

# 先端科学技術を支える物質 – ヘリウム – の不思議

低温科学研究センター 福山 寛

1. ヘリウム元素
2. ヘリウムガスの性質と用途
3. 先端研究を支える液体ヘリウムの不思議な性質
4. 希少なヘリウム資源を大切に使う



# ヘリウム元素

Periodic Table

© 日本化学会

The image shows a standard periodic table of elements. The Helium element (He, atomic number 2) is highlighted with a red rectangular box. The table includes elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og), with the Lanthanide and Actinide series shown below the main body.

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Ac 89	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118
La系		Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71		
Ac系		Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103		

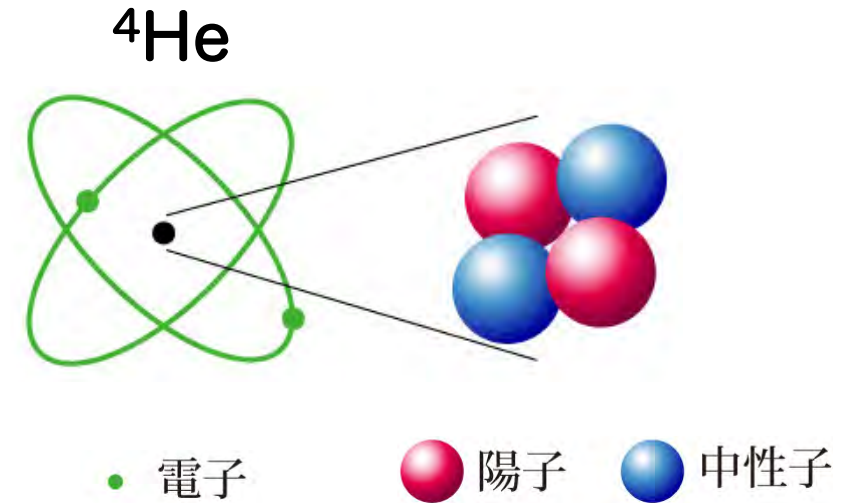
# ヘリウム元素

- 原子量 (4) が自然界で2番目に小さい (原子直径も小さい)

${}^4\text{He}$ ,  ${}^{14}\text{N}_2$ ,  ${}^{16}\text{O}_2$ ,  ${}^{54}\text{Xe}$

- 希ガス原子で化学的に不活性

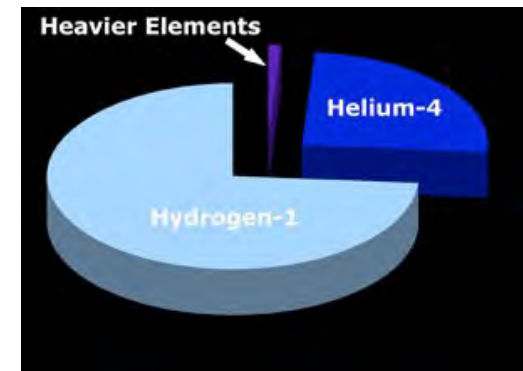
- 👉 非常に軽く不活性なガス
- 👉 熱をよく伝えるガス
- 👉 狭い隙間もすり抜けるガス



1802年、1814年、1868年 (ピエール・ジャンサン)  
皆既日食時に太陽光スペクトルに暗線として発見  
仮想元素「ヘリウム」

1882年、1895年 (ウィリアム・ラムゼー)  
鉱石から分離されて地上で発見され、実在が確定

宇宙で2番目に大きな存在比





# ヘリウムガスの用途（浮揚体）

## 気球



© Space Perspective

非常に軽く、安全な気体

## 飛行船



© Zeppelin NT

## 風船



© オリエンタルランド

# ヘリウムガスの用途 (半導体産業)

光ファイバーの製造や半導体微細加工  
における冷却ガスやキャリアガス

シリコンウェハー冷却ガス

ヘリウム密封型大容量  
ハードディスクドライブ

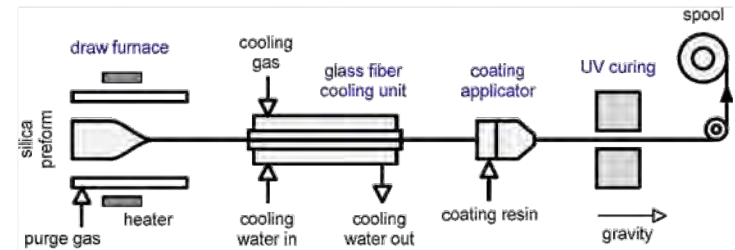
記憶容量 +50%  
消費電力 -25%



© amazon



© Fujikura



K. Kim, IJMET 9, 1106 (2018)

# (参考) 気体分子運動論

$$\text{気体の熱伝導率} : \kappa = \frac{1}{3} n c \bar{v} l \approx \frac{4}{d^2} \left( \frac{k_B}{\pi} \right)^{3/2} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

$m$  : 分子の質量  
 $d$  : 分子の直径  
 $n$  : 分子数密度  
 $\rho$  : 気体の密度  
 $k_B$  : ボルツマン定数

$$\text{理想気体の比熱} : c = \frac{3}{2} k_B$$

(単原子分子の場合)

$$\text{気体の粘性係数} : \eta \propto \sqrt{\frac{m}{T}}$$

$$\text{平均自由行程} : l = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma n}$$

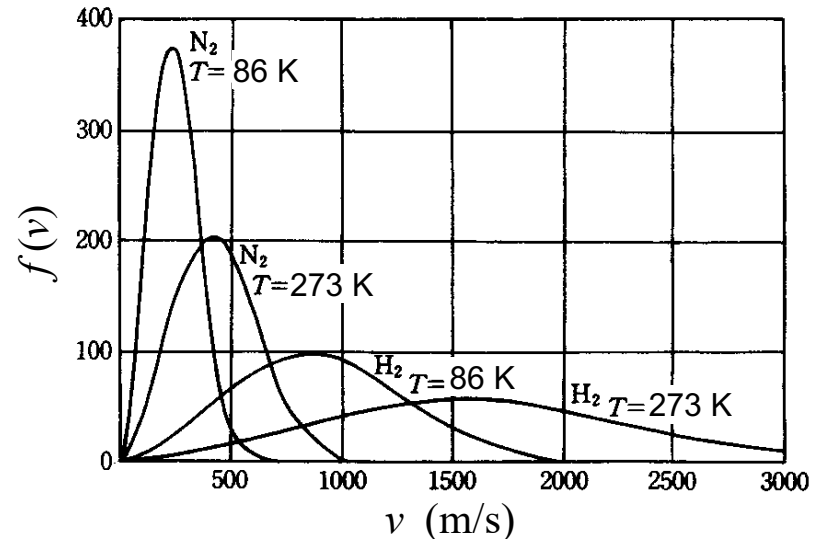
(分子が他の分子と衝突するまでに進む距離)

$$\text{散乱断面積} : \sigma \approx \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2$$

(分子の実効的な断面積)

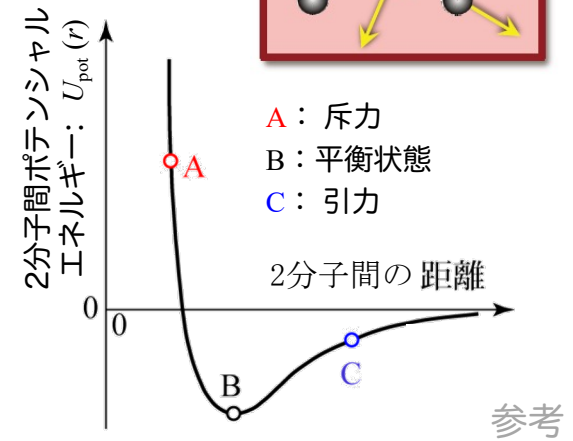
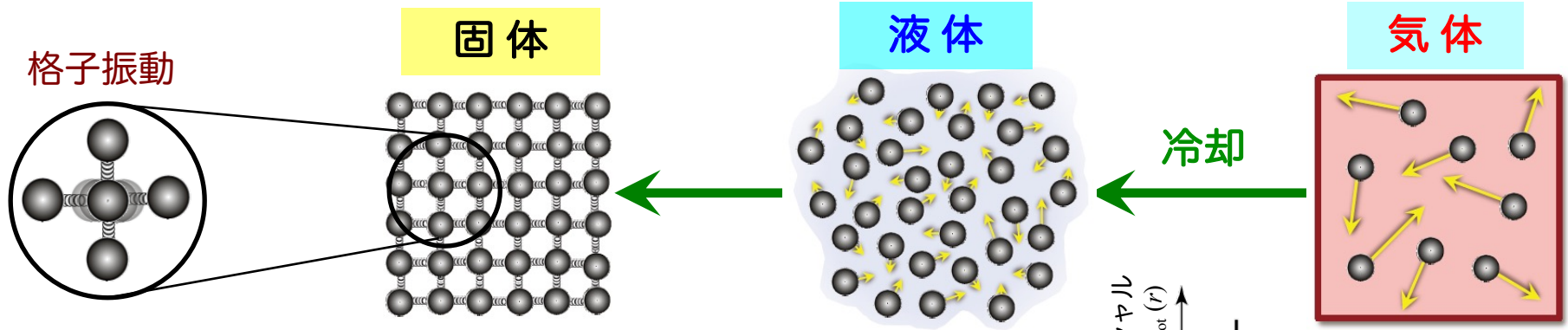
$$\text{分子の平均速度} : \bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$$

窒素分子と水素分子のマックスウェル速度分布



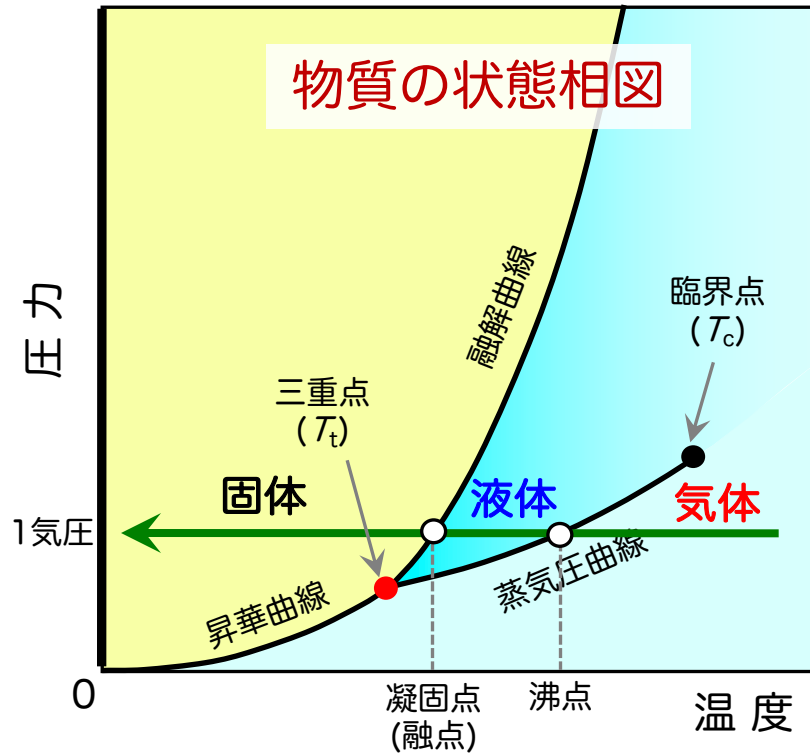


# 低温になると、物質は粒子間引力のため状態変化 (相転移) する



(古典力学での)  
**絶対零度**

粒子が全て静止した  
最低エネルギー状態



ヘルムホルツの自由エネルギー  $F$  を最小にするのが熱平衡状態

$$F = U - TS$$

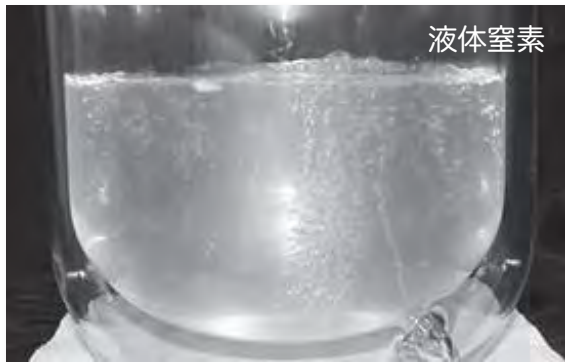
$U$ : 内部エネルギー  
 $S$ : エントロピー

低温では右辺第2項が小さいので、第1項の  $U$  が低い状態に移ろうとする。

# 液体寒剤（低温寒剤、液化ガス）の特徴

- 極低温環境を容易に実現でき、冷却力が大きい (潜熱と顕熱)
- 高密度貯蔵ができ (ガスの600~700倍)、運搬も容易
- 被冷却物との熱接触がよく、熱伝導率が高い (対流)

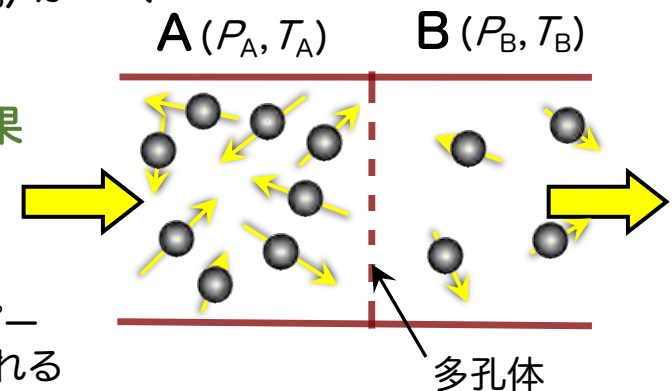
液体窒素 ( $N_2$ ) 沸点 = 77 K (=  $-196^\circ\text{C}$ )  
メタン ( $CH_4$ ) 沸点 = 112 K (=  $-161^\circ\text{C}$ )



## (参考) ジュール-トムソン冷却 (ガスの液化)

多孔体で隔てた二つの空間A, Bの圧力がそれぞれ一定に保たれるよう ( $P_A > P_B$ ) 実在気体を定常的に流すと、両空間の気体に温度差 ( $T_A \neq T_B$ ) がつく

### ジュール-トムソン効果



このとき、気体のエンタルピー  $H (= U + pV)$  が一定に保たれる



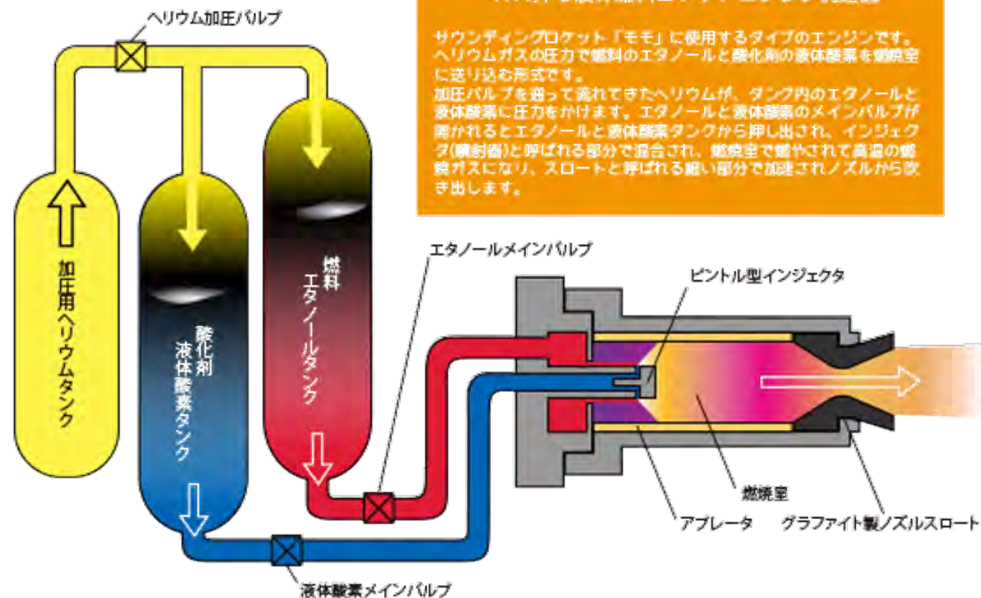
# ヘリウムガスの用途 (ロケット)

## ロケット液体燃料の加圧・噴霧

液体酸素の沸点：90 K

液体水素の沸点：20 K

液体Heの沸点：4.2 K



**ガス押し液体燃料ロケットエンジン構造図**

サウンディングロケット「モモ」に使用するタイプのエンジンです。ヘリウムガスの圧力で燃料のエタノールと酸化剤の液体酸素を燃焼室に送り込む形式です。

加圧バルブを過ぎて流れてきたヘリウムが、タンク内のエタノールと液体酸素に圧力をかけます。エタノールと液体酸素のメインバルブが開かれるとエタノールと液体酸素タンクから押し出され、インジェクタ(噴射器)と呼ばれる部分で混合され、燃焼室で燃やされて高温の燃焼ガスになり、スロットと呼ばれる狭い部分で加速されノズルから吹き出します。

### フェアリング

ロケットの先端部分で、GFRP(ガラス繊維強化プラスチック)でできており、打ち上げ時の空気抵抗を減らし、搭載しているペイロード、アピオニクスを守ります。

### アピオニクス搭載部

機体をコントロールするためのコンピュータ、センサー、通信機器が載っています。

### 加圧用ヘリウムタンク

このタンクに蓄えられたヘリウムガスの圧力でエタノールと液体酸素をエンジンに押し出します。

### ペイロード収納部

宇宙空間に運ぶ荷物(観測機器、実験装置等)を搭載する部分です。外部から電気が供給され、気密、水密構造にもできます。

### バルブ駆動用窒素タンク

ヘリウムの加圧バルブやエタノールのメインバルブを空圧で駆動するための窒素を貯蔵したタンクです。

### エタノールタンク

燃料であるエタノール(エチルアルコール)のタンクです。アルミ合金でできています。

### 液体酸素タンク

燃料を燃焼させるための酸化剤として液体酸素を搭載しています。また、タンクとタンクの間などの胴体の筒の部分はCFRPと呼ばれる炭素繊維強化プラスチックでできています。

### ロール制御用ガスジェット

機体の進行方向を軸とする回転に対しての姿勢制御機構です。ガス酸素とエタノールを燃焼させ、発生したガスを可動式ノズルから噴出して、その反動で制御します。

### 尾翼

機体の安定性を上げるためのものです。

### 姿勢制御機構

モーターで駆動するジンバル機構によってエンジンの向きを変え、ロケットの進行方向を制御します。

### 14kN エンジン

14kNとは1.4トンの重さの物体を持ち上げ続けられる力の大きさです。エタノールと液体酸素をエンジンの燃焼室で混合し燃焼させ、その燃焼ガスの反動で進みます。

### サウンディングロケット

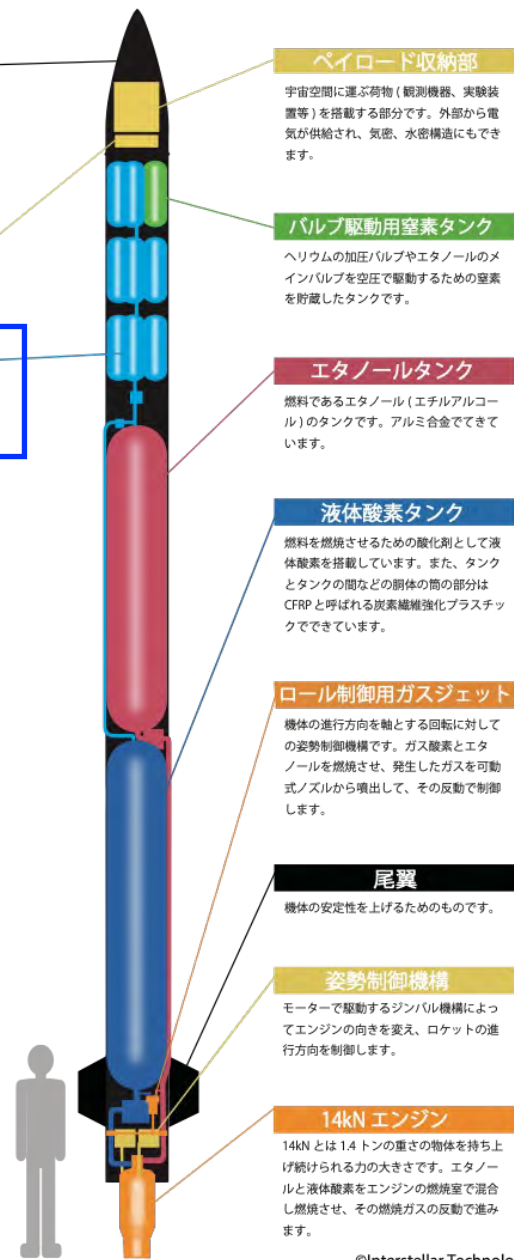
MOMO  
モモ

### 内部構造図

サウンディングロケットとは、弾道飛行を行う観測ロケットです。様々な実験、観測機器をペイロードとして搭載し宇宙空間に運びます。

### 機体データ

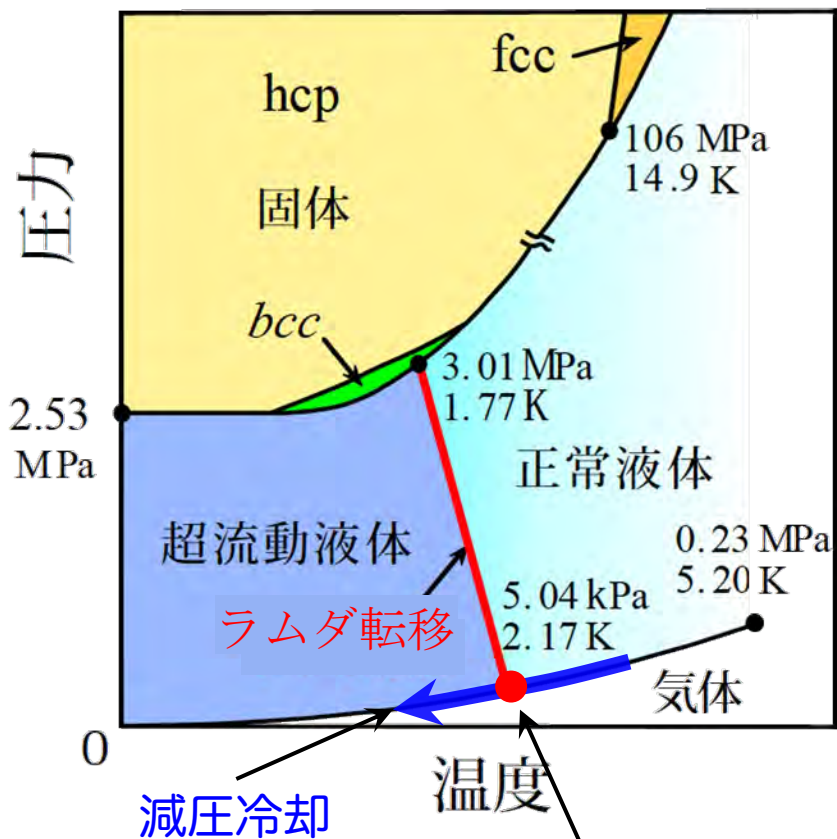
機体全長	… 10.1 m
機体全備重量 (推進剤を含む)	… 1220kg
機体乾燥重量 (推進剤を含まない)	… 370kg
機体外径	… 500 mm
推力	…14kN (1.4 トン)
微小重力状態	…約 260 秒間



# ヘリウム4の不思議な低温相図

実験室で扱える最も純粋で単純な物質

ヘリウム( $^4\text{He}$ )の状態相図



ラムダ点 ( $T_\lambda = 2.17 \text{ K}$ )  
で超流動転移

- 零点振動が大きく、絶対零度でも固化しない  
量子液体 (三重点の消失)  
→ 不純物は全て容器底に沈殿する
- ラムダ点以下で超流動状態に相転移

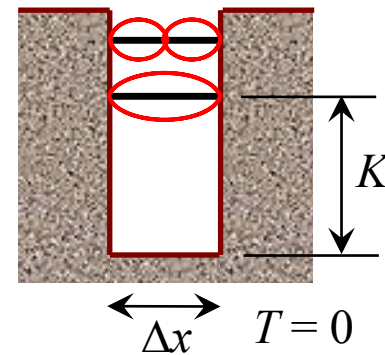
## 量子力学でしか理解不能

ハイゼンベルクの不確定性原理

$$\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar : \text{プランク定数}$$

$$K \approx \frac{\Delta p^2}{2m} \approx \frac{\hbar^2}{2m\Delta x^2} : \text{零点振動エネルギー}$$

粒子質量 $m$ が小さいほど量子的



# 超流動<sup>4</sup>Heのスーパーリーク

<http://qfs2018.sakura.ne.jp/kelvin/japanese/research/helium.html>

スーパーリーク (常流動)



粘性がなく、チョークの粉の非常に狭い隙間も流れる

粘性の消失は、壁表面と保存則を満たすエネルギーと運動量のやり取りができず、流れのエネルギーが減じないため

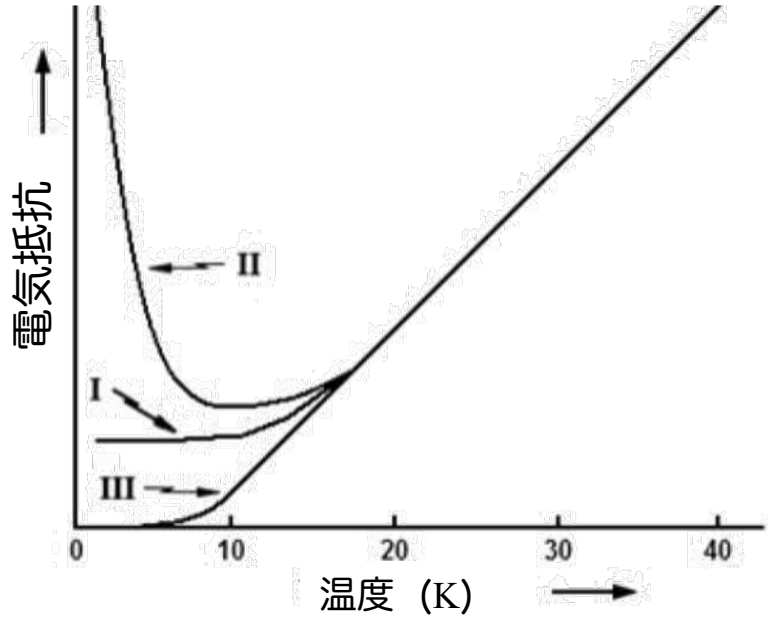
© Fukuyama lab



# 超伝導現象 (金属中の伝導電子の“超流動”)

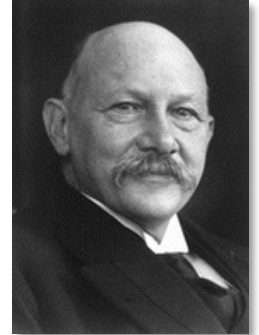
## 超伝導の発見 (1911年4月)

金属の電気抵抗に関する異なる理論予想 (20世紀初頭)

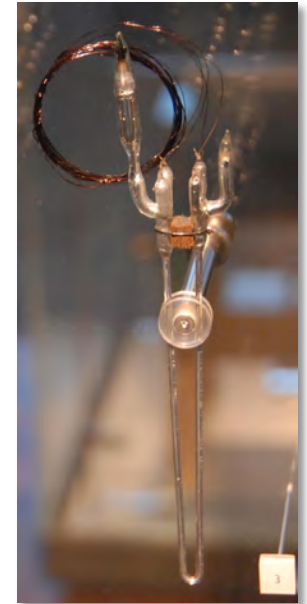
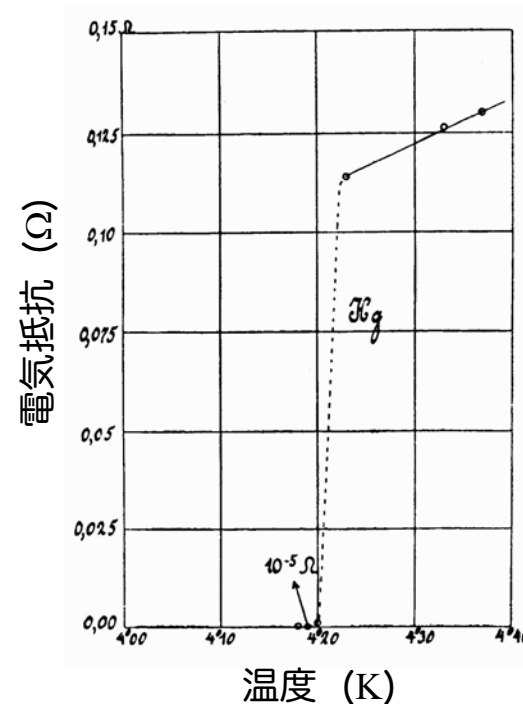


- 予想 I 不純物で決まる残留抵抗
- 予想 II 極小点をもち、絶対零度では発散
- 予想 III ゼロに近づく

1908年7月に初めてヘリウムの液化に成功したカマリン・オネス (オランダ) が、水銀試料を使って  $T_c = 4$  K で発見



ノーベル物理学賞 (1913年)

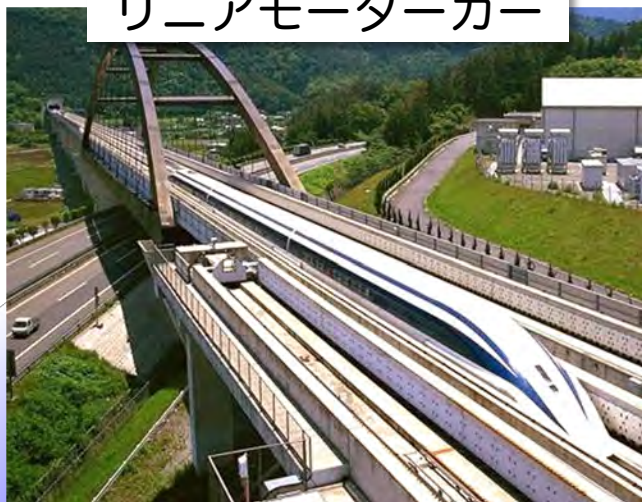


# 液体Heは超伝導マグネットの冷却に広く使われている

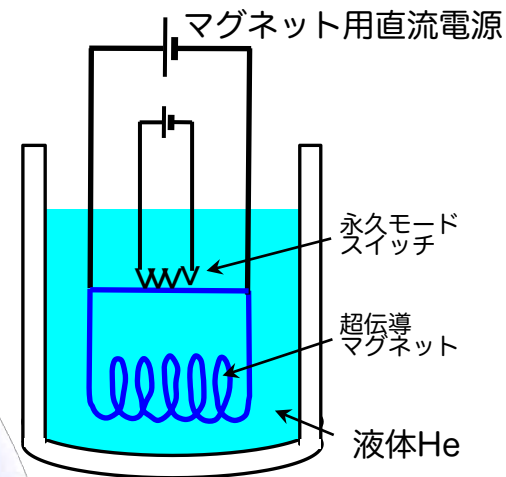
磁気共鳴イメージング (MRI)



リニアモーターカー

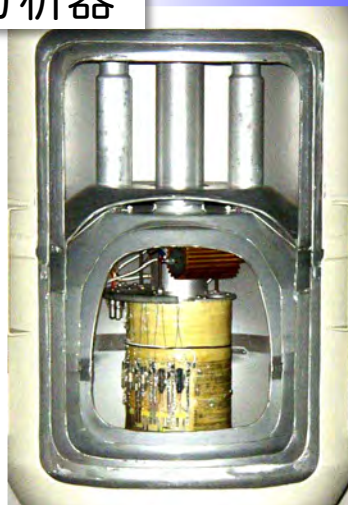


永久電流回路



## 超伝導マグネット

NMR分析器



from Varian社

素粒子加速器 (CERN)

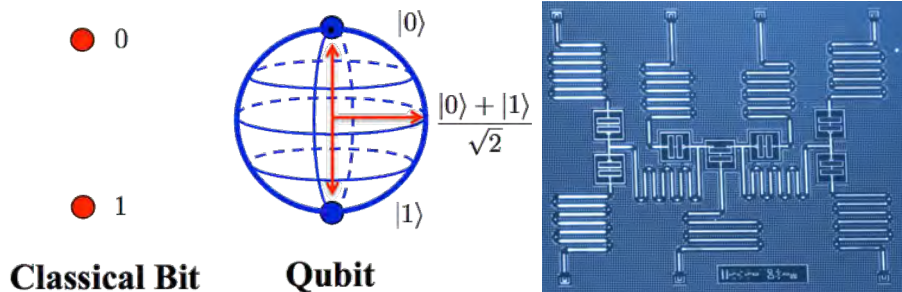




# $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 希釈冷凍機が作るミリケルビンの世界

## 量子コンピュータ

© IBM



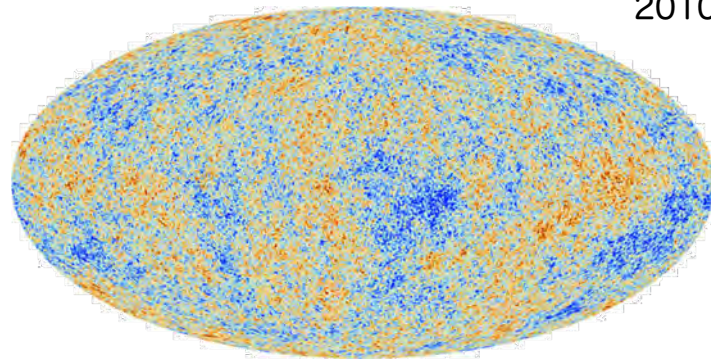
当センターの  
ミリケルビン量子プラットフォーム

10 mKの極低温で超伝導量子ビット研究が  
できる最先端の共同利用設備

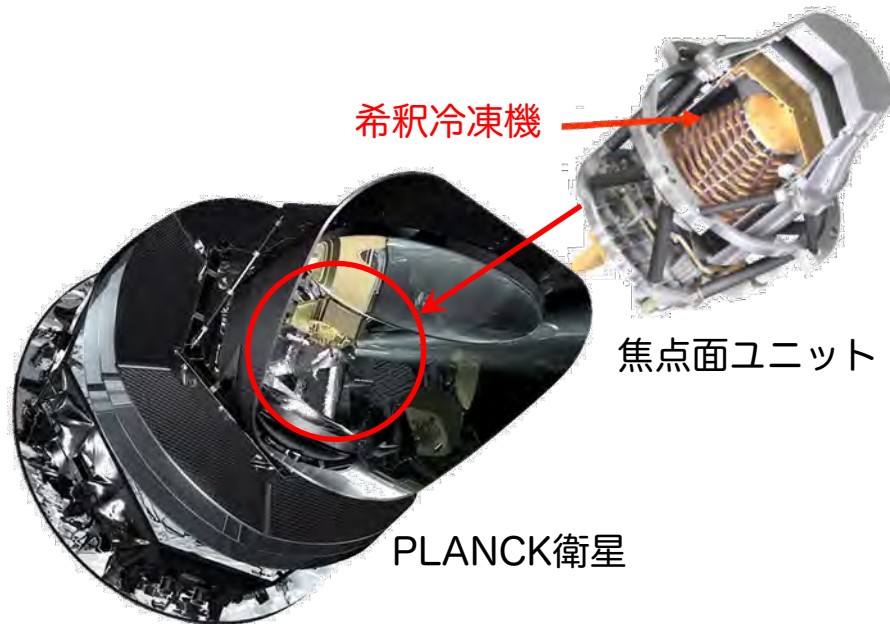


## 宇宙マイクロ波背景輻射検出器 (PLANCK衛星)

ヨーロッパ宇宙機関 (ESA)  
2010-2013



マイクロ波検出の心臓部を  $T = 100 \text{ mK}$ まで冷却

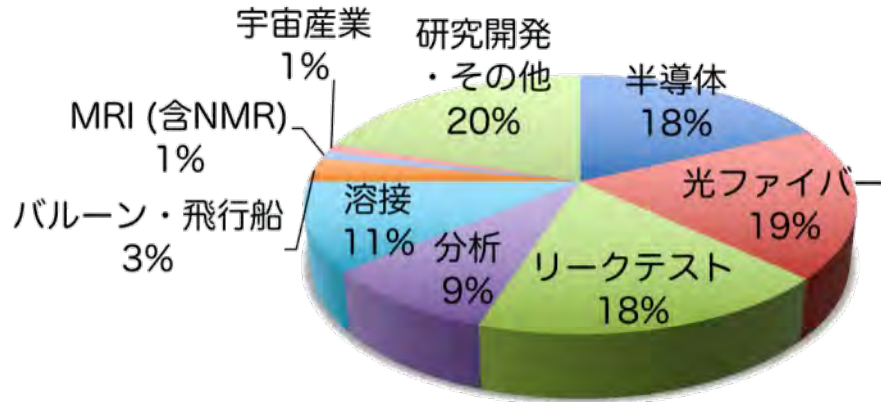




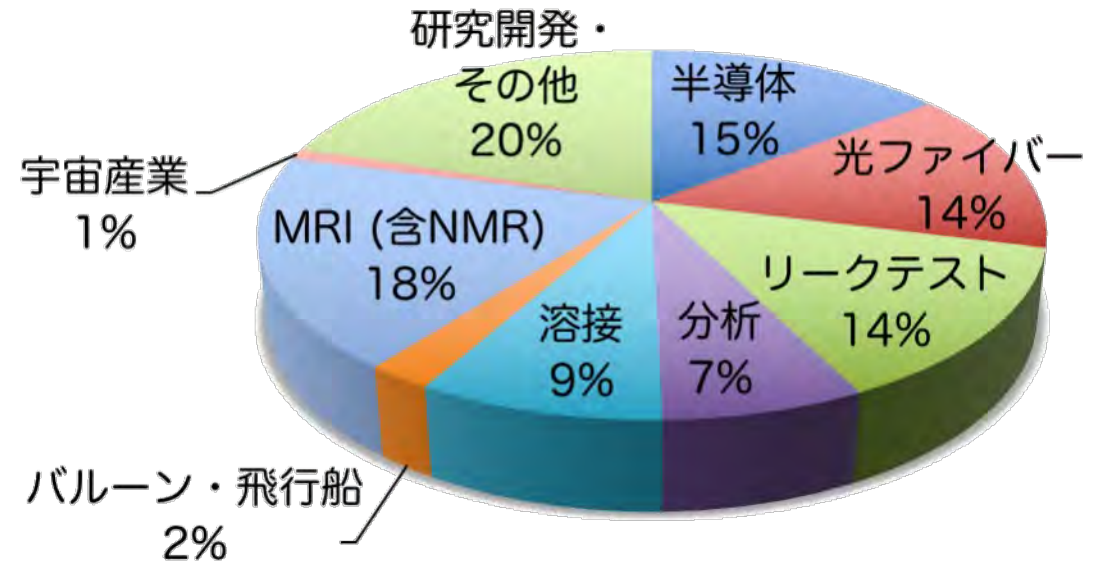
# ヘリウムの国内需要と利用分野 (2018年)

(社) 日本産業・医療ガス協会のデータを参考に作成

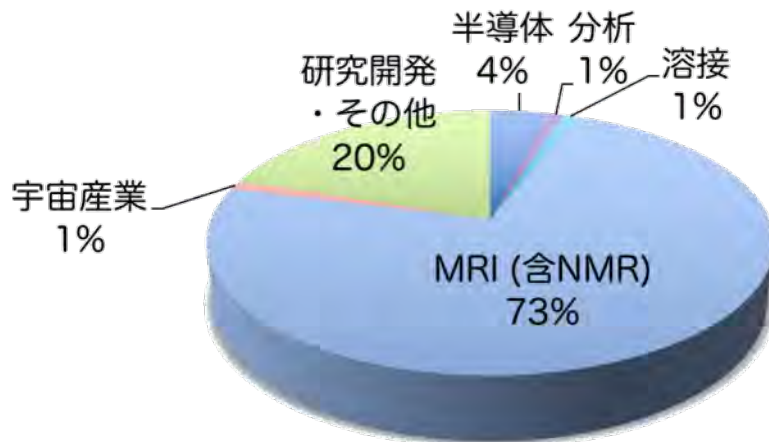
**ヘリウムガス** 7,850千m<sup>3</sup>



**全ヘリウム** 10,380千m<sup>3</sup>  
(ガス換算)

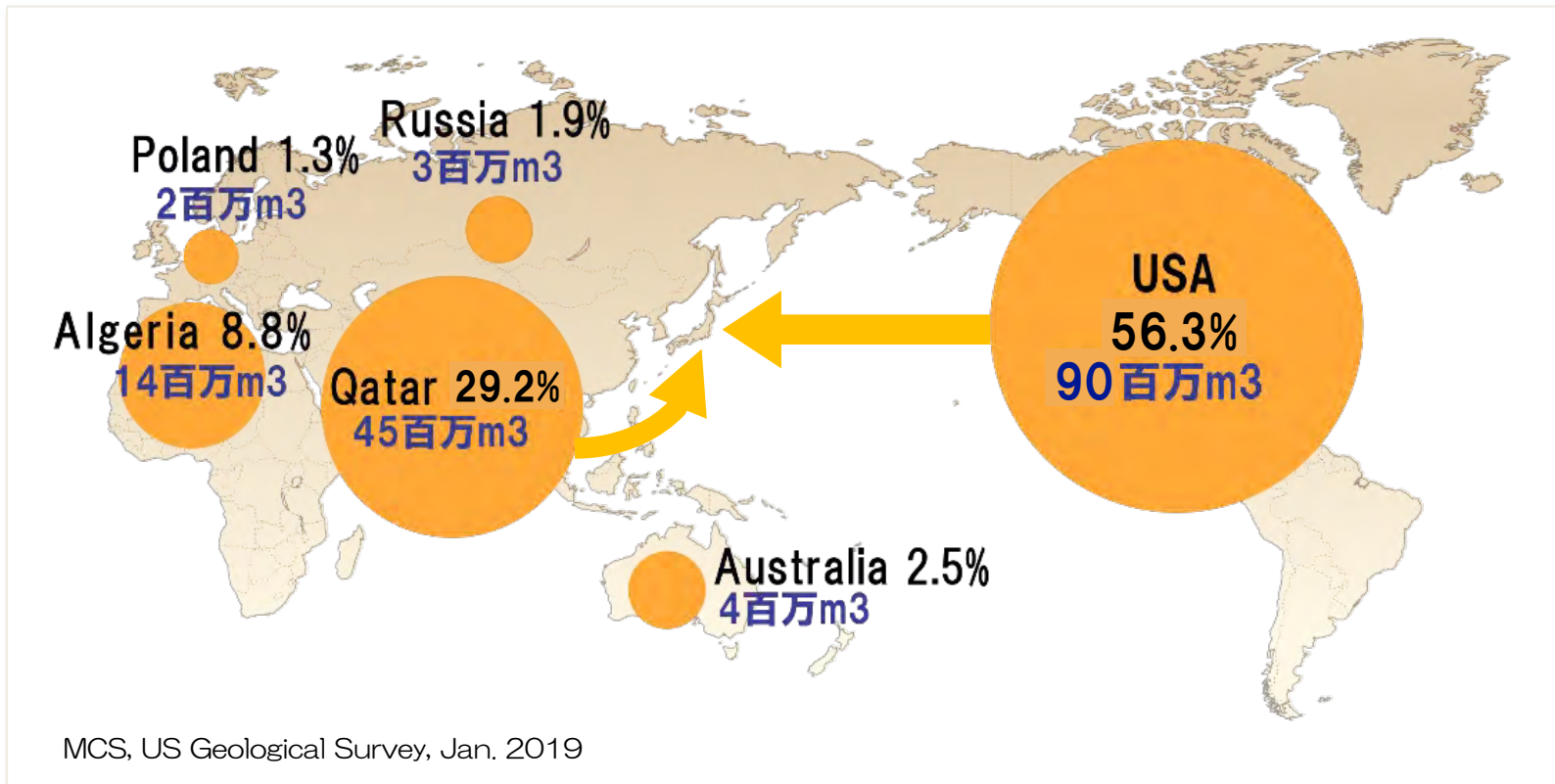


**液体ヘリウム** 2,530千m<sup>3</sup>  
(ガス換算)



※ ガス1 m<sup>3</sup> は 液1.15 L に相当

# 世界のヘリウムガス生産量 (2018年)



コンテナ船  
で海上輸送



液体Heコンテナ  
(4万L)

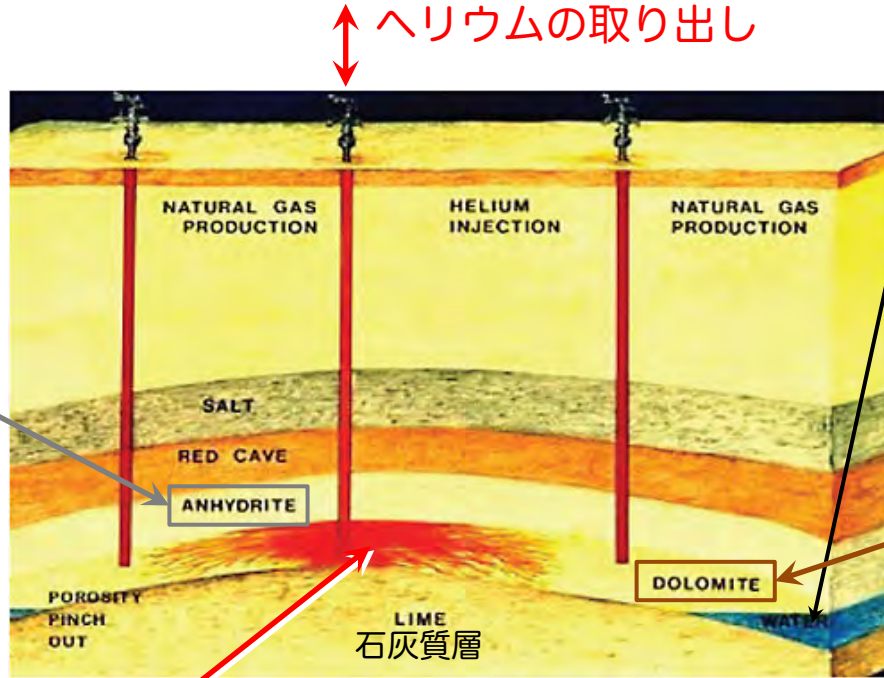
- ▶ 天然ガスとともに地中から産する ( $\alpha$ 崩壊)。空気中にはほとんど含有されない。
- ▶ 日本は100%輸入に頼る稀少な天然資源
- ▶ うち75%を米国から、25%をカタールから輸入  
(2017年 財務省貿易統計)

全生産量

1億6千万m<sup>3</sup>/年  
(ガス換算)

# 地下のヘリウムガス田 (米国Cliffside Field)

**Anhydrite :**  
硬石膏 (CaSO<sub>4</sub>)  
ヘリウムを閉じ込めるキャップ層

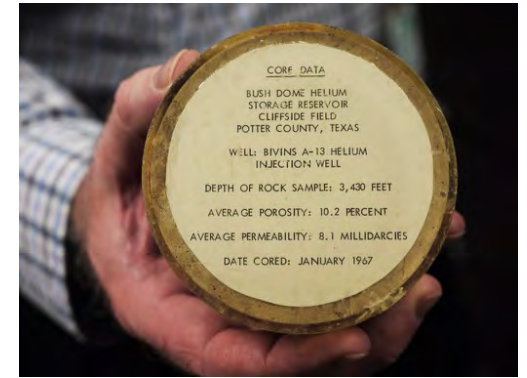


NRC, "Selling the Nation's Helium Reserve" (Nat. Acad. Press, 2010)

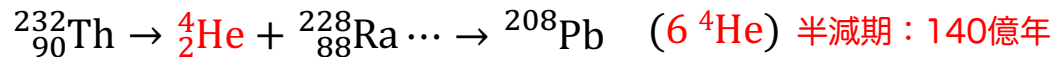
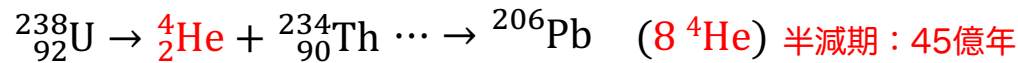
**ヘリウム** (地中の天然ガスと混合) 純度0.1~1%

ガス/水接触 北・東側のキャップ  
(南・西側は地層の空孔率の違いでキャップ)

**Brown Dolomite :**  
苦灰石 (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) の一種  
ヘリウムを溜め込む地層  
(空孔率10%)



数億年にわたって地中の放射性物質がアルファ崩壊して生成したヘリウムが、特別な地層に蓄えられたのがヘリウムガス田



## “Bush Dome Reservoir”

枯渇した古いヘリウムガス田を天然の巨大貯槽として利用



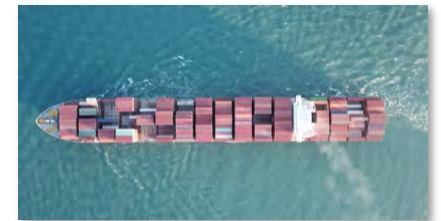
# 世界のヘリウム供給難 (2021年～)



国内供給が  
20～50%減！

## 原因：

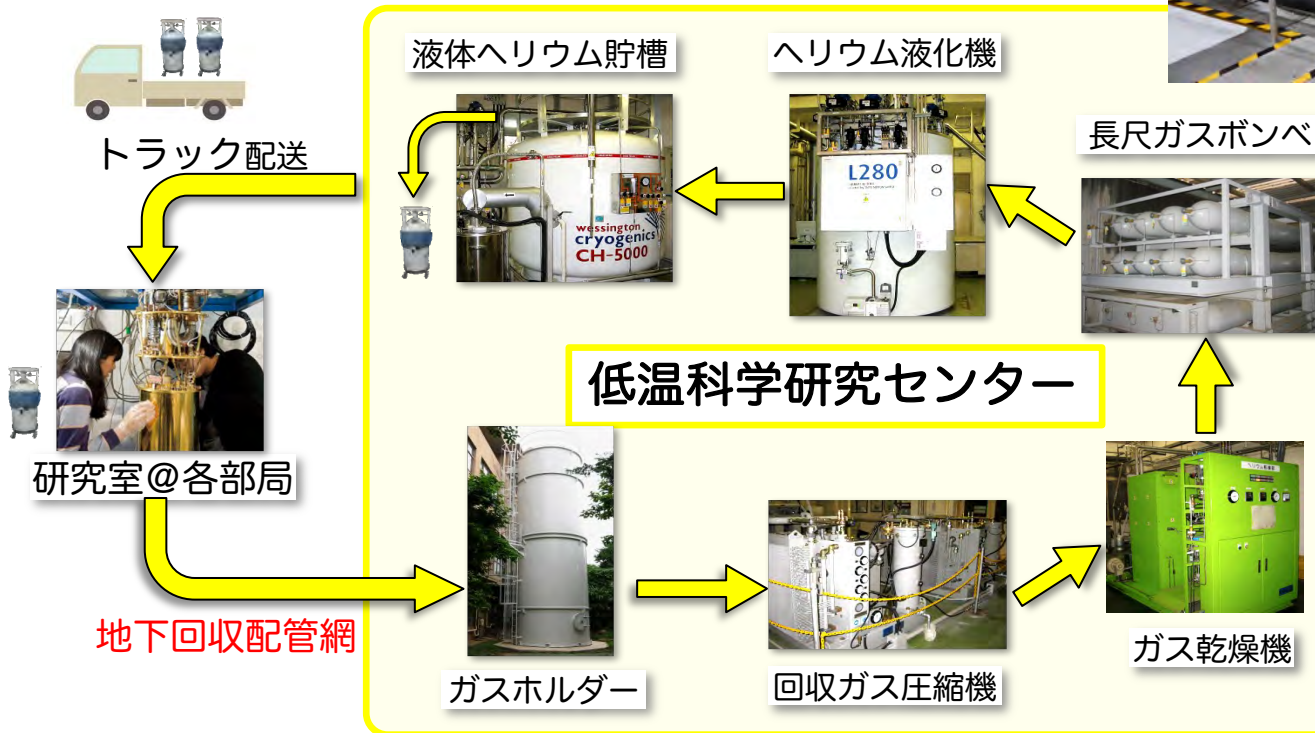
- ・ コロナ禍で海上輸送を中心としたサプライチェーンに多大な影響（コンテナ船の遅延、調達困難）
- ・ 米国ガス精製施設のトラブル
- ・ シベリアの新ヘリウムプラントの立ち上げ不調（火災事故、政情不安）



# 東京大学のヘリウムリサイクル事業

低温科学研究センターでは、本郷地区の3キャンパスで利用して蒸発したヘリウムガスを回収・再液化して、各研究室に液体ヘリウムを安定供給している。

約25万L/年を供給



新型のHe液化機 (250L/h)  
と液体He貯槽 (8,000 L)