

月面での水素資源利用に向けた情報提供要請（RFI）  
の実施について

2020/3/3

国際宇宙探査センター  
古賀 勝

# 概要

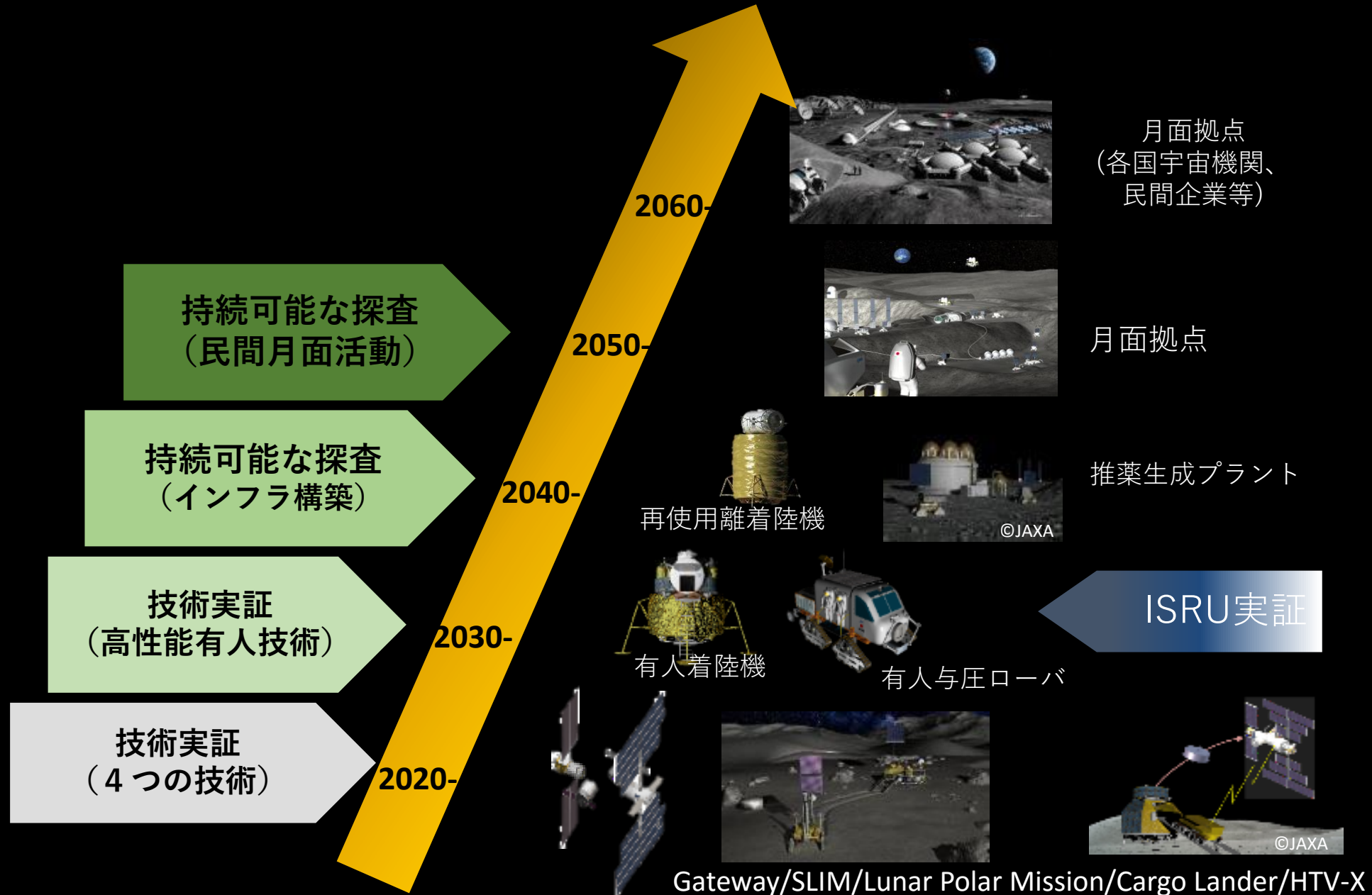
- 国際宇宙探査センターで策定する宇宙探査シナリオでは、2020年代の技術実証のフェーズを経て、2030年代には本格的な月の探査・利用を実現するためのインフラの構築を構想している。
- 月面の水資源を利用してLOX/LH2の推薬を生成し、離着陸機等の輸送手段に補給するアーキテクチャは、輸送効率を向上させる効果が期待され、そのための推薬生成システムの検討している。
- 本RFIは、この月面推薬システム実現に向けて必要な要素技術、研究課題について国内の大学・研究所や民間企業の知見・技術について情報を集め、研究開発計画の立案に資することを目的とする。



# JAXAの国際宇宙探査シナリオ



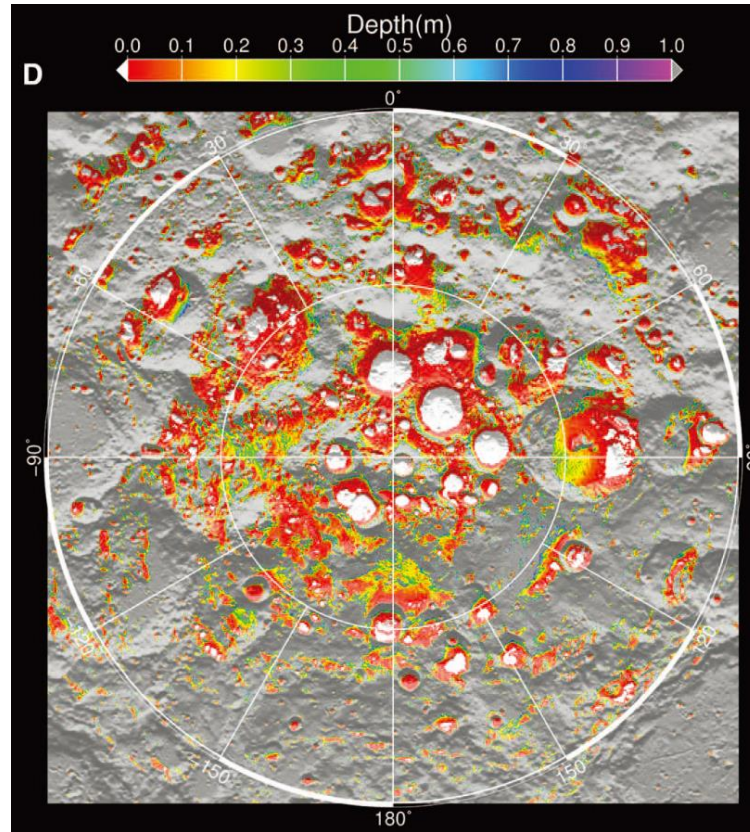
# JAXA 月探査 長期ロードマップ



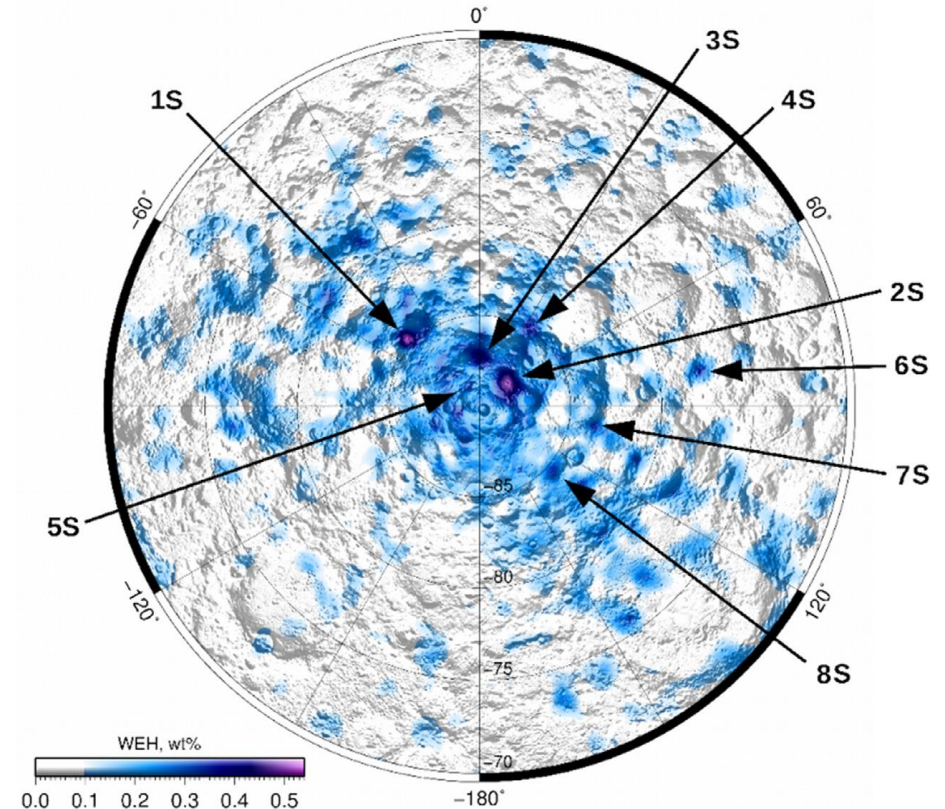


# 水氷の存在可能性(1/2)

- 月極域には長期間にわたって彗星・小惑星・太陽風によりもたらされた水氷（あるいは水素）が保存されていると考えられている。



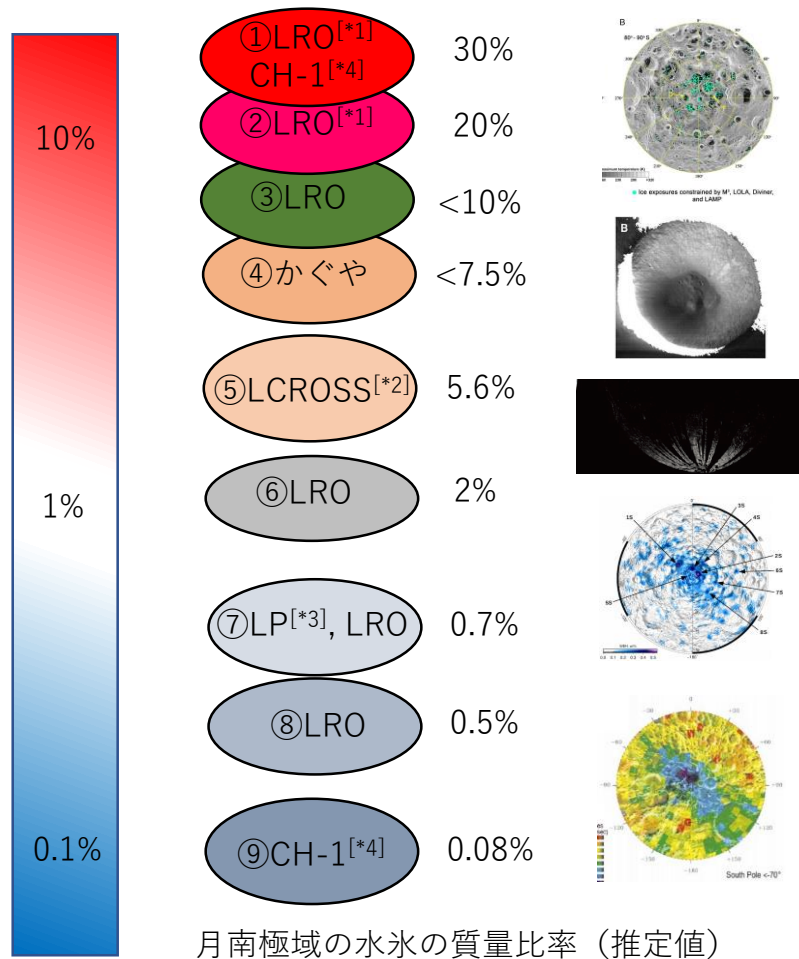
観測データをもとにシミュレーションにより推定された水の分布。白は地表に存在、灰色は温度が高いため地下1mの深さまで水が存在しないことを示す。図の中心は南極点、外側の円は緯度80度。Science誌(2010年)より引用。



LROの中性子観測データをもとに推定された水の分布。水素の存在量を水の量に換算して示している。図の中心は南極点、外側の円は緯度70度。A.B. Sanin et al., Hydrogen distribution in the lunar polar regions, Icarus 283 (2017)より引用。

# 水氷の存在可能性(2/2)

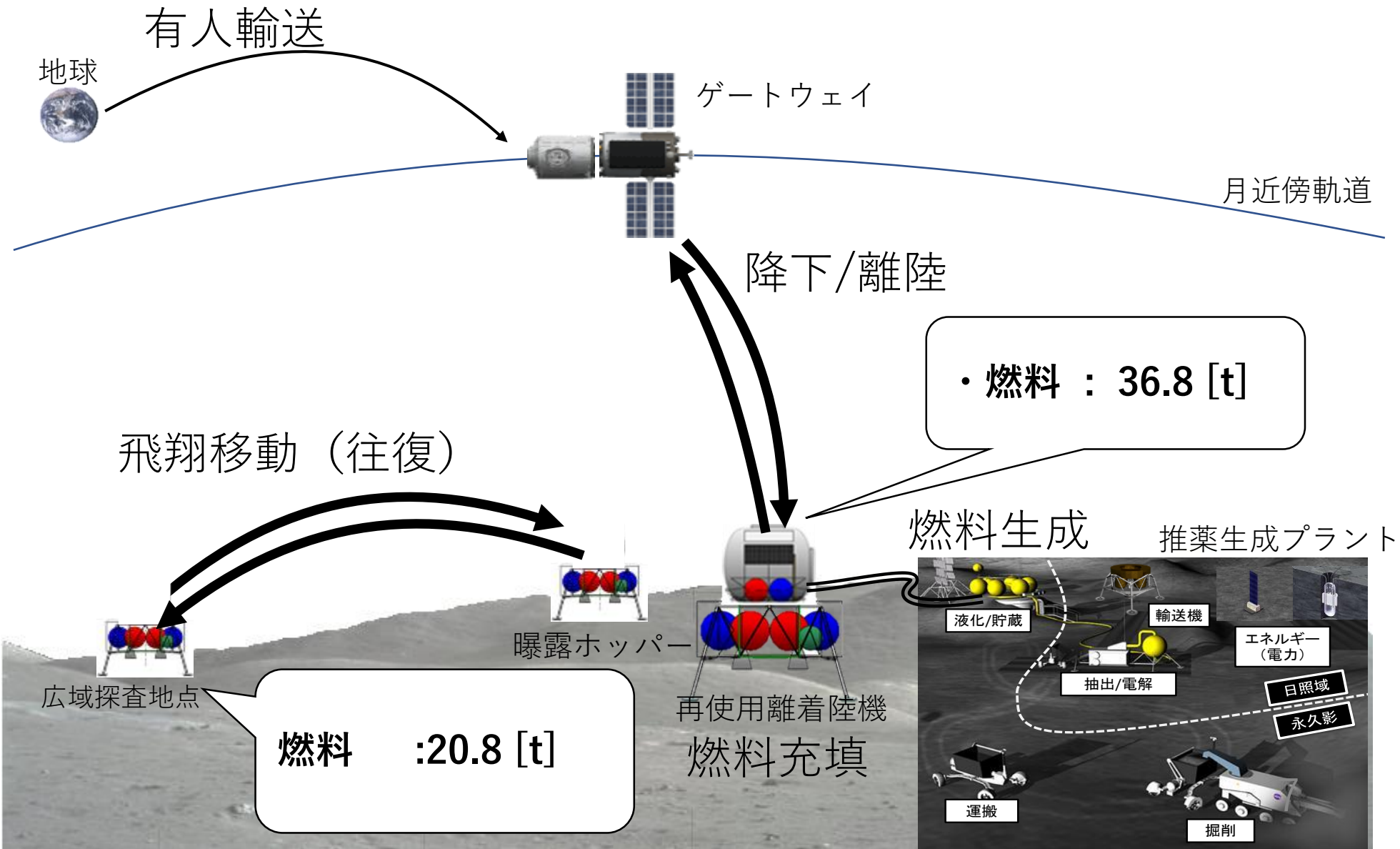
- リモートセンシング観測データに基づく多くの研究が報告されている。



- 一部の領域に氷が曝露しており最大30wt%が存在する (Shuai Li et al., 2018)
- シャクルトンクレータ内は太陽風による月表面の変化が小さいか、又は水氷が存在 (Zuber et al., 2012)
- 永久影領域に水氷が存在 (Thomson et al., 2012)
- シャクルトンクレータ (南極の永久影) 内の地表に大量の氷は存在しない (Haruyama et al., 2009)
- 飛翔体の衝突による放出物を観測 (Colaprete et al., 2010)
- 表層に水の霜が存在 (Gladstone et al., 2012)
- 極域の永久影領域に水氷または水素が存在 (Miller et al., 2012)
- 水に換算すると最大0.5%程度が存在する (A.B. Sanin et al., 2017)
- 高緯度地域にOH基と水が存在 (Pieters et al., 2009)

[\*1] Lunar Reconnaissance Orbiter (米国, 2009年打上)  
 [\*2] Lunar CRater Observation and Sensing Satellite (米国, 2009年打上)  
 [\*3] Lunar Prospector (米国, 1998年打上)  
 [\*4] Chandrayaan-1 (インド, 2008年打上)

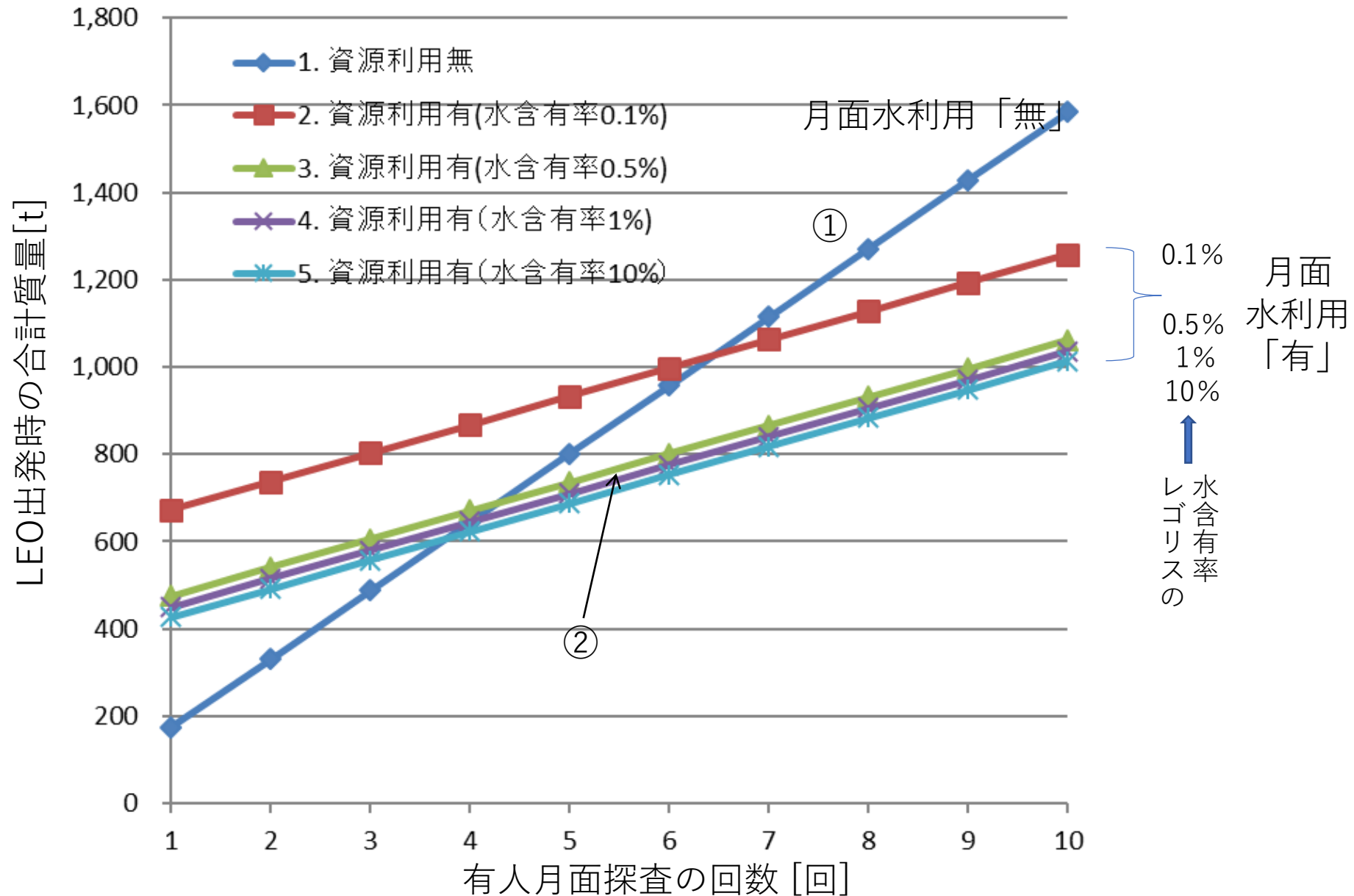
# 月面の水を推薬として利用するシナリオ



- 推薬供給頻度 : 1回/年
- 供給推薬量 : 57.6t/回



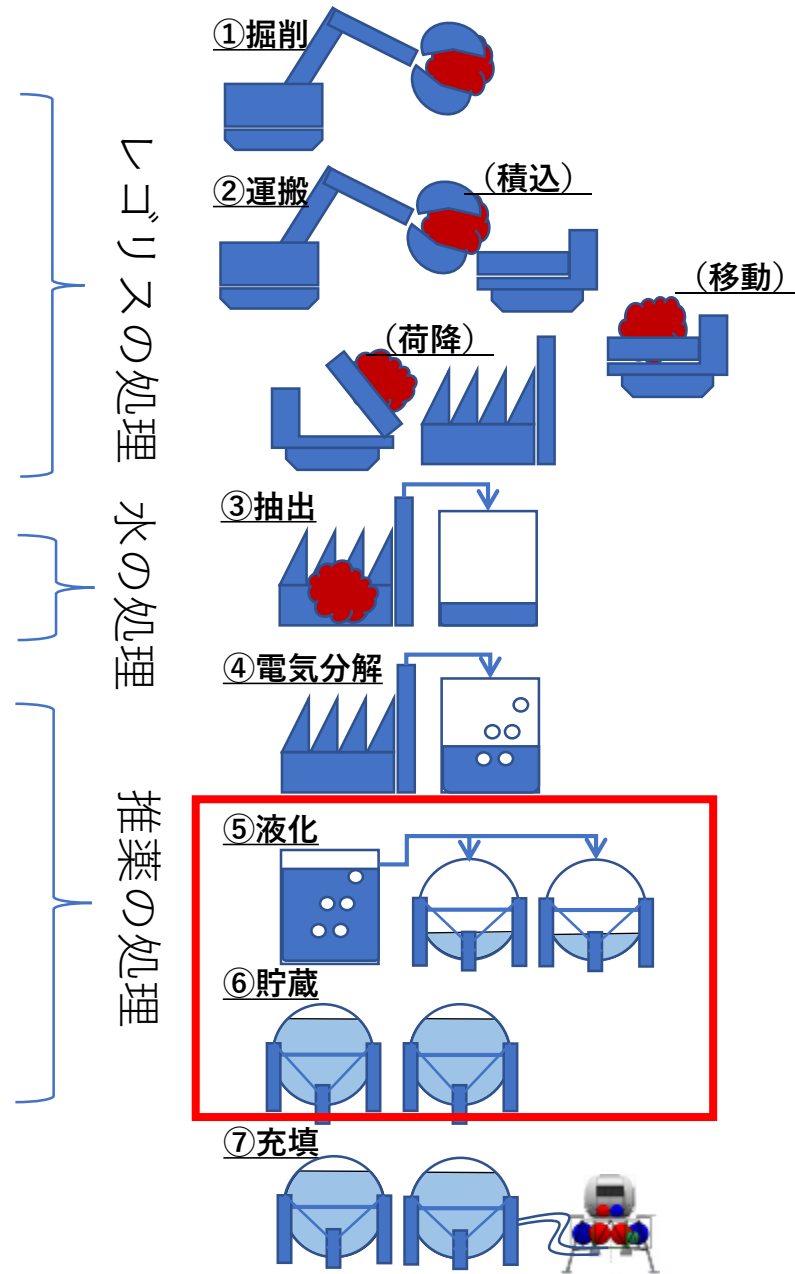
# 月面の水を推薬として利用するベネフィット



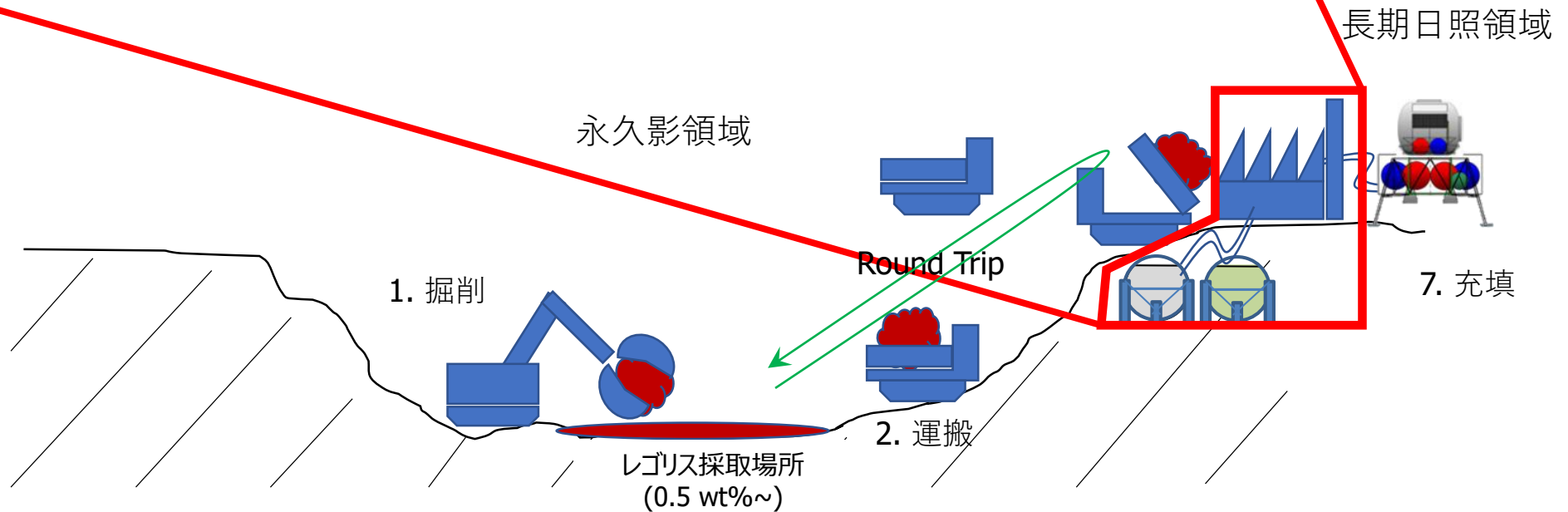
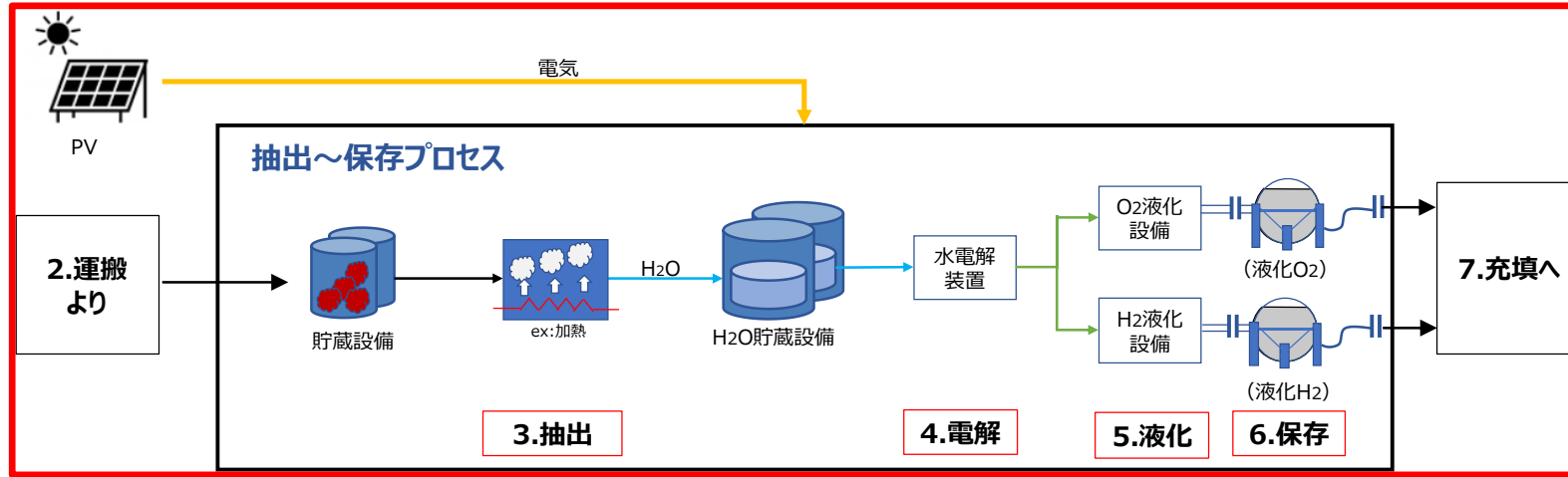


# 月面水利用プロセス

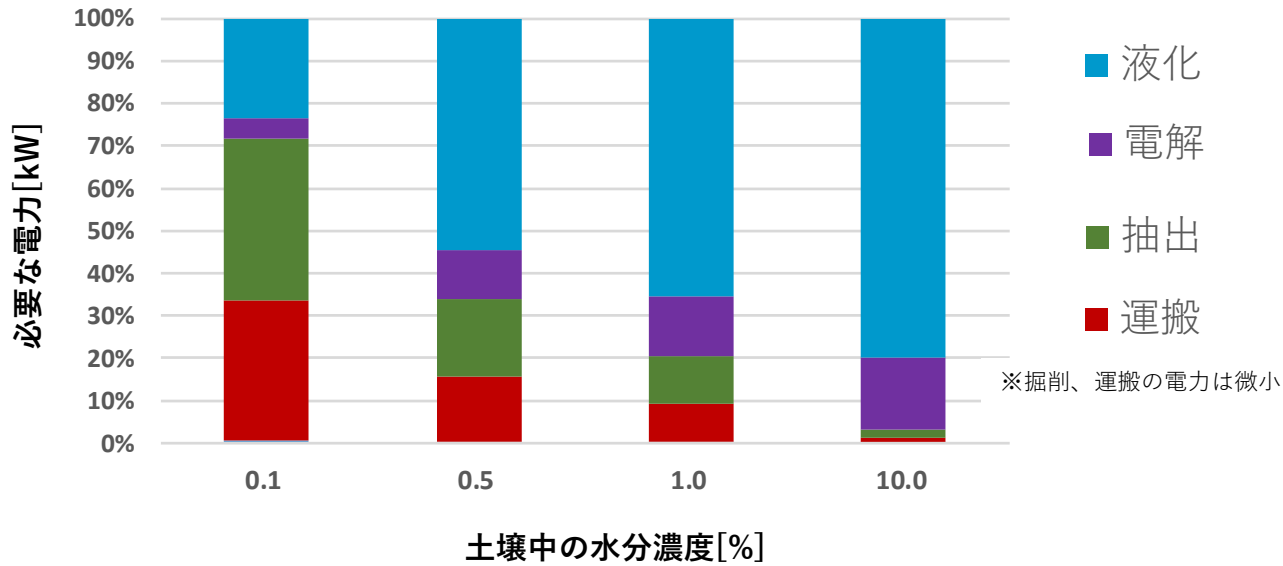
- ◆ ステップ1 : 掘削 (Regolith Collection)
- ◆ ステップ2 : 運搬 (Mobility)
- ◆ ステップ3 : 抽出 (Water/Gas Extraction)
- ◆ ステップ4 : 電解 (Electrolization)
- ◆ ステップ5 : 液化 (Cooling)
- ◆ ステップ6 : 保存 (Storage)
- ◆ ステップ7 : 充填 (Supply)



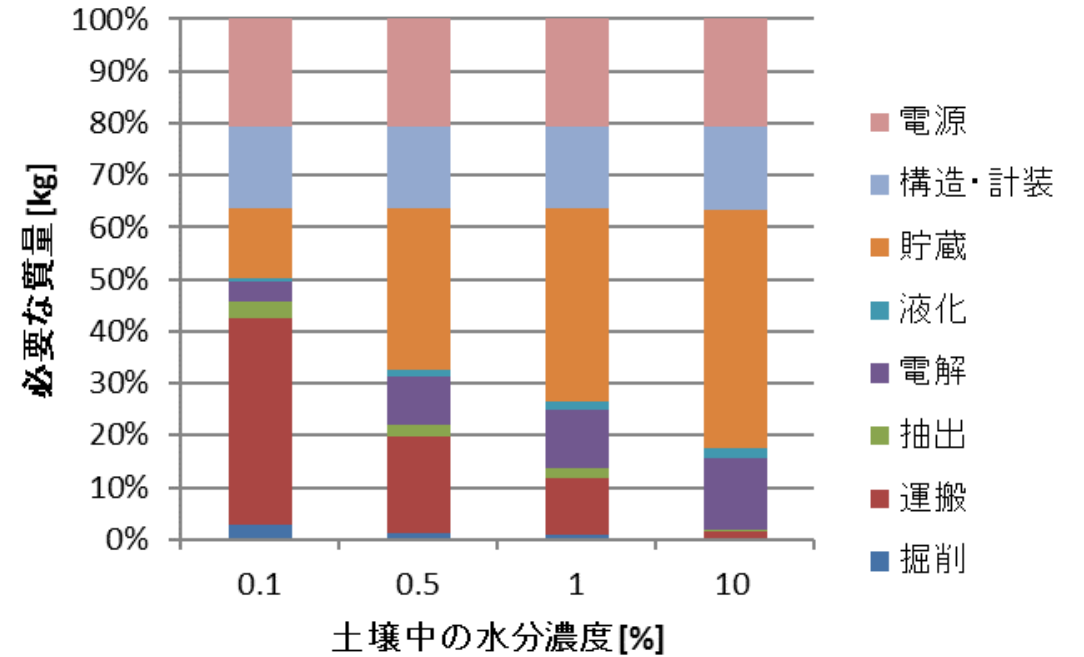
# 月面での推薬生成のイメージ



# 推薬生成システムの各ステップで必要となる電力・質量



必要となる**電力は液化**プロセスが支配的となっている。



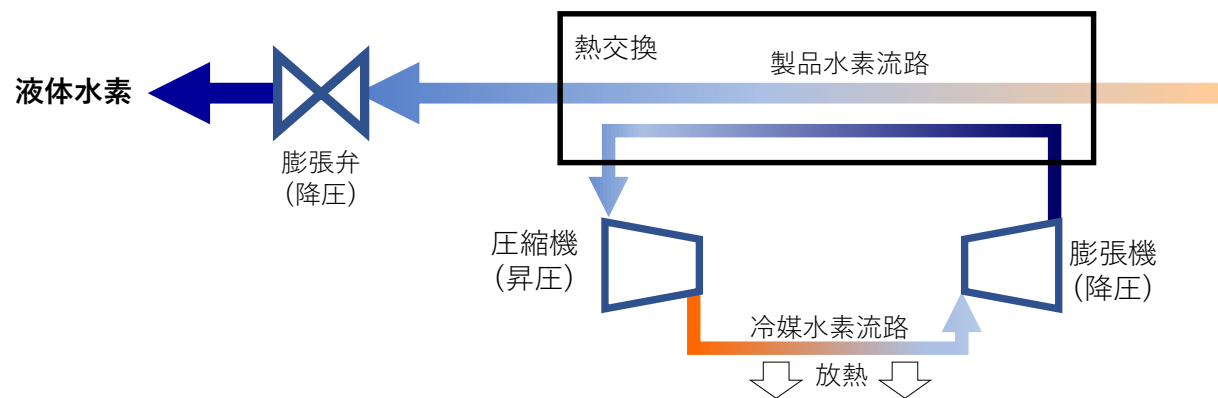
必要となる**質量は保存**プロセスが支配的となっている。



# 液化システムのサイジングの考え方

## ■ 比電力の設定

- 装置能力（1時間あたりに処理できるH2Oの質量 [kg water/h]）あたりの消費電力として定められる指標、“比電力” [kW/(kg water/h)]を用いて液化システムの必要電力を見積もる。
- 水素自体を、水素の液化に用いる冷媒として用いるブレイトンサイクルを想定する。
- JAXAの検討では水素冷媒ブレイトンサイクルで水素を液化するために必要なエネルギーは、10.72kW・h/kgと見積もった。
- 効率30%を考慮して、本方式の比電力は**34.9** kW/(kg water/h)



冷媒	液化のための冷却	予冷のための冷却	Total	水素流量	平均
H2	0.04kW	0.78kW	0.82kW	0.08kg/h	10.72 kW・h/(kg water)

## ■ 液化システムのサイジング

- 本システムで処理する水の量は、75.0ton(別紙1より)であるので、システムの電力は以下の様に算出した。

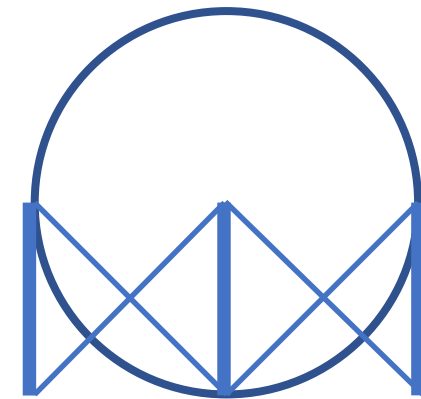
$$(34.9_{\text{比電力}} \times 75_{\text{処理水量}} \times 10^3) / (365_{\text{days}} \times 24_{\text{hours}}) \doteq 300\text{kW}_{\text{必要電力}}$$

- なお、システムの質量については、地上で利用されている液化装置の比質量を引用し**53.8**[kg water/h]とし、処理する水の量から、約**460kg**と算出している。

# 保存システムのサイジングの考え方

- 保存する推薬総質量は57.6ton。（推薬混合比から、O2：48ton、H2：9.6tonとした。）
- タンク材料はチタンとする。
- 地上の極低温液体貯蔵では真空二重層で断熱するタンクが用いられるが、月面は真空であるため単層のタンクとする。なお、タンク表面に現在JAXAで開発中の高性能MLIで覆うことで断熱する。
- これら条件からタンクの質量見積を下表に示す。

推薬量				根拠・備考
推薬総質量	57600 kg			離着陸機(36.8t)+曝ホッパ(20.8t)より
エンジンの推薬質量混合比	5	1		LE-7より
質量	酸化剤	48000 kg		混合比より
	燃料	9600 kg		混合比より
燃料・酸化剤の密度	酸化剤	1140.00 kg/m <sup>3</sup>		
	燃料	71.40 kg/m <sup>3</sup>		
燃料・酸化剤の体積	酸化剤	42 m <sup>3</sup>		
	燃料	134 m <sup>3</sup>		
<b>タンクサイジング</b>				
タンク半径	酸化剤	2.16		球タンク体積 $V=4\pi r^3/3$ より
	燃料	3.18		
タンク表面積	酸化剤	58.53 m <sup>2</sup>		球タンク表面積 $A=4\pi r^2$ より
	燃料	126.92 m <sup>2</sup>		
チタン密度		4506.00 kg/m <sup>3</sup>		SP700(AMS4899)
タンク肉厚		0.007 m		
タンク質量	酸化剤	1846 kg		表面積*肉厚*チタン密度より
	燃料	4003 kg		表面積*肉厚*チタン密度より
<b>断熱材サイジング</b>				
高性能MLI諸元		2.40 kg/m <sup>2</sup>		
燃料・酸化剤のMLI質量	酸化剤	140 kg		面密度*表面積より
	燃料	305 kg		面密度*表面積より
<b>タンク質量合計</b>				
	酸化剤	1987 kg		タンク質量+断熱材より
	燃料	4308 kg		タンク質量+断熱材より
	合計	<b>6.3 ton</b>		



※球状タンクを想定  
 ※支持柱の質量は未検討

- 以上より、タンクに必要な質量は**6.3ton**と算出した。

# 月面での水資源利用に向けた重点募集テーマ

プロセス	中テーマ	小テーマ	関連キーワード
液化	低エネルギーでの液化	予冷エネルギーの低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>●予冷効率の高い冷媒適用技術</li> <li>●永久影を利用した予冷技術</li> </ul>
		液化エネルギーの低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ブレイトンサイクルを用いた方式とは異なる冷凍方式を用いた液化技術(異なる熱力学サイクルや磁気を用いた冷凍等)</li> </ul>
	電力供給の効率化	軽量な電力供給技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>●月面資源を用いた発電技術</li> <li>●エネルギー(電力)密度(W/kg)の高い発電/蓄電技術</li> </ul>
保存	貯蔵システムの軽量化	タンク(容器)の軽量化技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>●非金属材料等の軽量材料(樹脂、膜及び複合材等)や高性能断熱材を用いた極低温液体の貯蔵技術</li> </ul>
		ボイルオフ対策に伴う物量増加対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ボイルオフガス抑制技術</li> <li>●防熱技術</li> <li>●永久影を利用したボイルオフガスの再液化・冷却技術</li> </ul>
	材料適合性	酸素下での耐性	<ul style="list-style-type: none"> <li>●酸素適合性の高い材料</li> </ul>
		水素透過	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ガスバリア性の高い材料</li> </ul>
		水素脆化	<ul style="list-style-type: none"> <li>●軽量耐水素脆化材料</li> <li>●液化水素下での材料寿命評価</li> <li>●液化水素下での保全技術(遠隔での検知・診断, 運用管理等)</li> </ul>



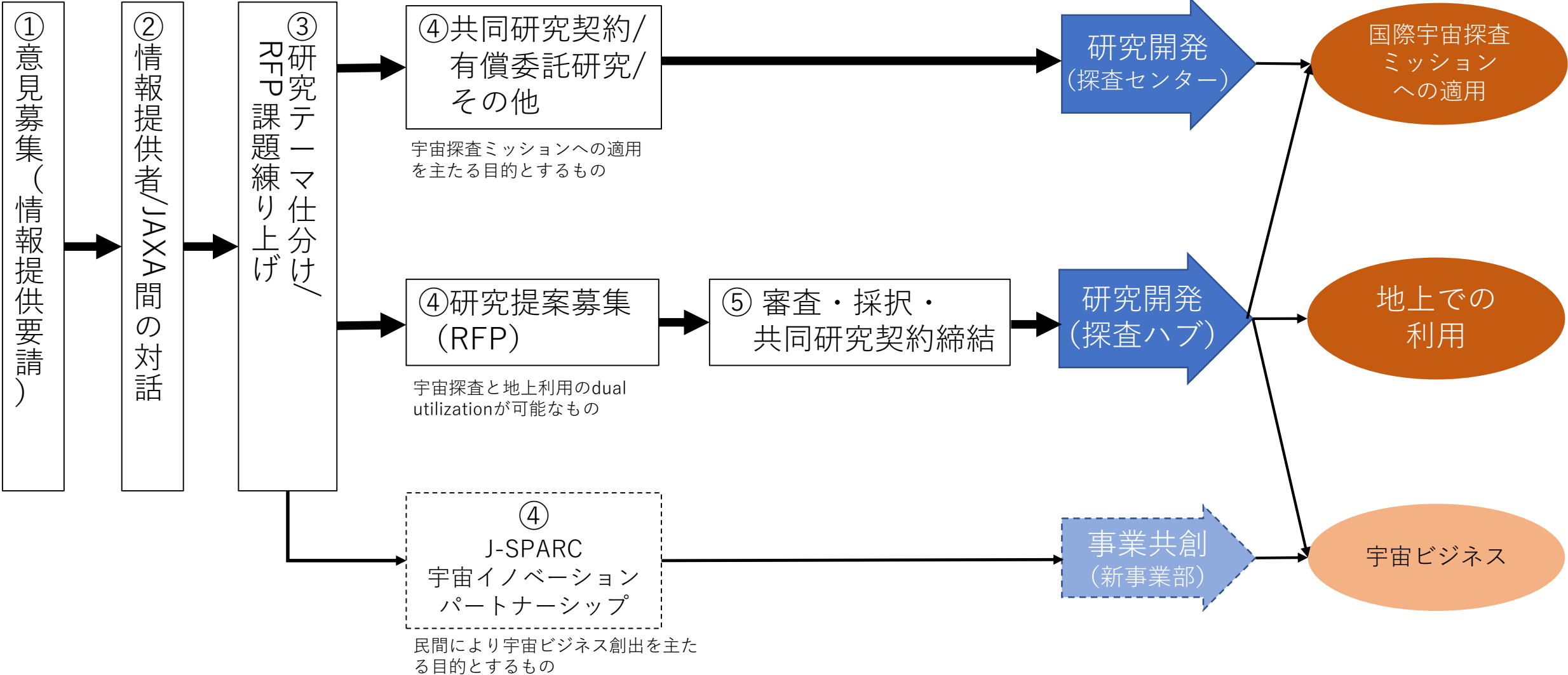
### 3. 提案要請事項

- ① 探査シナリオに基づきJAXAが提示する月面水素利用に向けた技術課題について、その解決に資する要素技術の提案。（当該技術を活用した事業化の意思がある場合は、その構想も提示。）
- ② 上記JAXAが提示する技術課題以外で、月面の水素利用で想定される課題の提案。
- ③ その他、JAXAが構想するシステム基本構成やプロセスに捉われない水素資源利用等、本構想全般に関する意見・情報。

# 研究開発の開始に向けた流れ

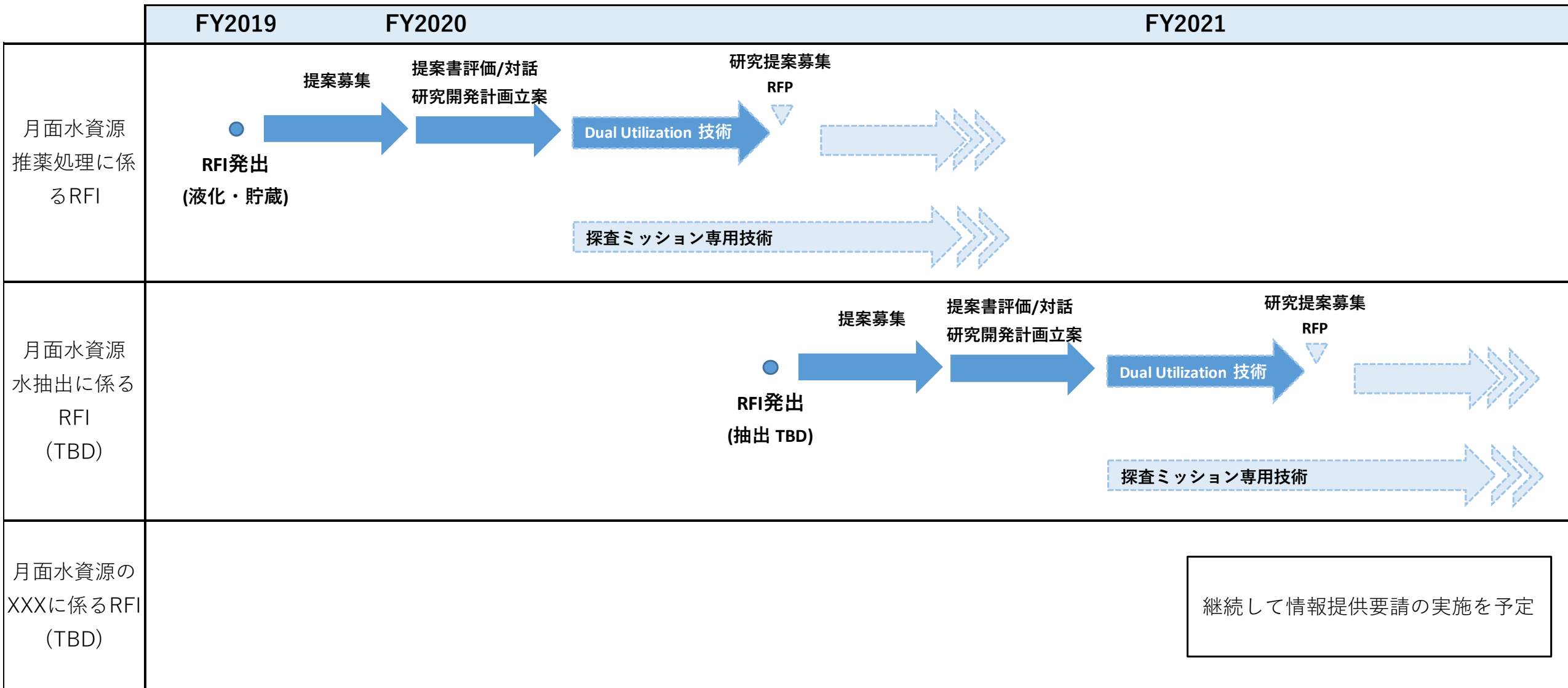
2020年/  
3月

2020年/  
6月頃



# 今後の月面水資源利用研究開発の実施計画

今回は「液化」「保存」を対象としたが、推薬製造の他のステップ（抽出、電解、…etc）についても今後継続して複数回RFIを実施し、水資源利用の全体的な研究開発計画を策定していく。





# RFIの提出について

- 提出締切 : 2020年3月27日(金)
- 書類提出先 : [SE-forum@jaxa.jp](mailto:SE-forum@jaxa.jp)
- 担当 : 国際宇宙探査センター (中島、古賀)  
宇宙探査イノベーションハブ (布施)
- 詳細 : <http://www.exploration.jaxa.jp/news/20200225.html>