

月面サーマルマイニングを指向した低温ガス吸着回収技術の開発

信州大学・高砂熱学工業株式会社

研究背景

■ 月面上の資源

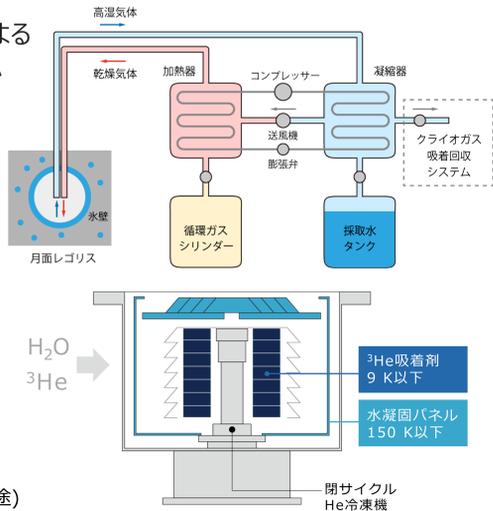
アポロ11号サンプルを700°C加熱した際の放出ガス

成分	³ Heに対する物質量比
H ₂	9200
⁴ He	2300
³ He	1
H ₂ O	550
N ₂	54
CH ₄	300
CO	200
CO ₂	120

Lunar Helium-3: Mining Concepts, Extraction Research, and Potential ISRU synergies, Aaron D.S. Olson.

■ サーマルマイニングによる月面水採掘システム (高砂熱学工業)

熱交換ガスの循環によって月面レゴリス中の水を融解・蒸発させることにより水を回収



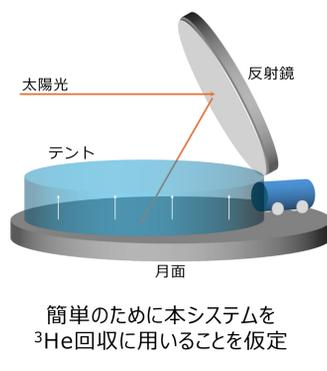
■ クライオガス吸着回収システム

水回収後の残余ガス中に含まれる³Heを吸着剤を用いた冷凍機システムにより回収

³He価格：23億円/kg (量子コンピューター冷却用途)

サーマルマイニング：ガス分圧の推算

コロラド鉱山大学による月面水採取システムのイメージ⁴⁾



レゴリス計算条件
レゴリス粒子密度：1100 kg/m³¹⁾
レゴリス粒子内³He濃度：30 ppb²⁾
H₂濃度：0.50 wt%
放射率：16% (300 K)³⁾
レゴリス粒子間空隙
充填率：74.05% (球の最密充填)

1. P. O. Hayne et al., J. Geophys. Res.: Planets 2017, 122, 2371.
2. F. H. Cocks, Icarus 2010, 206, 778.
3. H. Song et al., Minerals 2021, 11, 319.
4. G. Sowers, Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, Colorado School of Mines, NIAC Phase Final Report (2020).

ガス捕集テント計算条件
高さ：4 m⁴⁾
直径：30 m⁴⁾
温度：300 K
加熱されるレゴリスの深度：1 cm⁴⁾

テント内ガス分圧 ³He：8.07×10⁻³ Pa H₂：2.03×10³ Pa

研究目的 低圧力³Heガスの回収に適した細孔構造と吸着温度の探索

シミュレーションモデル

■ カーボンスリット型細孔モデル

● 吸着分子間相互作用

Lennard-Jones 12-6型ポテンシャル

$$V(r) = 4\epsilon_{ff} \left[\left(\frac{\sigma_{ff}}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{ff}}{r} \right)^6 \right]$$

● 吸着分子-グラファイト間相互作用

Steeleの10-4-3ポテンシャル

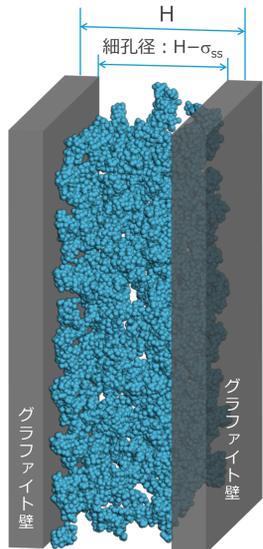
$$V^{slab}(z) = 2\pi\rho_s\sigma_{sf}^2\epsilon_{sf}\Delta \left[\left(\frac{2}{5} \right) \left(\frac{\sigma_{sf}}{z} \right)^{10} - \left(\frac{\sigma_{sf}}{z} \right)^4 - \frac{\sigma_{sf}^4}{3\Delta(z+0.61\Delta)^3} \right]$$

$$V^{slit}(z) = V^{slab}(z) + V^{slab}(H-z)$$

● ポテンシャルパラメータ

³ He/ ⁴ He	$\sigma_{ff} = 2.556 \text{ \AA}$, $\epsilon_{ff}/k_B = 10.22 \text{ K}$
H ₂	$\sigma_{ff} = 2.958 \text{ \AA}$, $\epsilon_{ff}/k_B = 36.7 \text{ K}$
グラファイト	$\sigma_{ss} = 3.4 \text{ \AA}$, $\epsilon_{ss}/k_B = 28.0 \text{ K}$

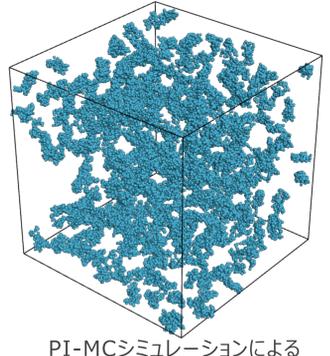
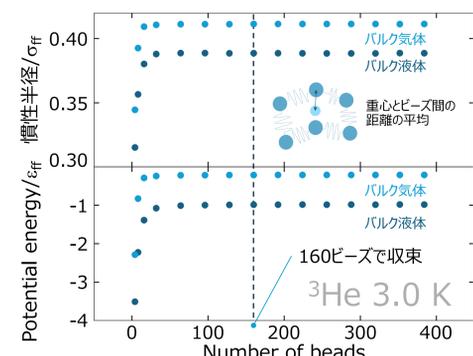
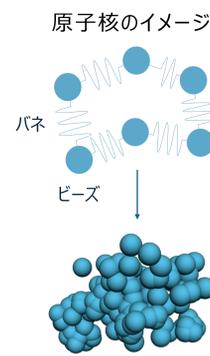
(異種原子間にはLorentz-Berthelot則を適用)
グラファイト原子密度： $\rho_s = 0.114 \text{ atoms/\AA}^3$
グラファイト面間隔： $\Delta = 3.35 \text{ \AA}$



量子性の取り扱い

ファインマンの経路積分(PI)法

原子核の位置不確定性を多数のビーズがバネで結ばれたポリマーリングで表現



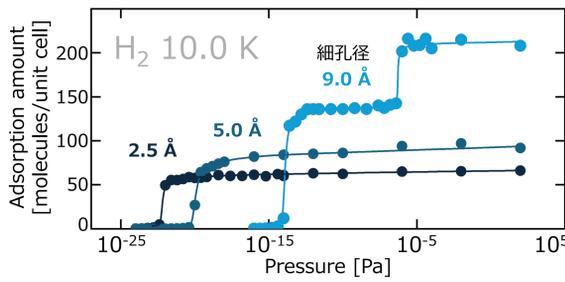
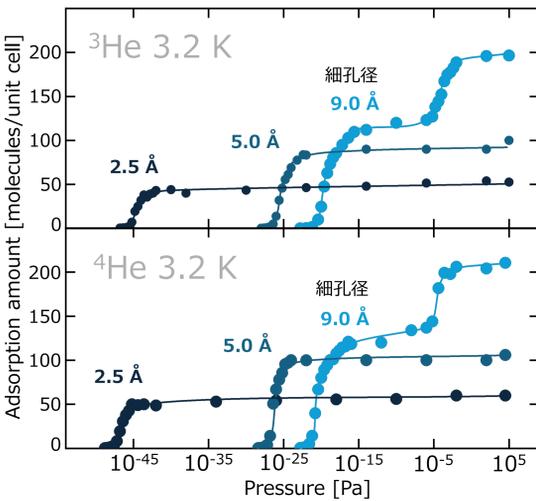
PI-MCシミュレーションによるバルク液体のスナップショット

極低温下における量子効果を160ビーズ/原子核で取り扱い可能

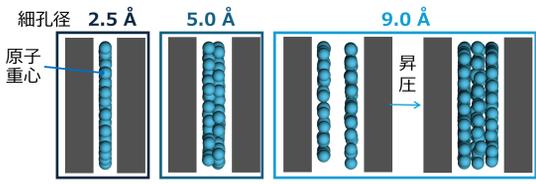
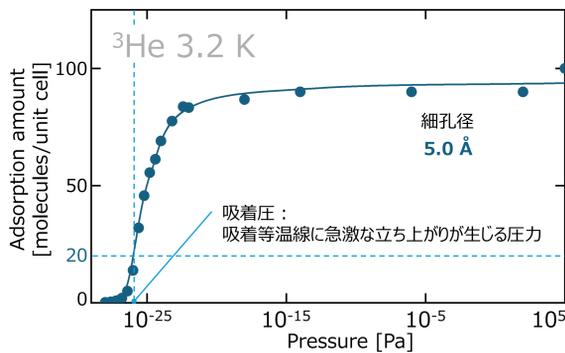
PI-GCMCシミュレーション

シミュレーション条件

吸着質：³He, ⁴He 温度：3.0 ~ 21.0 K 細孔径：2.5 ~ 9.0 Å
吸着質：H₂ 温度：10.0 ~ 30.0 K 細孔径：2.5 ~ 9.0 Å

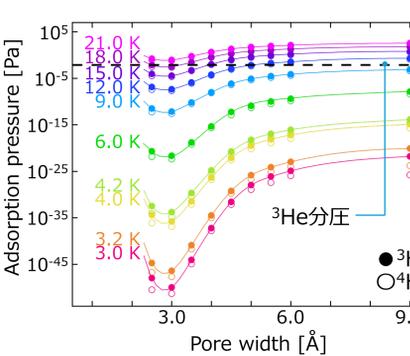


■ 吸着圧の定義



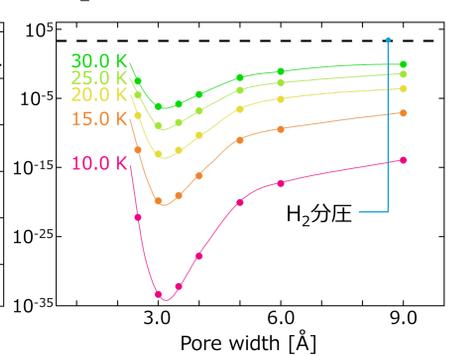
³He回収可能性の検討

■ ³He/⁴He吸着圧の温度依存性



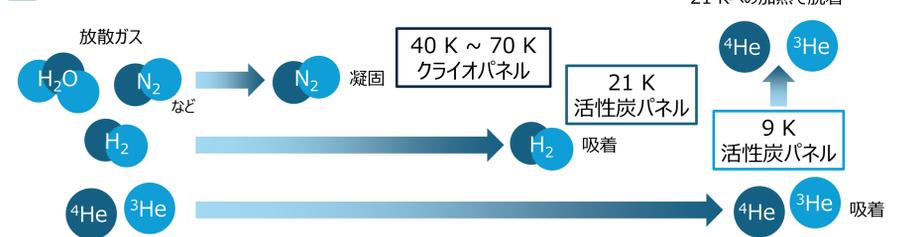
He：9 K以下で吸着回収可能

■ H₂吸着圧の温度依存性



H₂：30 K以下で吸着回収可能

■ 想定されるガス回収システムフロー



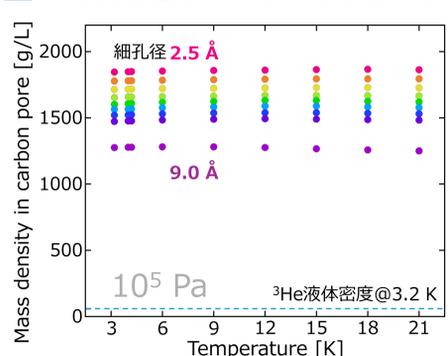
³He貯蔵への応用検討

■ ³Heの質量密度・体積密度の評価

質量密度 [g/L]：貯蔵容器体積当たりの活性炭および³Heの全質量
体積密度 [mol/L]：貯蔵容器体積当たりの³He物質量

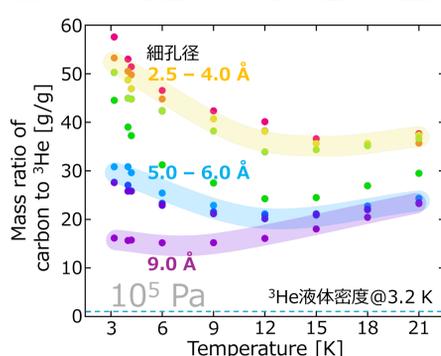
グラファイト
グラファイト
グラフェン層が3層積層

■ ³He質量密度の温度・細孔径依存性

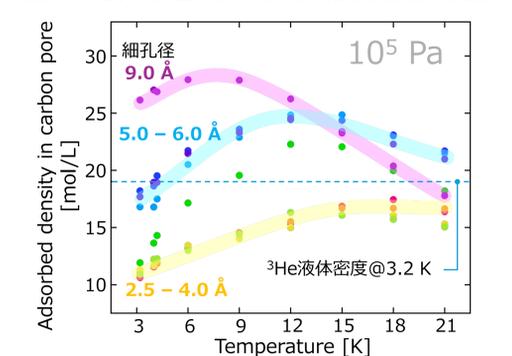


液体貯蔵容器に対して質量密度では不利

■ ³He吸着量に対する活性炭質量比



■ ³He体積密度の温度・細孔径依存性



液体貯蔵容器に対して体積密度では有利