夜のエネルギー確保（越夜）



将来的な月面ミッションへ向けたLHP式展開ラジエータの開発を目指す

[1]<https://www.exploration.jaxa.jp/program/lunarpolar/>

[2] <https://humans-in-space.jaxa.jp/biz-lab/tech/rover/>

[3] <https://humans-in-space.jaxa.jp/future/>