

惑星居住を指向した 資源・エネルギー開発

-In-situ Resources Utilization for Long Term Manned Space Mission -

同志社大学工学部・環境システム学科

後藤琢也

本日の話

- その場資源利用の必要性
- 熔融塩電解について
- 実施例
- まとめ

月居住を考えたとき

宇宙環境に適応して生きていく必要

資源とエネルギーの有効利用

In situ Resource Utilization (ISRU)

過酷な環境

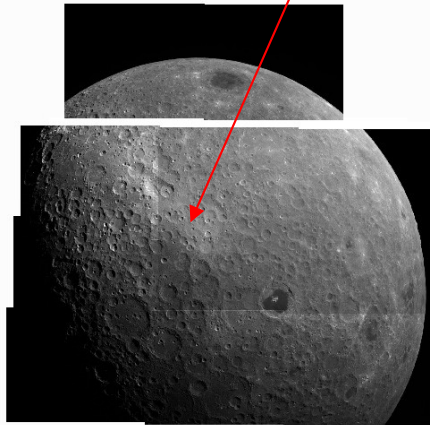
(真空、小重力場、放射線、温度変化)

⇒分離回収に多くのエネルギーが必要

月の地形と地質

高地: 月表面の85%

海: 15%



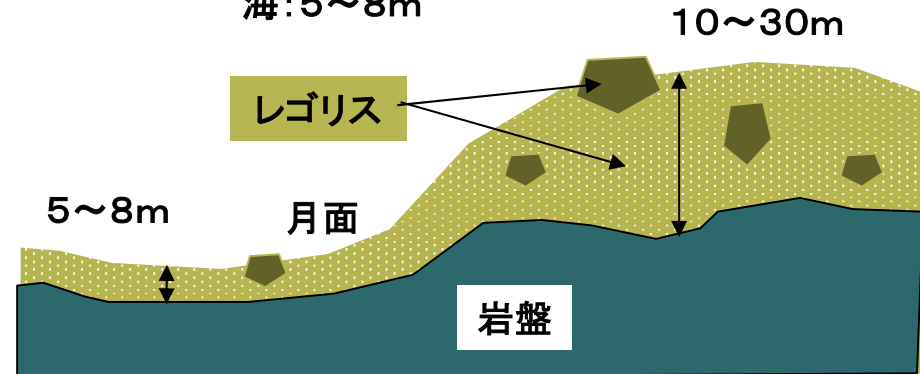
裏側



表側

月表面: レゴリスに覆われている

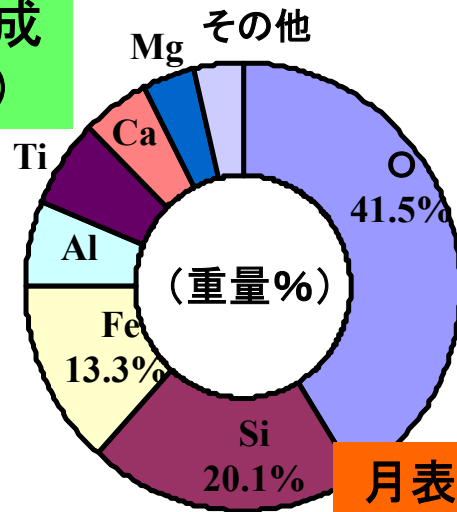
高地: 10~30m
海: 5~8m



(レゴリス: 岩盤を覆っている固着していない岩くず層)

87%以上: 1mm以下
26%以上: 20μm以下の微粒子

レゴリスの組成 (静の海)



レゴリス中の資源

シリケイト: SiO_2 太陽風起源揮発成分: H 、 He
 カンラン石: $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$
 輝石: $(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$
 イルメナイト: FeTiO_3
 斜長石: $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$
 自然鉄: テーナイト γ - (Fe, Ni) 等

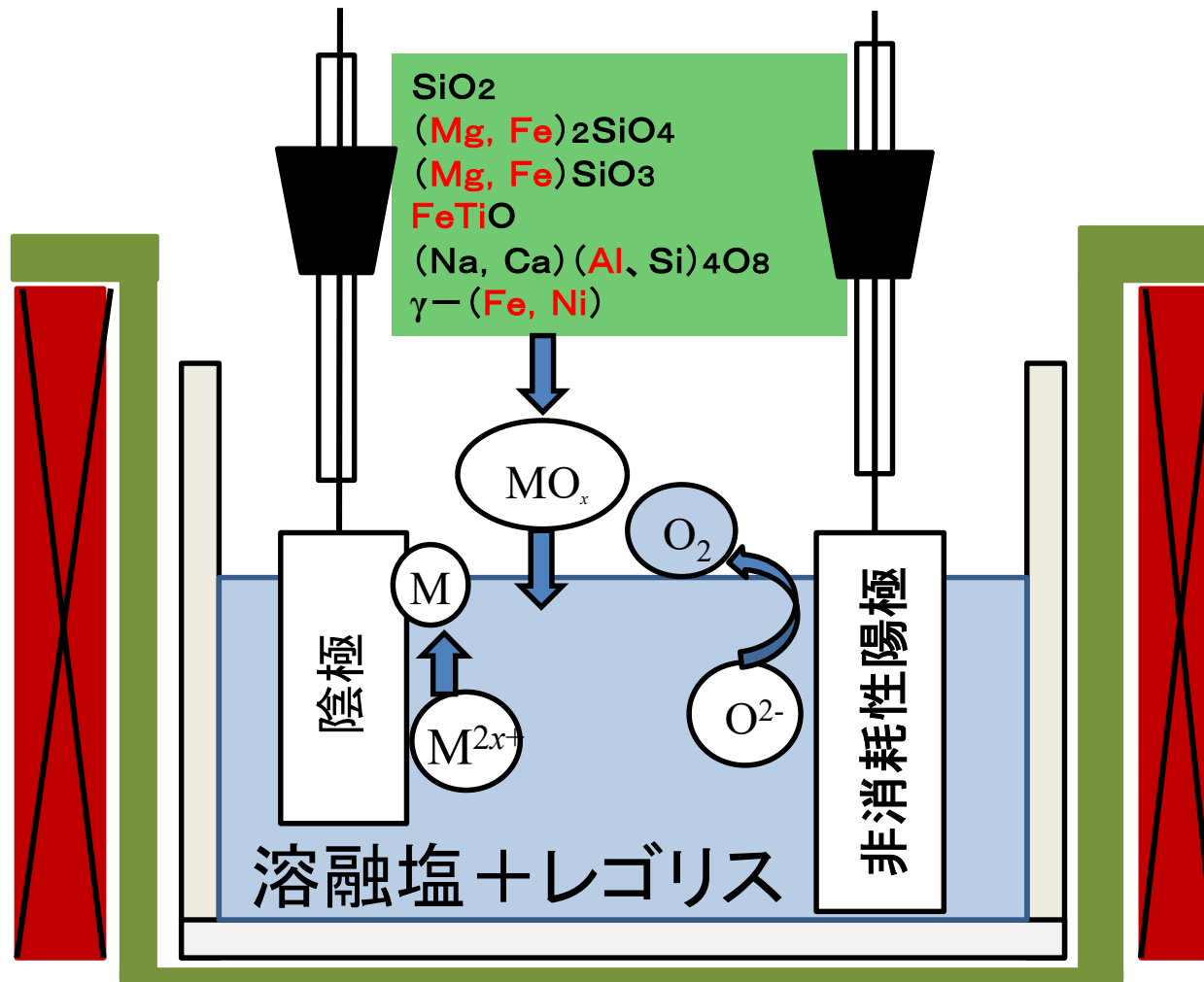
月表面にはレゴリスが無尽蔵にある → レゴリスの活用

酸化物からの分離回収; 電解法が最適

熔融塩電解

レゴリスからの金属と酸素分離の原理

電解による分離回収



溶融塩を電解質

熔融塩（イオン液体）

アニオンとカチオンのみから構成

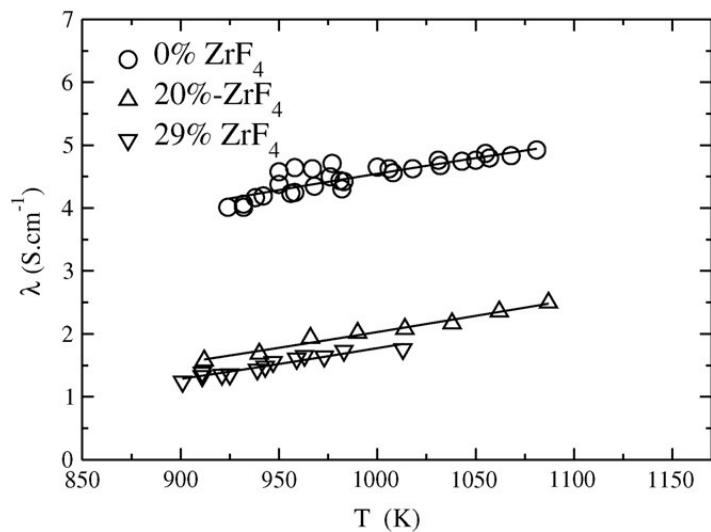
熔融塩の特性

- 何でも溶かすことができる
- 不揮発性
- 化学的・物理的に安定
- 放射線損傷を受けにくい

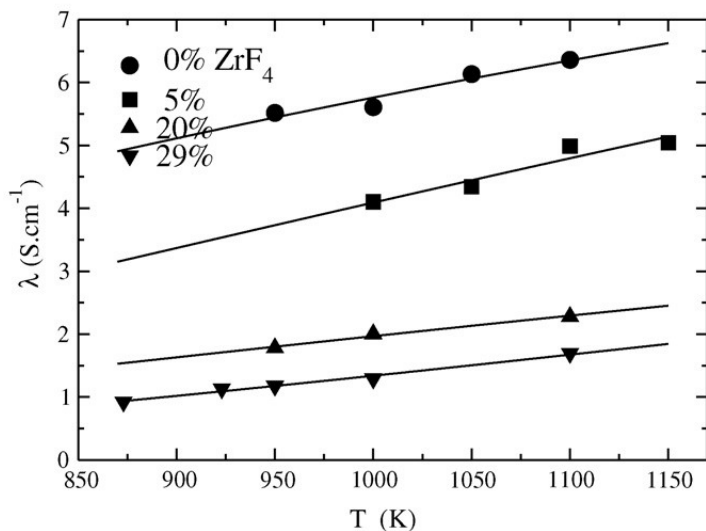
- 代表的な熔融塩の物性(水との比較)

Name Composition	water H ₂ O	Heat Transfer Salt NaNO ₃ -NaNO ₂ - KNO ₃	FLIBE LiF-BeF ₂	FLINAK LiF-NaF-KF	LiCl-KCl
融点 (C°)	0	142	460	454	352
沸点 (C°)	100	~800 (熱分解)	1,151 (BeF ₂)	1,510 (KF)	1,382 (LiCl)
密度 (g/cm ³)	1.0	1.79	1.9	2.0	1.6
粘性 (mPa*s)	1.0	1.3-1.6	5.6	2.9	2.2
熱容量(kJ/kg K)	4.18	1.56	2.41	1.88	1.5
適用	-	冷媒	熔融塩炉/ 再処理	熔融塩炉/ 再処理	使用済燃 料再処理

溶融塩添加による電導度の変化(例) LiF-NaF-ZrF₄



ZrF ₄ mol%	0	20	29
Ea KJ mol ⁻¹	9.3	20.8	24.2



Increase of ZrF₄ → Decrease of electric conductivity

Experimental (top) and simulated (bottom) values for the electrical conductivity as a function of temperature for all the compositions studied.

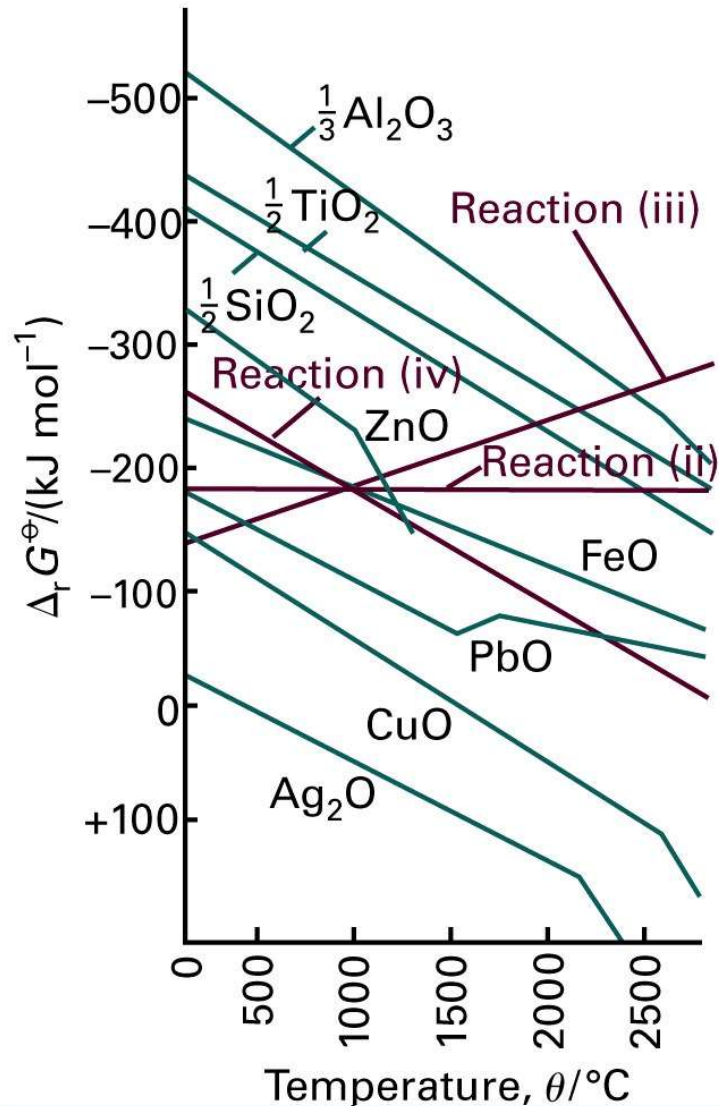
熔融塩の利点:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1							1 H											2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Du	105 Jo	106 Rf	107 Bh	108 Ha	109 Mt									

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

ほぼすべての元素を電気化学的に析出可能

酸化物の生成自由ギブスエネルギー



電解電位で選択回収が可能

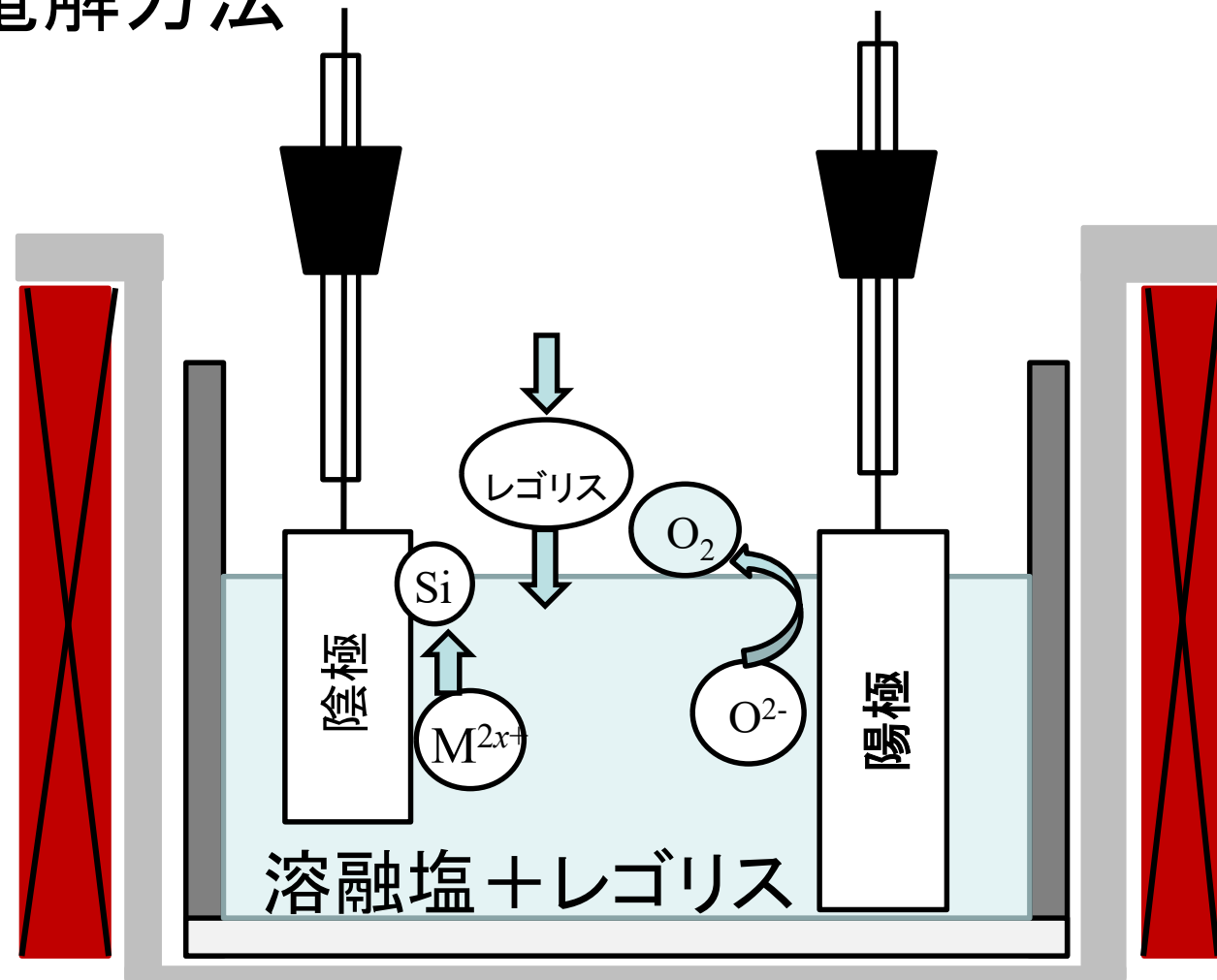
Oxide	-E (V) vs. oxygen evolution
SiO_2	<u>1.757</u>
Al_2O_3	2.173
FeO	0.987
CaO	2.592
Na_2O	1.117
MgO	2.379
BaO	2.202

SiO_2 を 1.757 V で電解することでSiが得られる。

模擬レゴリスシミュラントからの分離・回収

レゴリスからはじめる資源開発 (シリコン、鉄、酸素など)

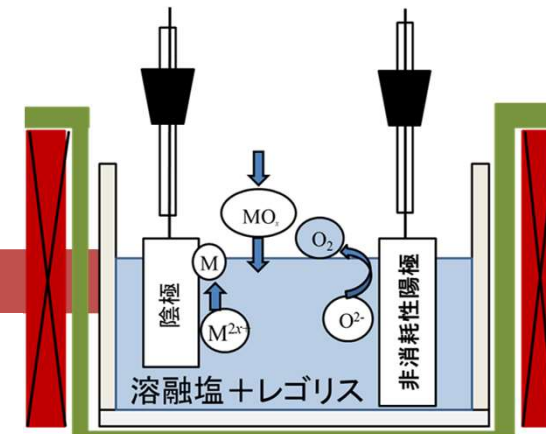
方法：熔融塩電解方法



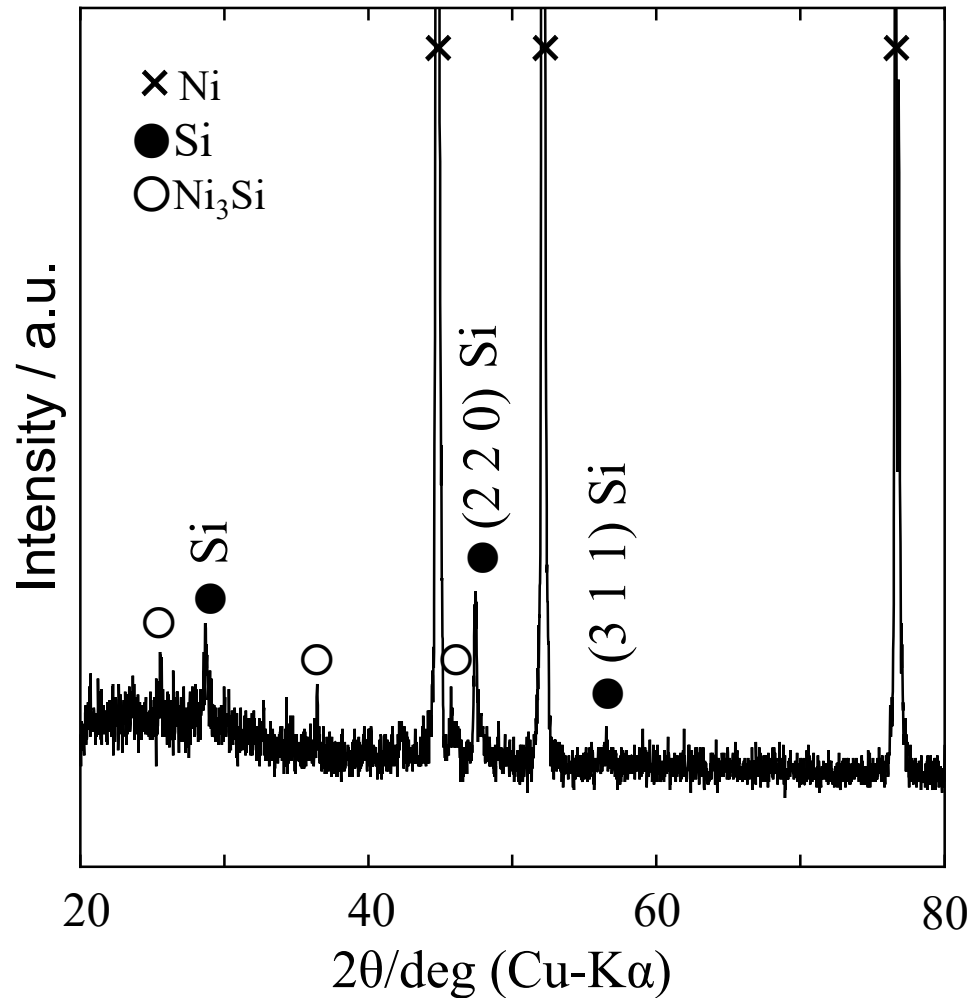
電気炉付きグローブボックス



Ar雰囲気の中のボックス
内での電解操作

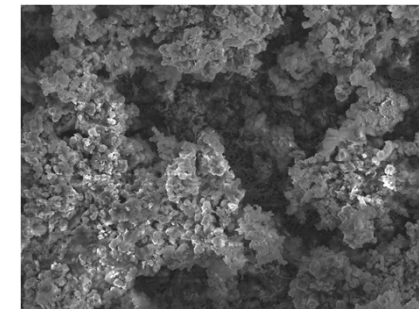


模擬月レゴリスからのシリコン回収



Temperature 600 °C
Working electrode Ni
Molten salt+lunar regolith simulant

SEM image



10 μ m

模擬月レゴリスからのシリコンの回収

模擬月レゴリスからの鉄回収

Temperature 600 °C
Molten salt+lunar regolith simulant

陰極:モリブデン

鉄とモリブデンの合金: Fe_7Mo_3

陰極: Ni

Si回収に成功

その場熱源について

月表面のトリウム (Th)分布

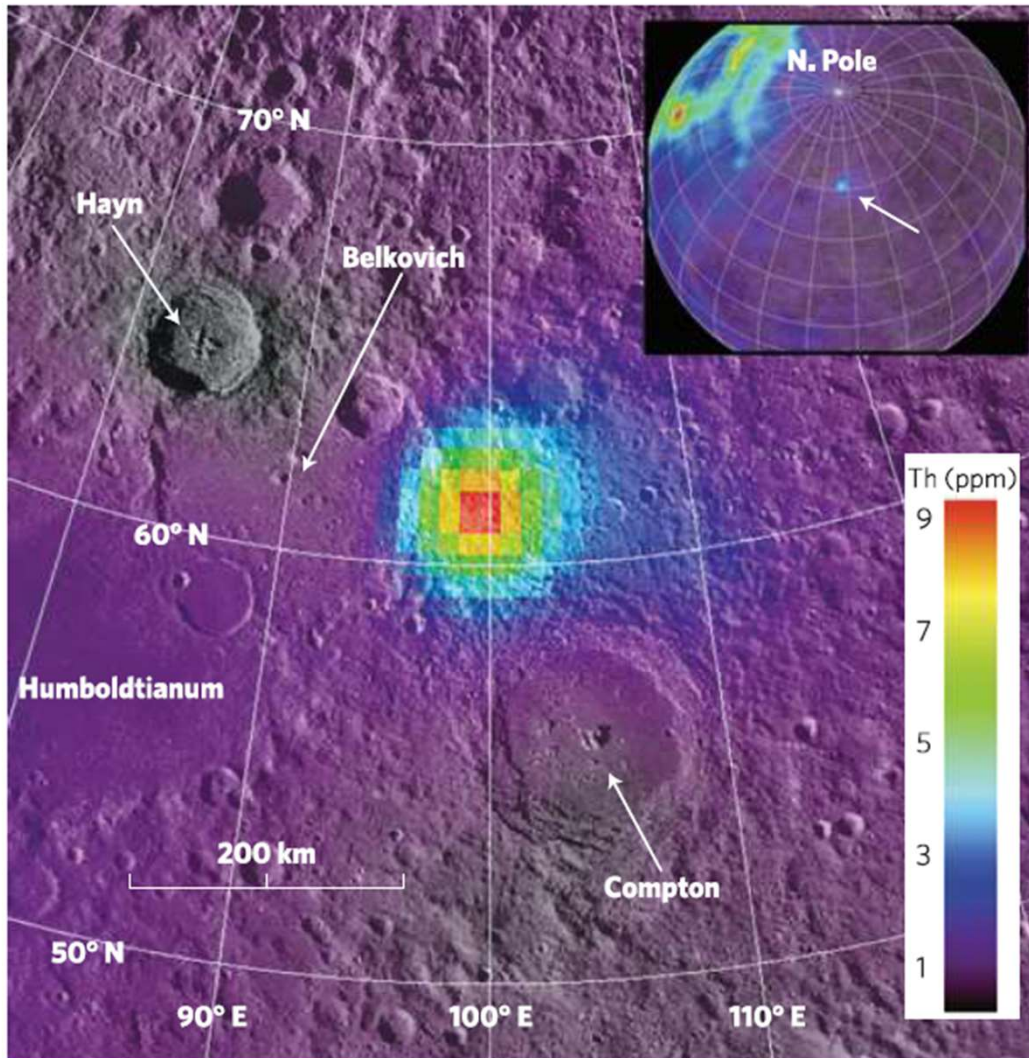


Figure 1 | Compton-Belkovich thorium anomaly. The location of the CBTA is northeast of Humboldtianum basin and just beyond the Moon's eastern limb (LP-GRS 0.5°, ~15 km resolution Th data^{1,2} as deconvolved by Lawrence *et al.*³, overlain on WAC 400 m per pixel base). The highest measured Th intensity corresponds to a concentration at this resolution of ~10 ppm at the centre of the Th hotspot.

ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 24 JULY 2011 | DOI: 10.1038/NGEO1212

nature
geoscience

Non-mare silicic volcanism on the lunar farside at Compton-Belkovich

Bradley L. Jolliff^{1*}, Sandra A. Wiseman², Samuel J. Lawrence³, Thanh N. Tran³, Mark S. Robinson³, Hiroyuki Sato³, B. Ray Hawke⁴, Frank Scholten⁵, Jürgen Oberst⁵, Harald Hiesinger⁶, Carolyn H. van der Bogert⁶, Benjamin T. Greenhagen⁷, Timothy D. Glotch⁸ and David A. Paige⁹

火星以遠で原子力の活用 トリウムRTG

○木星以遠で原子力を活用したい

✖U、Pu系核燃料は避けたい

✖“ロケットの先端に核燃料”
のように見えてはダメ



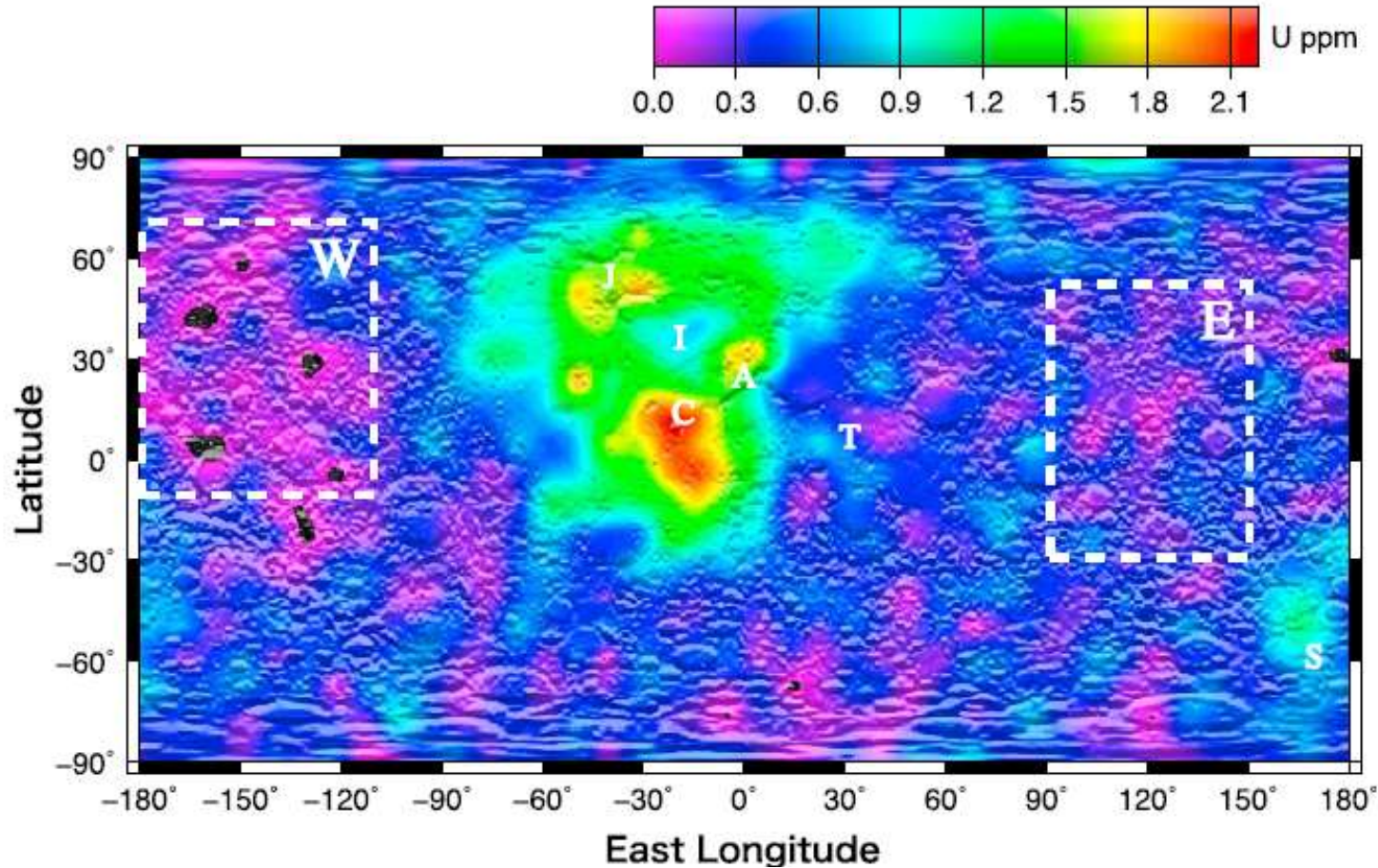
月重力圏外で
 ^{232}Th から ^{233}U へ転換

運用例:

- ・採取したサンプルは地球へ帰還
- ・電源システムと探査機本体は共に
深宇宙探査継続または太陽近傍へ

KAGUYAの計測した月表面のU分布

■ 原子力エネルギー利用の可能性？



※人形峠のウラン鉱床は500～600ppm

月面や火星の基地構築には…

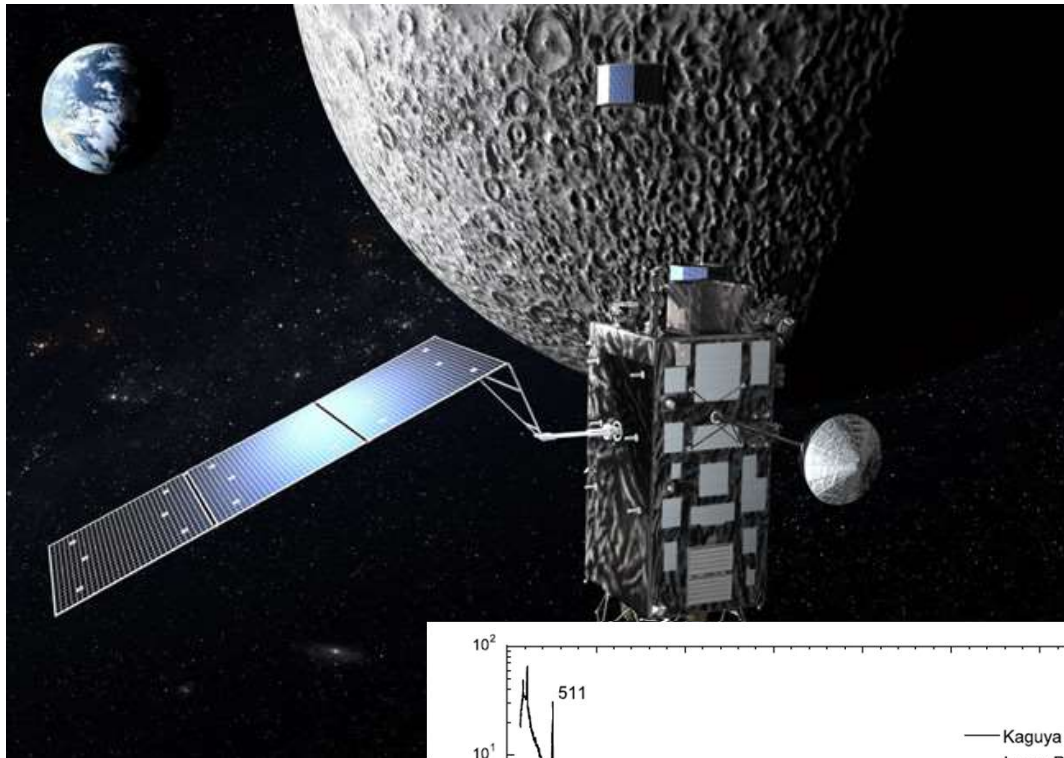
ロボットや人間による拠点構築では、長期間安定に多量の電気 ($> 100\text{kW}$) を供給できる電源が不可欠。



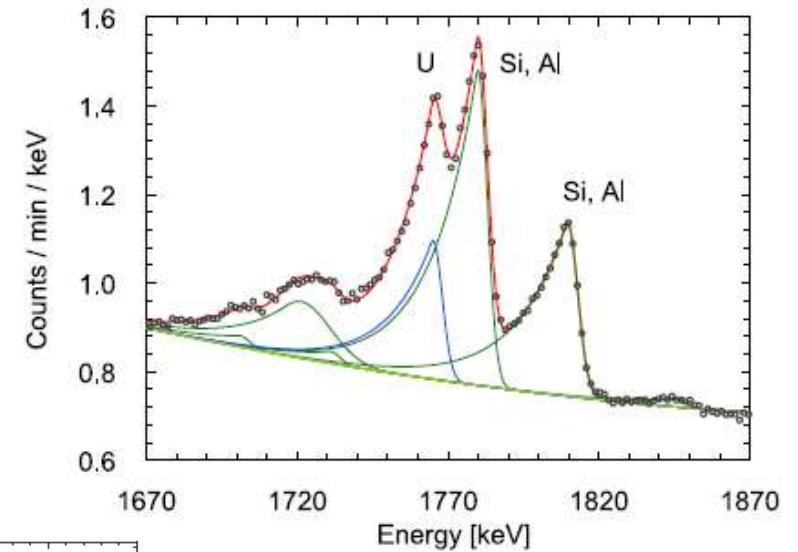
核分裂原子炉：高出力密度で長期間稼働



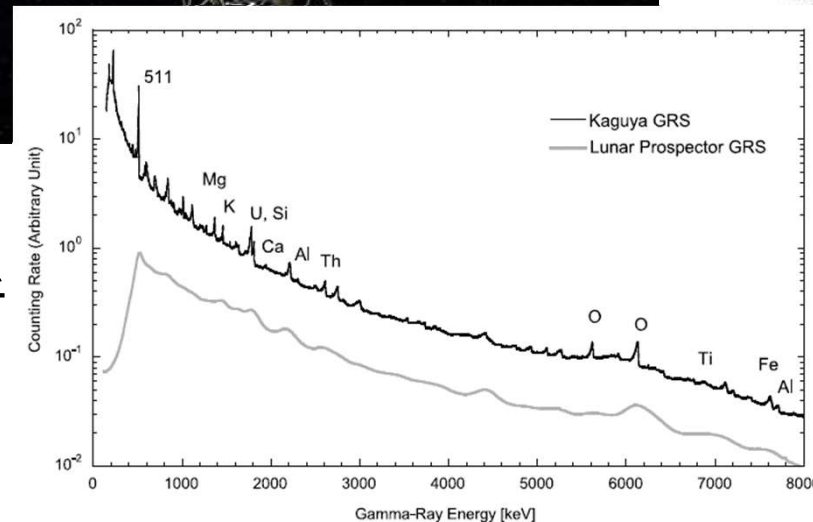
KAGUYAによる月探査 (2009)



月面にウランが存在！

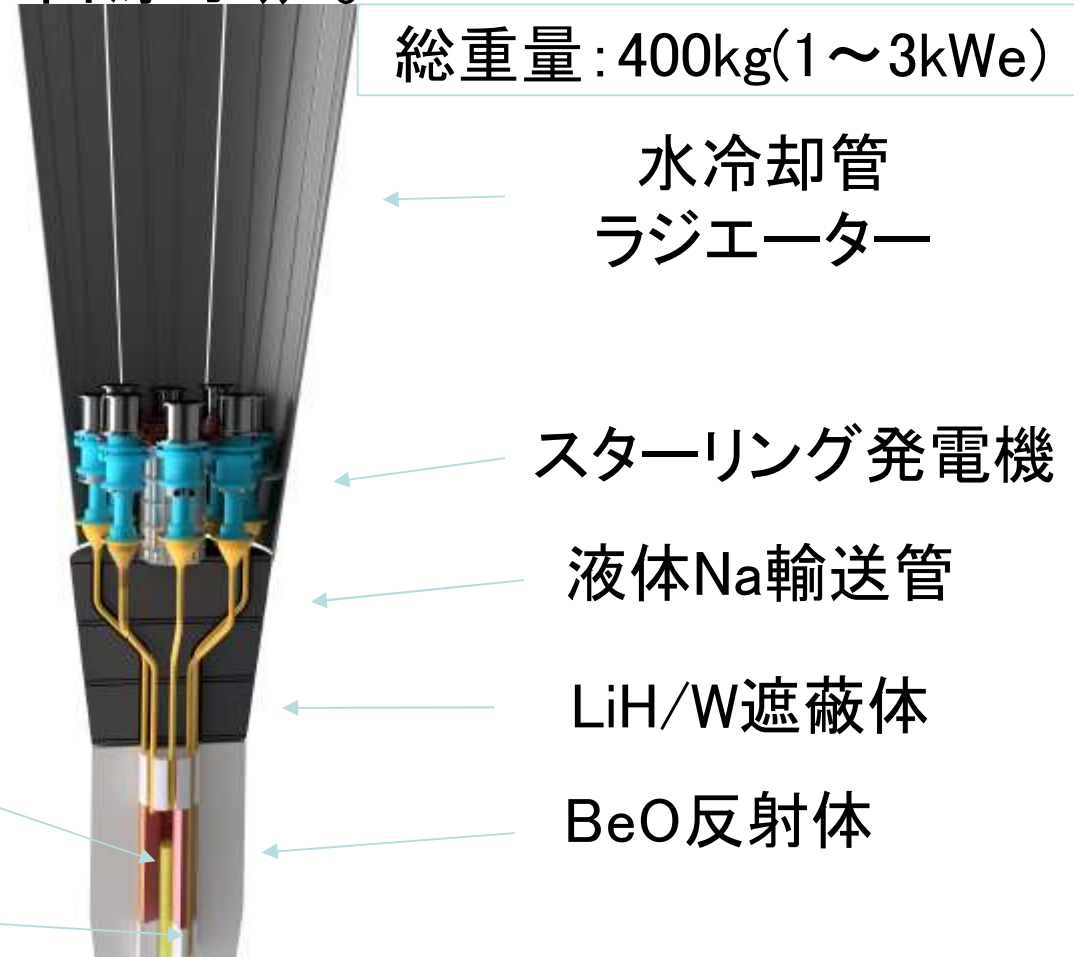
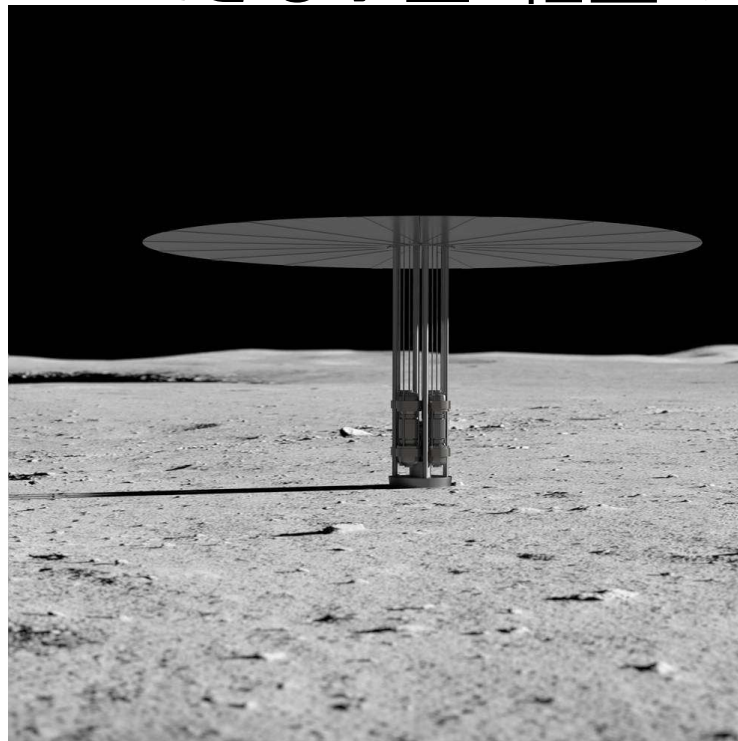


ガンマ線
スペクトル分析



NASA&DOEのKilopowerプロジェクト

- Kilopowerは最低10年間に亘り1～10kWeの電気を供給できる小型・軽量の宇宙原子炉。



総重量：400kg(1～3kWe)

水冷却管
ラジエーター

スターリング発電機

液体Na輸送管

LiH/W遮蔽体

BeO反射体

UMo金属燃料

B₄C制御棒

- 月は、貧アルカリ環境
- 火星は、海水由来の塩あり






ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12871-6>

OPEN

Semiarid climate and hyposaline lake on early Mars inferred from reconstructed water chemistry at Gale

Keisuke Fukushi ^{1*}, Yasuhito Sekine ^{1,2}, Hiroshi Sakuma ³, Koki Morida⁴ & Robin Wordsworth ⁵

まとめ

その場資源エネルギー開発：
ニュートラルな立場から検討する必要（是々非々の議論）

シリコン⇒太陽電池、
鉄、アルミニウム⇒構造材料等、セメント等
酸素⇒生命維持、推進剤

すべての元素について、
究極の資源・エネルギーエコシステムの開発が必要