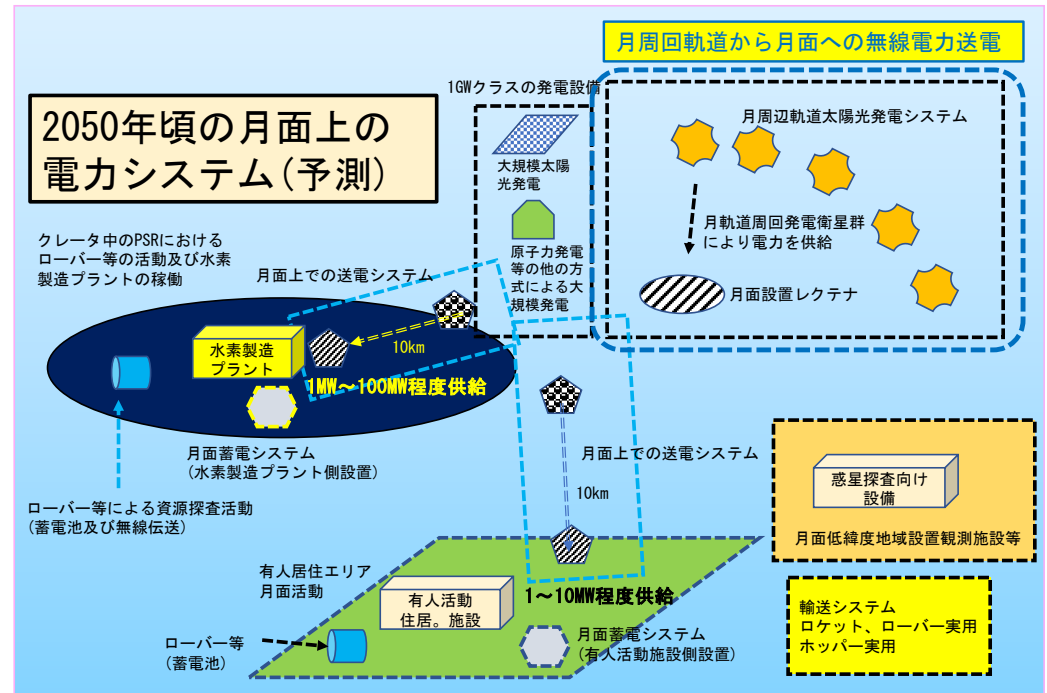


月面電力供給システムの検討

宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発（技術課題整理））
電力WG活動状況のご紹介

- 内田敦 (三菱総合研究所)
岡範全、山内健司、○伊地智幸一
(宇宙システム開発利用推進機構)
田中孝治 (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)
三谷友彦 (京都大学)、石村康生 (早稲田大学)
本城和彦、石川亮 (電気通信大学)
藤野義之 (東洋大学)、藤田和久 (光産業創成大学)
伊東健治 (金沢工大)
川上好弘、石川洋二 (大林組)
山口洋司 (シャープ)
小川誠仁 (IHIエアロスペース)
(代表者を表示)



第7回月測位研究会/7th Cis-lunar PNT Conference
2024年5月28日

月面におけるエネルギー関連技術開発（電力関係の技術課題整理）

・本業務は令和3年度より、三菱総合研究所殿が経済産業省より委託を受けた「宇宙開発利用推進研究開発（月面におけるエネルギー関連技術開発（技術課題整理）の中で、電力供給に係る部分については財団法人宇宙システム開発利用推進機構が宇宙科学研究所、大学、企業より構成するチームを作り、検討を実施したものであり、「月面での水素製造」など、月面活動に必要な電力需要に対しての電力供給システムの検討という位置付けである。

・令和3年度は、月面での発電、蓄電、送電（無線電力送電等）を含む電力供給システムに**必要な要素技術等を洗い出し**、各アーキテクチャにおいて想定しうる技術、建設・運用シナリオ、課題等を取りまとめて、月面探査における我が国の協力分野や技術開発の必要性を検討し、令和4年度は、上記に加え、よりシステムとして発電から送電までの**一貫した電力ネットワークとしての検討や技術・方式の検討**を行い、それぞれのメリット・デメリットを整理した。さらに令和5年度は建設のシナリオを想定し、実証項目、月面への必要輸送量、システムの具体配置、予算規模を含めた実証計画等の検討を実施した。本プレゼンテーションにおいては令和3年度及び4年度におけるシステム検討結果を中心に紹介する。なお本検討は令和6年度においても継続している。

令和3年度報告書は経産省HPに公開（2022年12月6日）

https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2021FY/000341.pdf

令和4年度報告書は経産省HPに公開（2023年5月18日）

https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2021FY/050027.pdf

令和5年度報告書については近日中に公開予定

月面電力供給システムの検討

内容

1. 前提条件の整理と検討の全体像
2. 月面電力供給全体システム
3. 月周辺軌道太陽光発電システム
4. 月面設置発電システム
5. 月面上での送電システム

1. 前提条件の整理と検討の全体

月面電力供給アーキテクチャの全体システム構成

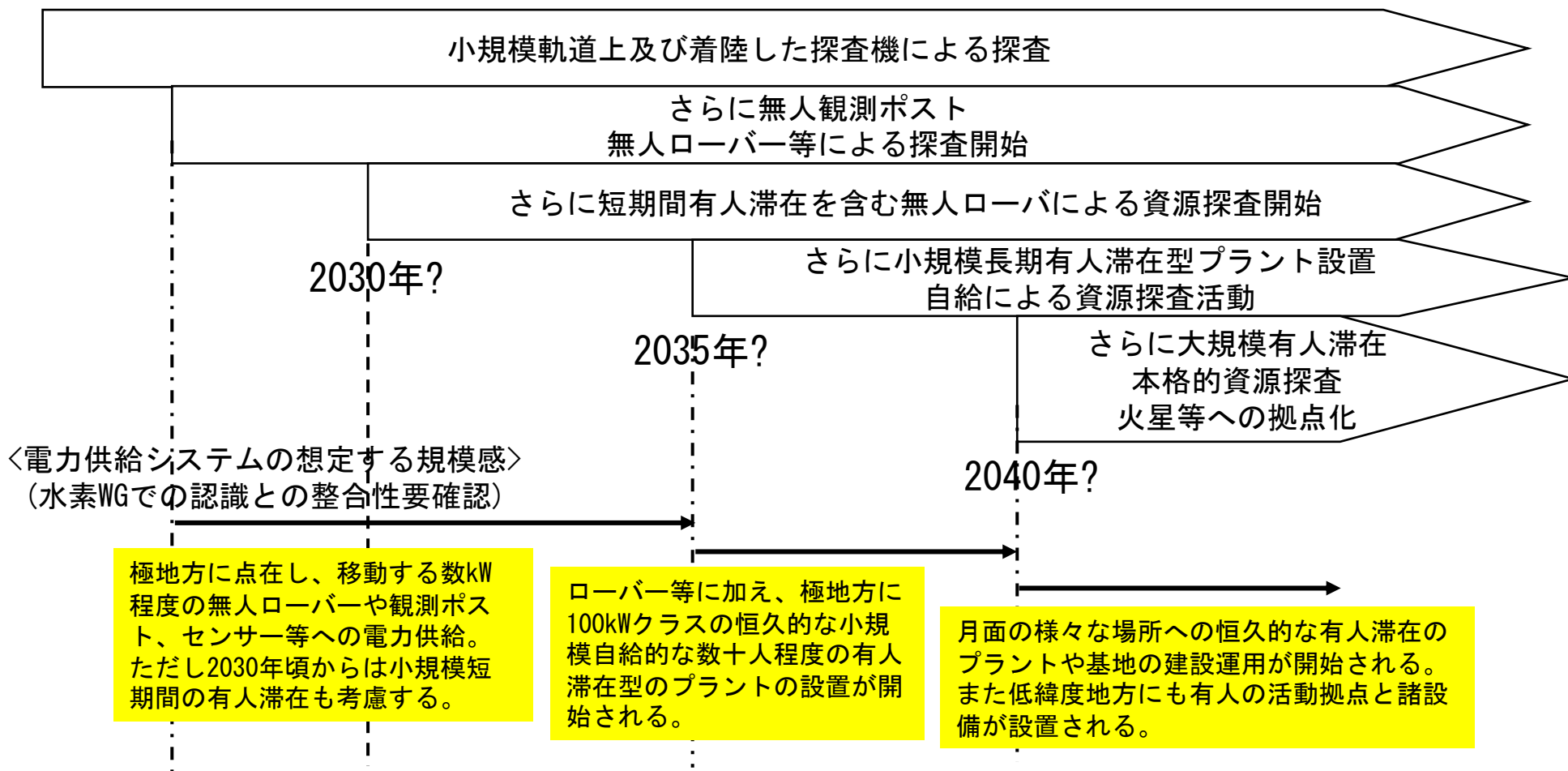
1. 月周辺軌道太陽光発電システム
2. 月面設置発電システム
3. 月面上での送電システム
4. 月面蓄電システム
5. 輸送システム

JAXA 国際宇宙探査シナリオ2019 宇宙探査
での「有人活動」の長期的な目標から想定する
電力システム構築のシナリオ

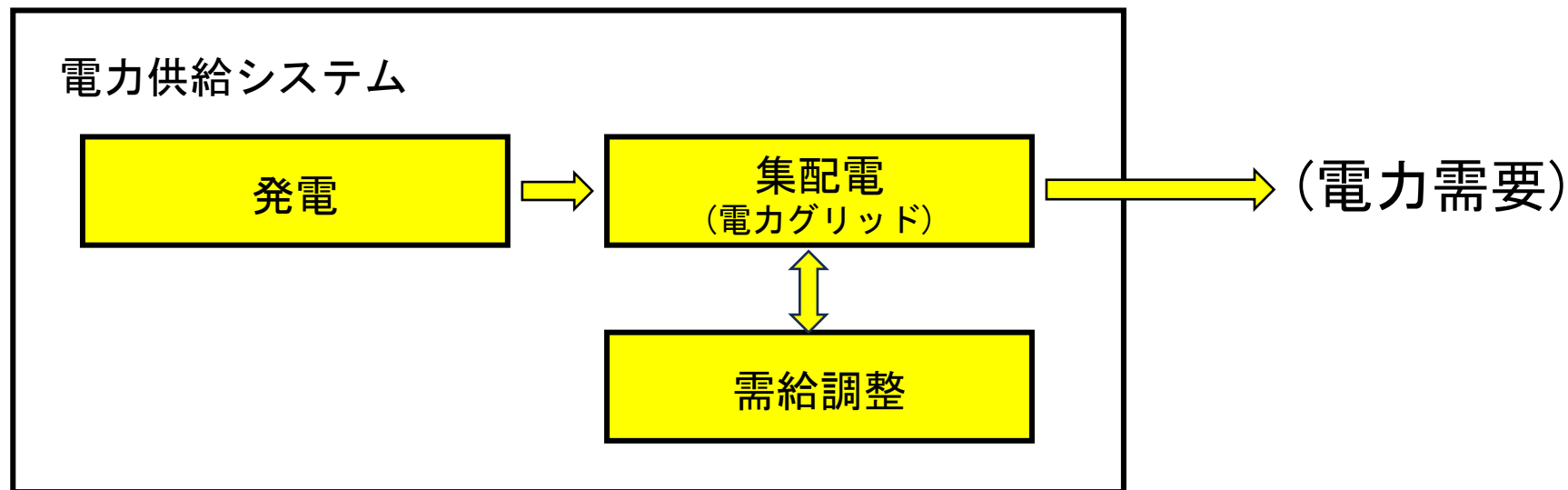


- 2030年頃からは無人の小型の探査ローバ及び短期滞在型の有人のローバの極地域で活動が本格化するの
で、それへの～数100W程度(暫定)の無線による電力供給を開始する。
- 2035年頃に小規模な恒久的な有人プラントが極地域に設置され、数100kW程度(暫定)の電力を恒久的に必
要とする。これはこの時期にレゴリスに1%程度の水含有量を想定した場合に必要な水素製造に必
要な電力である。
- 大規模な有人滞在を想定すると、電力供給方式は2FT(Two Fault Tolerant)の要求を満たす必要性から、
3つの異なる方法にて電力を供給される必要があることに留意する必要がある。
- 2040年頃からは、数10MW(暫定)を極地域で消費することに加えて、15日の越夜が必要な低緯度地域への
活動が展開されると想定されることから、その地域での必要な電力供給システムを検討する。その場合
有人拠点となることを想定する。

月面電力供給の対象の規模感とその電力供給システムの規模感並びにそのスケジュール感

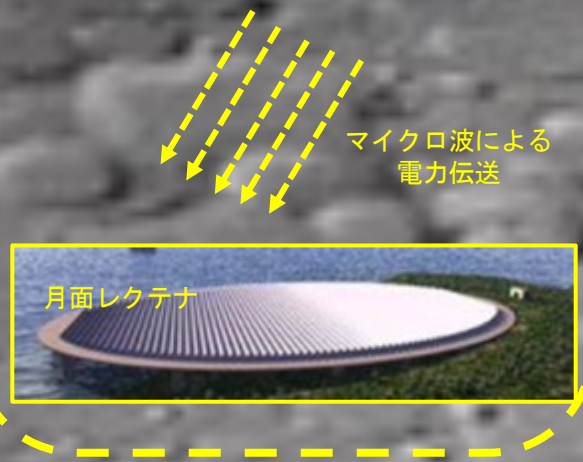
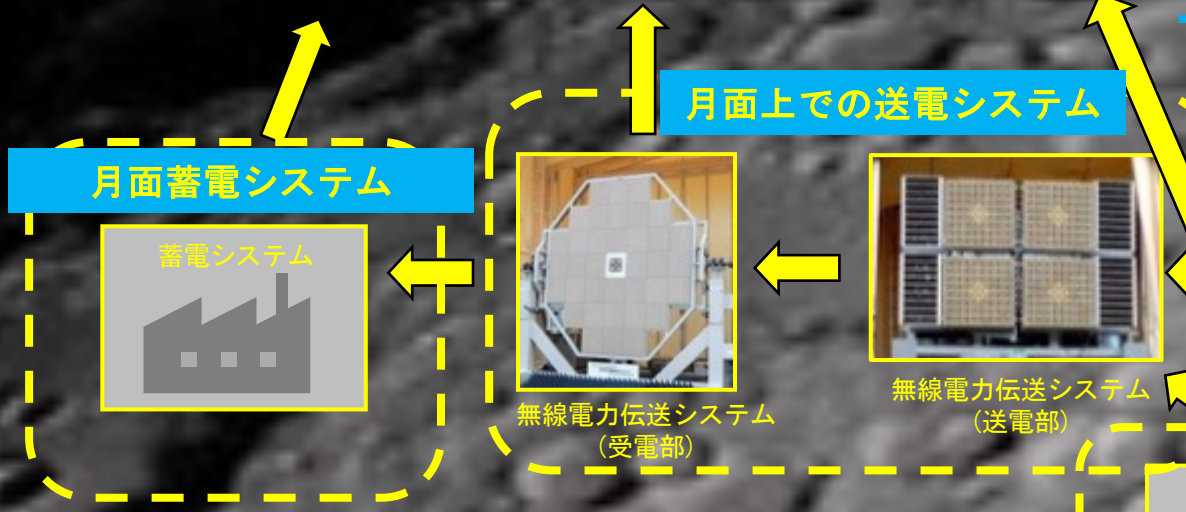
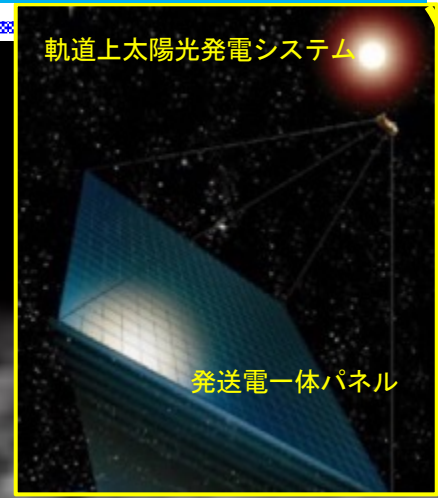


インフラとしての一般的な電力供給システムの構成

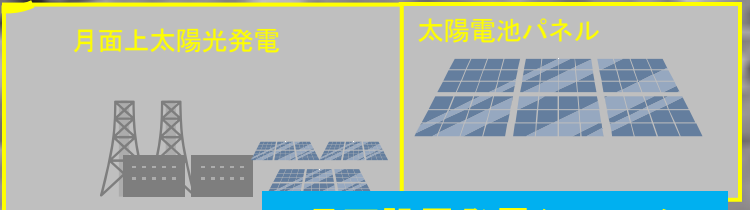


- 通常の発電システムは、急激な電力需要の変化に対応して発電量を制御することには不向きである。そのため急激な電力需要の変化に対応するために、地上と同様に即応的に余剰電力を吸収したり、不足の電力を供給する機能が電力グリッドに接続される必要がある
- 地上のインフラであれば、揚水発電、蓄電池等がその一例である

月面電力供給アーキテクチャ概念図



輸送システム



月面設置発電システム

水素製造側における設置場所の要求について

上記の考察のもと、水素製造側の要求に従い、南極地方の10km程度以上の大きさの永久影の場所(PSR)の中における水の採掘と抽出を行い、それをPSRのリムの外側に設置した水素製造プラントに運搬して水素にし、さらにその水素を10km程度はなれた場所の、輸送システムの発着場所へ輸送し、惑星向けの輸送手段の推進薬とする水素製造保管供給システム全体への電力供給全体システムと、そのシステムを構成する要素技術の方式を選定した。

まず月面設置の太陽光発電は、水素プラント近傍のPSRのリム設置と、より太陽光受光の時間の長い、10km離れた高地の設置ということで検討を実施した。

また軌道上からの電力送電においては、無線送電された電力は、PSRの内部の水採掘場所の近傍にて受電して使用するという過程とした。

電力供給アーキテクチャ構築シナリオサマリと適用システム概要

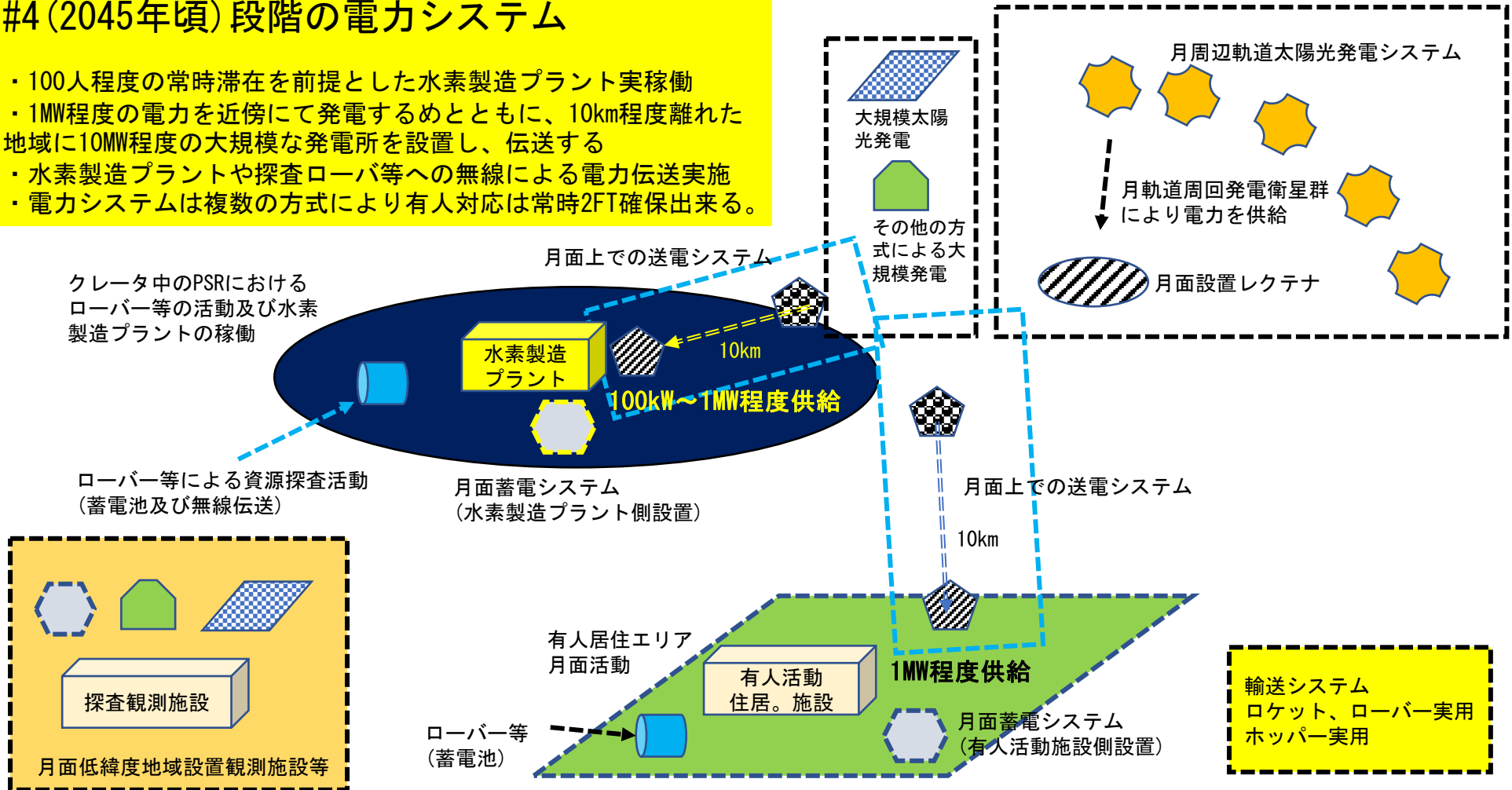
電力供給アーキテクチャ		#1 (2030年頃)	#2 (2035年頃)	#3 (2040年頃)	#4 (2045年頃)	#5 (2050年頃)	
電力給求概要	規模・目的 活動概要	極地方に探査基地設置と探査活動開始	水素製造プラント設置開始	本格的な水素製造、居住開始、月面実利用開始	水素製造本格化、惑星探査基地化、月面実利用本格化	惑星探査向け月実利用本格化、科学観測基地化	
	電力規模・形態	10kW程度	～100kW	100kW～1MW程度	1MW～10MWクラス	1GW～	
	有人/無人	少人数短期滞在	少人数長期間滞在	少人数常時滞在	100人規模常時滞在	コミュニティ	
	停電許容レベル	生命維持2FT (脱出船常備)	生命維持2FT (脱出船常備) 機器1FT	生命維持2FT (脱出船常備) 機器1FT	生命維持2FT (常備) 機器1FT	生命維持2FT (常備) 機器1FT	
構成システム適用概要	月周回軌道発電	月周回実証	システム構築	実用配備	実用配備	実用配備	
	月面発電	太陽電池	10kW、近傍配置	大規模化試験	大規模設置実用	実用	実用
		其他方式	NA	立地条件調査	小規模月面実証	月面建設開始	実用
	送電	マイクロ波	NA、立地調査	小規模伝送試験 (ローバ、プラント)	大規模10kmの距離試験運用	同左、クレータ内、近傍からの送電で実用	同左、クレータ内、近傍からの送電で実用
		レーザ光	NA、立地調査	月面実証試験	試験運用	実用	実用
		有線	ISSの基準、屋内近傍実用	同左、長距離対応中圧化試験	同左、長距離対応高圧化試験	実用 水素製造、居住区	実用 水素製造、居住区
	蓄電	蓄電池	BU、日陰対応実用	BU、実用	BU、実用	BU、実用	BU、実用
		燃料電池	NA	試験運用	実用	実用	実用
	輸送	ロケット	10tクラス	100tクラス	100tクラス複数	100tクラス複数	100tクラス複数
		ランダー	10tクラス(有人)	100tクラス(有人)	100tクラス(有人)	100tクラス(有人)	100tクラス(有人)
ホッパー		NA	技術実証	試験運用	低緯度設備建設	低緯度設備建設	

2. 月面電力供給全体システム

月面での本格的な活動時の電力供給全体システムの構想例

#4 (2045年頃) 段階の電力システム

- ・ 100人程度の常時滞在を前提とした水素製造プラント実稼働
- ・ 1MW程度の電力を近傍にて発電するめとともに、10km程度離れた地域に10MW程度の大規模な発電所を設置し、伝送する
- ・ 水素製造プラントや探査ローバ等への無線による電力伝送実施
- ・ 電力システムは複数の方式により有人対応は常時2FT確保出来る。



2.1 月面電力供給システムへの要求及び制約条件の整理

1. 電力システム構築としての技術課題

・月面の真空環境での放電問題について技術的な研究と検討が必要である。ISSでは120V DCによる配電方式であるが、月面での有線による電力伝送での電圧をどのぐらいまで上げられるのかについての研究開発が必要である。高電圧で送電出来れば、地上と同様に、長距離を有線により電力伝送が可能となるが、実績のある120V DCでは損失が大きくなり、長距離電力伝送には採用出来ないこととなる。

・月面における電力供給システムは、衛星システム等のように発電からその利用までが一つの系統の上に並んでいるのではなく、地上の商用電力系と同様に、最終形態としては複数の方式による発電方式によるものをネットワークとしてその消費先である、水素製造プラントや設備へ供給される。そのため、地上におけるような電力ネットワークシステムとしての観点での検討が必要である。

・また有人宇宙システムであることから、人間に対する安全性の確保の観点でのシステム構築方針の検討と議論が必要である。すなわち現在のNASAの有人宇宙システムで要求されているTwo Fault Tolerant (2FT)を達成する基本的な考え方について、将来は多数の人間が居住するであろう月面で活動対応でどのように発展運用してゆく必要があるのかの議論が必要である。

2.1 月面電力供給システムへの要求及び制約条件の整理

月面での電力システムは、ISS等の宇宙システムの電力供給系というよりも、地上における「電力供給グリッド」構築という観点を出発点とし、月面の特殊性を考慮した課題設定となる。

〈地球上の電力供給システムの考察と整理〉

〈環境〉

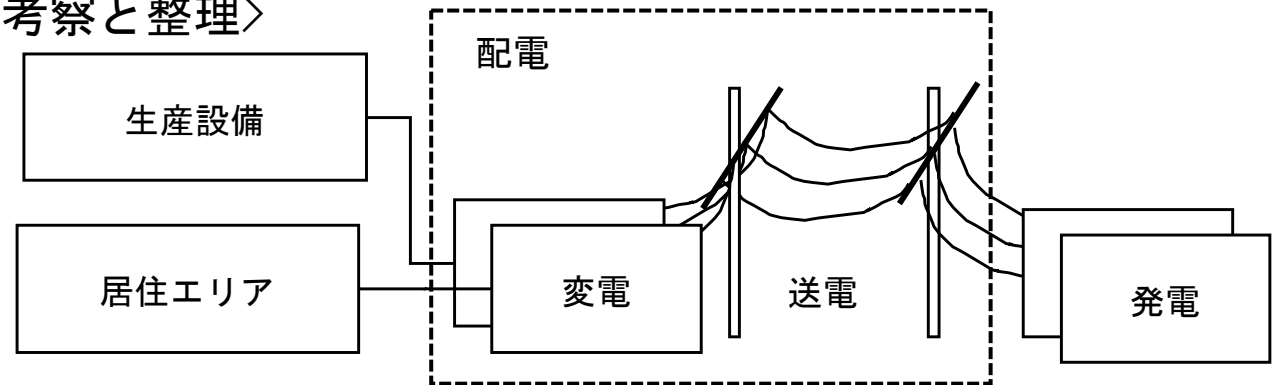
大気中(1気圧の空気)

雨、湿気

1G環境

建設資材は豊富

輸送も地上や航空機により可能



〈留意点等〉

- ・電力系統は発電量と消費電力を一致させる必要があり、その管理が必要
- ・現在はスマートメータ等により全体の管理がなされており、電力線の容量に関わらず電力量を制限する運用がなされている
- ・また人間活動に伴う電力は1シフトなのか3シフトなのかでピーク電力が3倍異なるので要注意
- ・地上の電力網では単なる電力線によるものではなく、ガスを配って発電する方式も併用している
- ・特に契約をしない限り、供給される側は停電は起こりうることを許容している

〈構成概要〉

- ・電力グリッドを構成している
- ・50Hz又は60Hzの交流である(歴史的に)
- ・長距離の送電は高電圧(有線)で実施
- ・居住エリアの電圧は100V~240V程度の低圧
- ・産業用の配電はそれぞれの機器対応の電圧
- ・なお最近では400DC系統での配電も登場とのこと
- ・また小電力対応の室内WPTも登場している

〈月面の特殊性の観点での月面電力システム検討〉

月面の特殊性による月面電力供給システムとして考慮すべき観点を列挙すると次の通りとなる。

1) 地上において人間(生物)は電力供給が停止しても、生産等の活動は遂行不可能となるが、空気があれば短時間は生きのびることができ、直ちに生存を脅かすものではないが、月面においては、電力供給が停止すると生命を維持するインフラが止まるため、人間の生存が直ちに脅かされる。電力断をカバーする蓄電池が随所に設置されるとともに、2FTの観点での方式の異なる電力源による供給ネットワークの構築が必要となる。

2) 月面では真空の問題により、送配電時の電圧制約がある。また技術的には交流の必要は無く、直流とする。

3) 物資は地球から運ぶ必要からエネルギー効率よりも物資(重量)の利用効率が優先する省資源でのシステム構築が必要となる。そのため、システム構成は「重量」も含めた効率化・最適化をはかる必要がある。→ エネルギー効率よりも物資(重量)の利用効率が優先されると考えられる

その結果、全体電力システムのイメージとしては次のようなことがシステムの要件となると考えられる。

1) 居住区室内及びその近傍の”ラストマイルの電力分配”は、国際宇宙ステーションで実績のある120VDCのシステムをベースに構築する(確立されて実績のある技術の活用)

2) 室内に於いて必要な小電力機器は室内WPT(ワイヤレス電力伝送)により複数の供給源から無線により送電することによりロバスト性の確保が可能

3) 発電所からの長距離送電は無線によるものが資源(重量)の効率を優先することから基本となる可能性がある。

4) 有人対応としてはTwo Fault Tolerant (2FT)の電力供給源の確保が必要となる。現在では、

- ・ 月面上の太陽光発電システム
- ・ 月軌道上での発電システム
- ・ (第三の方式と場所による発電) → 課題

となる。ただし、水素製造プラントやその他の無人の設備、観測システムへの電力供給は、停電リスクの影響評価により冗長系の構成を考えることとする。

〈月面の特殊性の観点での月面電力システム検討〉

さらに地上の技術の適用の観点で留意すべき事項として、

- ・電力ピークを考える必要がある。人間の活動は一日を三交替で活動するのか、シフト無しでの活動なのかでピーク電力が異なる。1 シフトだと 3 倍となる。

- ・発熱の熱は、単なる冷却を考えるのではなく、ヒートマス等を利用する等で活用することを考える必要がある。生成した水の凍結防止等に利用可能と考えられる。

- ・バックアップの電池を随所に配置する必要がある。

- ・水素製造設備へのラストマイル等、居住区外の設備では最近の技術動向にて400VDC の使用も考えると良いかもしれない。

- ・電源システムとしては太陽電池との整合性等を考えると直流が良い。交流方式は地上では過去の経緯で使っているだけのようである。

- ・車の配線は、筐体をリターンしているため基本的に単線であり、この方式により省資源が可能である。

- ・地上の電力網は単なる電力線によるものではなく、ガスを配って発電する等の方式も取っているで、水素の燃料電池との組み合わせによる水素ネットワークも考慮する必要がある。

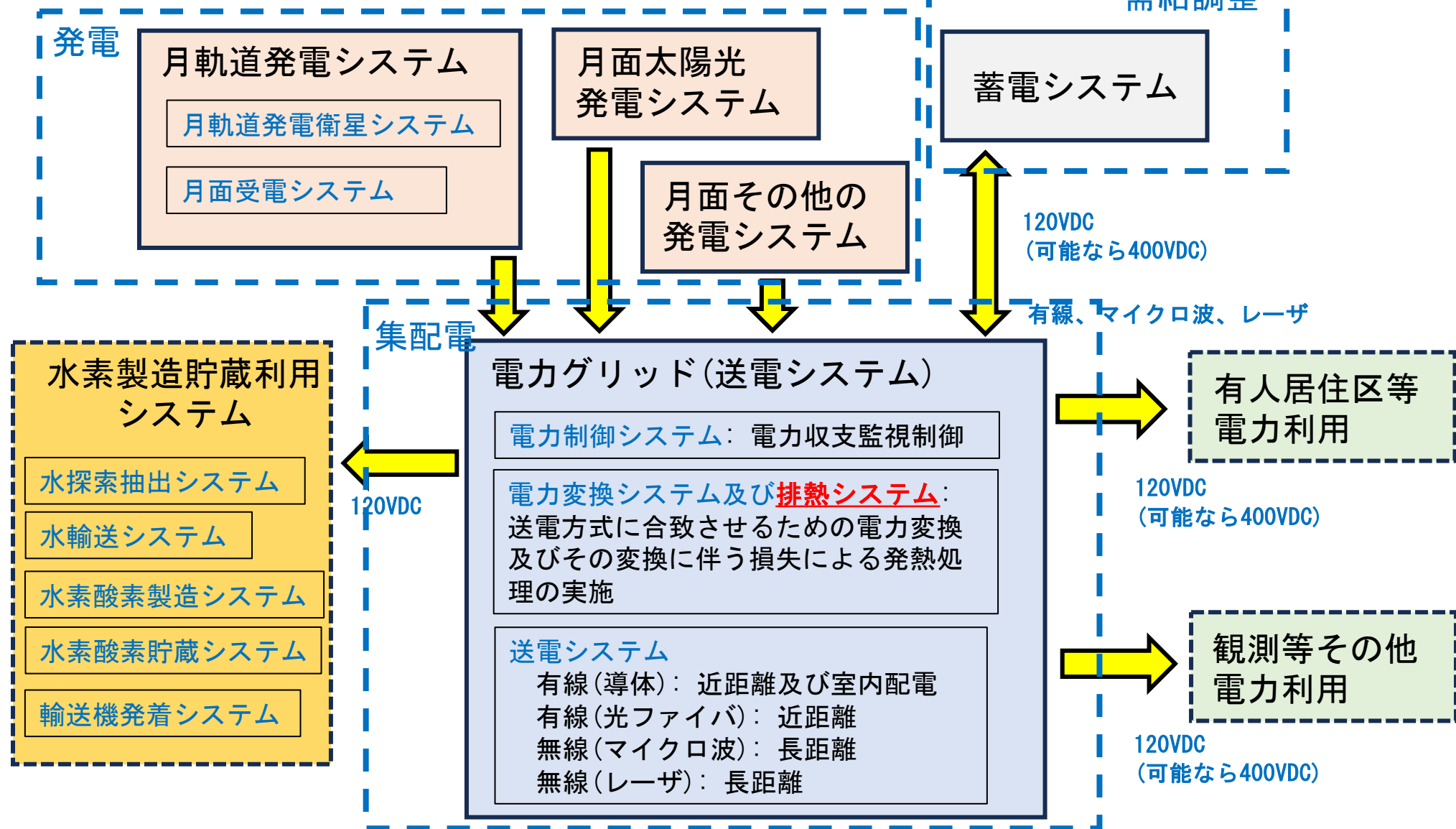
- ・各発電所や変電所からの配電や送電は地上においては 2 回線の系統にて冗長構成としている。

- ・電力システムは発電量と消費電力を一致させる必要がある。現在の地上の電力システムは、スマートメータ等による管理により、使用電力の制限もしている。例えば 1kW しか電力を供給しないという計画であれば、仮に電力線の容量が 10kW でも 1kW に制約できる。

- ・有人居住区等の排出された炭酸ガスが捨てるのではなく有効に活用されるのと同様に、排熱についても捨てるのではなく蓄熱を活用して有効に活用するようすべきである。また同様に全ての設備の排熱処理についてもうまく活用するようにシステムを構築すべきである。

- ・直流の場合、マージンを取って送り、蓄電池をバッファとすると良い。

2.2 月面電力供給全体システム構成の概念



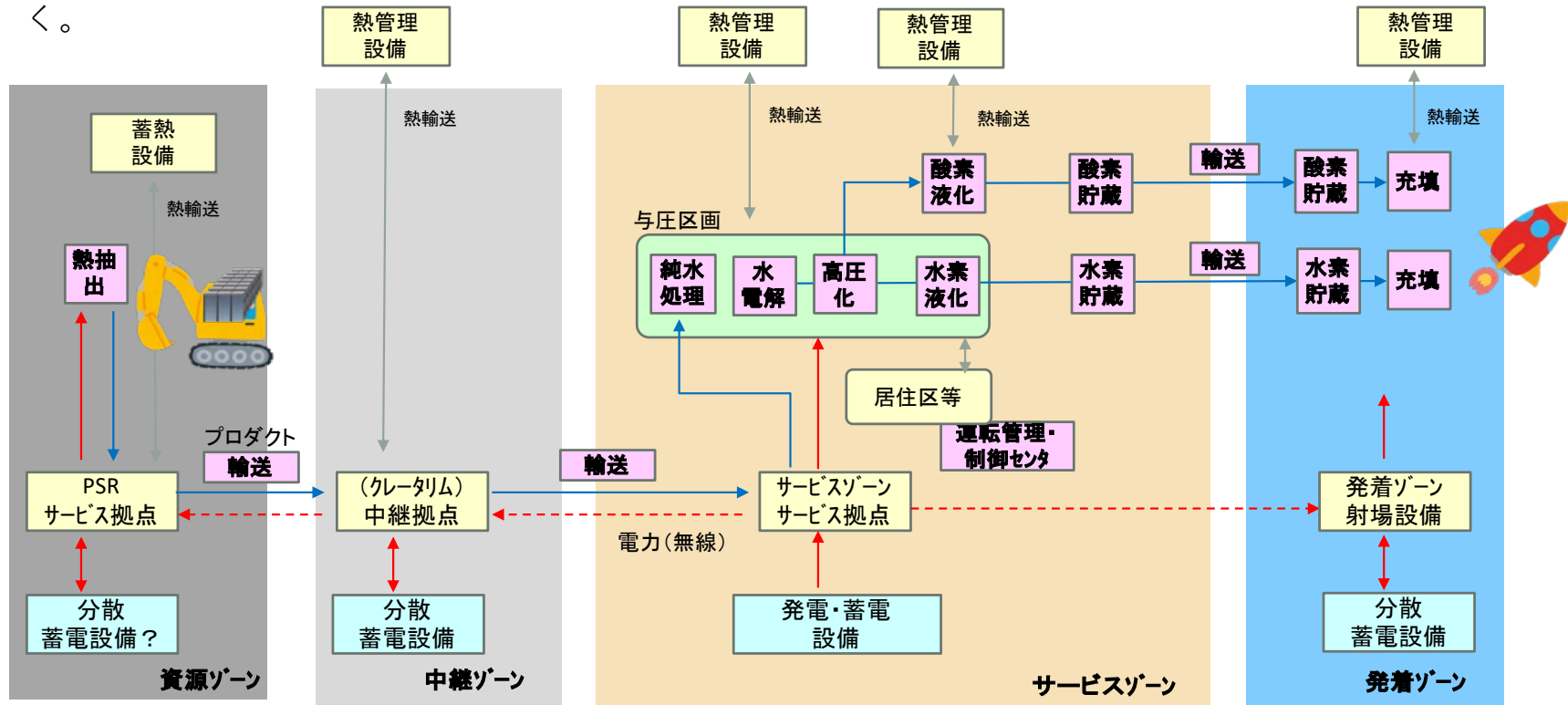
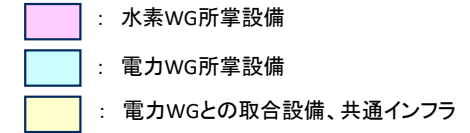
2.2 月面電力供給全体システム構成の概念(続き)

水素WGからの要求

関連設備を含む、プラントシステムの配置・アーキテクチャ

● 検討のポイント

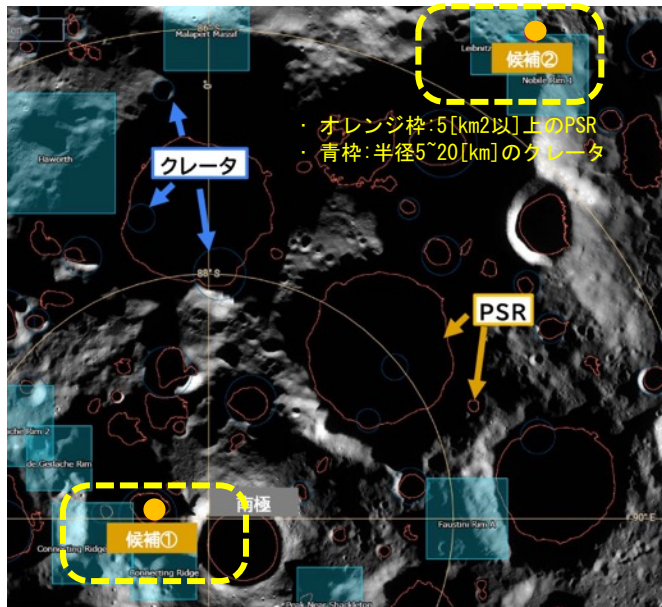
- インフラ・周辺設備を含め、関連する設備を極力もれなく抽出し各ゾーンに配置した。
- 引き続き電力WGと協議し、特に取合・共通設備の要件を明確化していく。



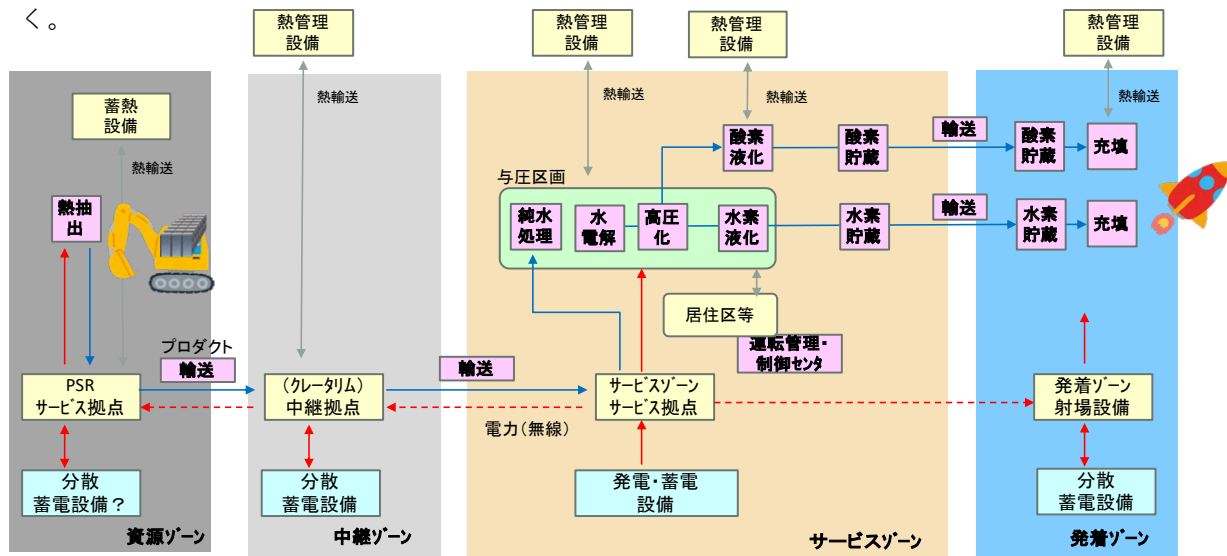
さらに電力WGとしての想定
有人居住電力: 10kW程度

2.3 水素側の電力供給要求アップデート及びそれに対応する電力供給全体システム構成

- 構築シナリオのアップデートに基づき設定された新たな水資源採掘場所の候補(2箇所) (シャックルトンクレータ近傍のCONNECTING RIDGE (候補①) と、Nobile Rim (候補②) の2か所とし、月面設置発電システム建設場所はその候補地点のなかで日当たりの良い場所に設置されるサービスゾーンとし、処理等を行うアーキテクチャについては下記の図の通りとし、それを前提として電力システムを構築する。
- シナリオにおいてはサービスゾーン、居住ゾーン及び観測ゾーンについての設置場所についての設定は特に無いので、送電方式も含め検討を始めることとする。



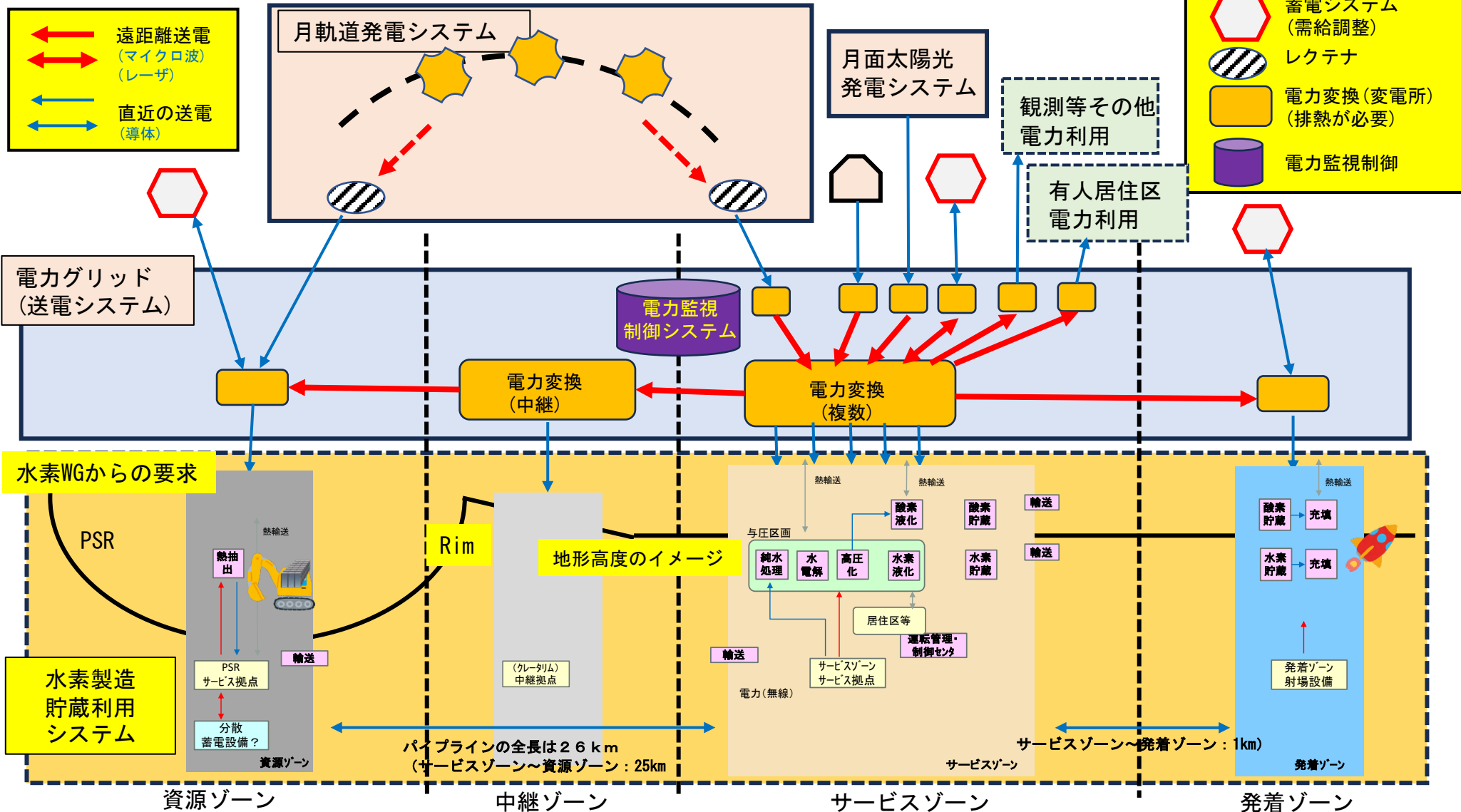
前提とする候補地



前提とする水素アーキテクチャ

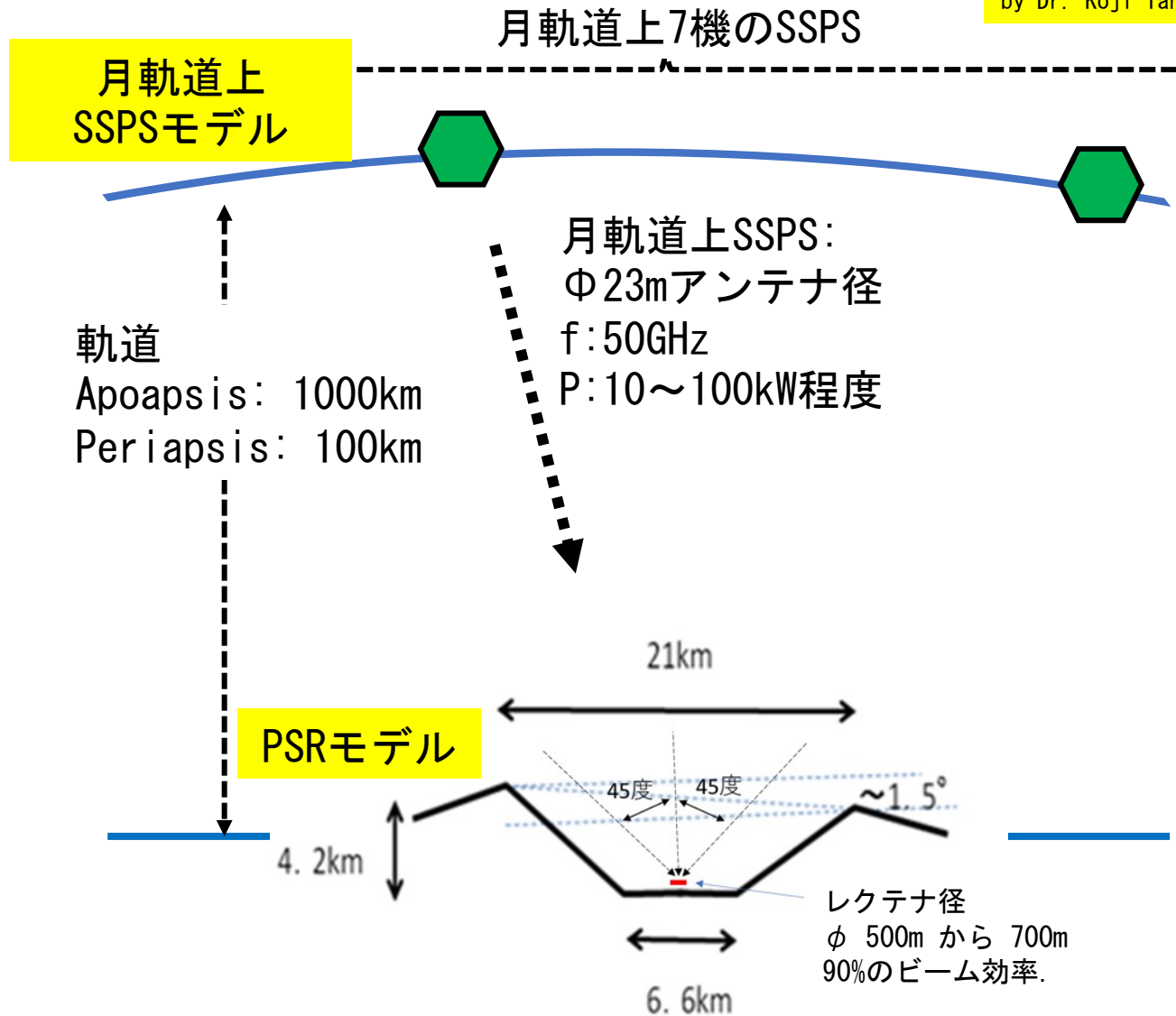
2.2 月面電力供給全体システム構成の概念(続き)

水素からの電力要求に対応する電力供給システム構成(基本システム構成)

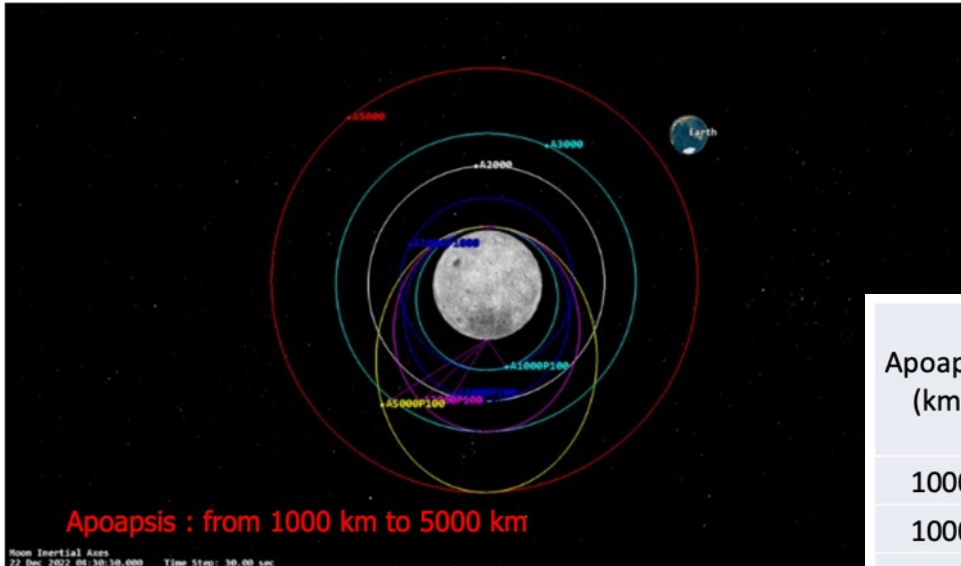


3. 月周辺軌道太陽光発電システム

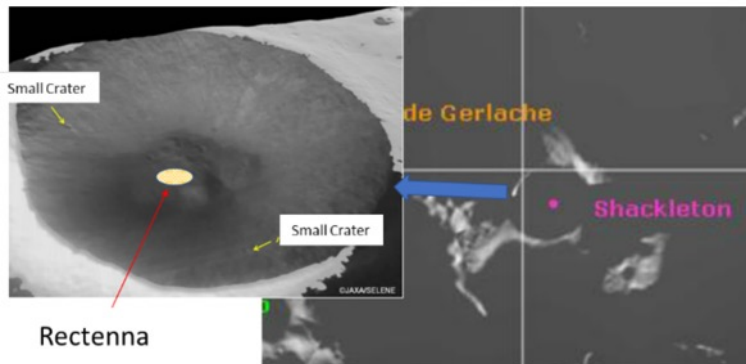
From #34 Moon Village Study
Meeting material on Sept. 26, 2023
by Dr. Koji Tanaka ISAS



シャクルトンクレータ上空 を通る月極軌道の例



The location of Shackleton Crater : 89.9° S, 0.0° E.



シャクルトンクレータ上空を通る月 極軌道衛星の数と上空通過時間の例

Apoapsis (km)	Periapsis (km)	Period (min)	Time($\pm 45^\circ$) (min)	Ratio	Number of Satellite
1000	1000	214.2	22	0.10	10
1000	100	163.6	24	0.15	7
2000	2000	341.7	48	0.14	7
2000	100	220.1	56	0.25	4
3000	3000	487.7	80.5	0.17	6
3000	100	281.9	97	0.34	3
5000	5000	827.1	158	0.19	5
5000	100	419.9	200	0.48	2

月軌道発電衛星の概要の一例

			Remarks
Power Transmission Distance	1000	km	Apoapsis : 1000km, Periapsis : 100km
Supply Power	981600	kJ/Period	100kWsystem
Number of Satellite	5	units	
Supply Power /sat.	136.3	kW	
Frequency	50	GHz	
Diameter of Transmission antenna	23/116	m	
Diameter of Rectenna	500/100	m	
Beam Steering Angle	±45	Degree	
Power generation of Sat.	779	kW	DC-RF conversion efficiency : 50%
Size of Solar Array	10 x 57	m	Conversion Efficiency : 35%
Battery Capacity	1268	kWh	DOD50%
Mass of Battery	9.6	t	Refer to electric vehicle battery : 40kWh-->303kg 17

From #34 Moon Village Study Meeting material on Sept. 26, 2023 by Dr. Koji Tanaka ISAS

- = 月極軌道衛星から月の極地域への発電衛星について、その軌道、極地域との距離、アンテナサイズ及び送電システムの規模についての検討の実施
- = 周波数を上げることにより軌道上発電衛星のアンテナ及び月面での受信レクテナのサイズは小さくなるが、その表面精度が要求されることとなる

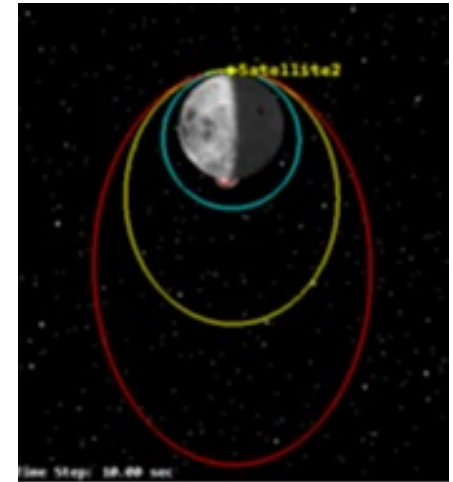
月周辺軌道太陽光発電システム

〈極域の可視時間〉

〈月極域への送電のための軌道〉

近月面高度 100km
 遠月面高度 1,000km
 5,000km
 10,000km

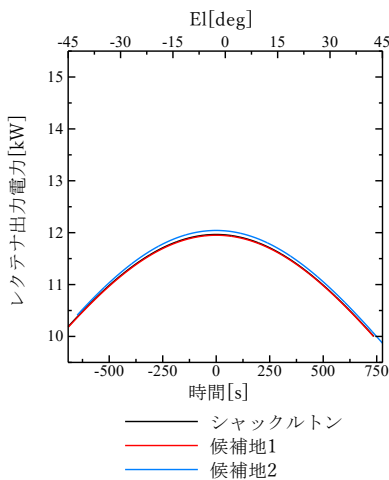
遠月面高度	最大EI	周期		45度の可視時間		機体数
		(s)	(h)	(s)	(h)	
1000km	84.195	9820.1 83	2.7	1426	0.39	6.9
5000km	87.116	25189. 72	7.0	11945	3.3	2.1
10000km	87.484	50145. 45	14.0	33294	9.2	1.5



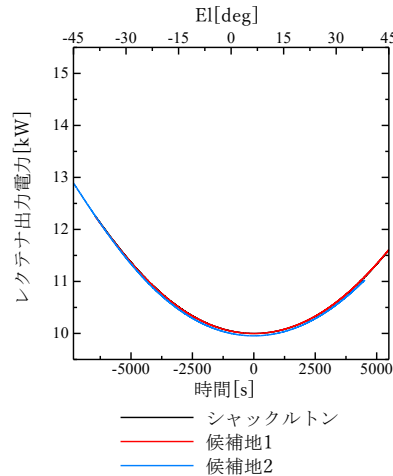
候補地1、候補地2、シャクルトンクレーターでほぼ等しい

〈可視時間中の電力変動〉

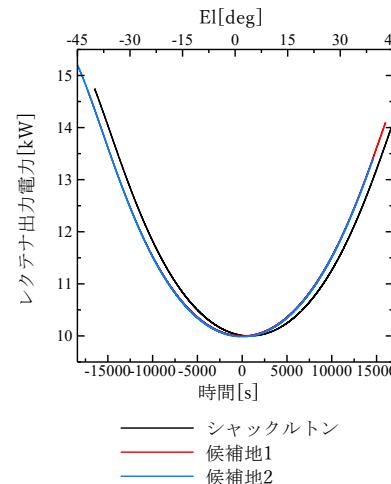
$\tau=1$ (=63%)、周波数50 GHz、受信電力10 kW時の時間-受信電力変化を示す



遠月面高度 1,000km



遠月面高度 5,000km



遠月面高度 10,000km

・ 10kW送電を想定した場合の電力プロファイルは左記の通りとなる。100kW送電への拡大は技術開発課題である

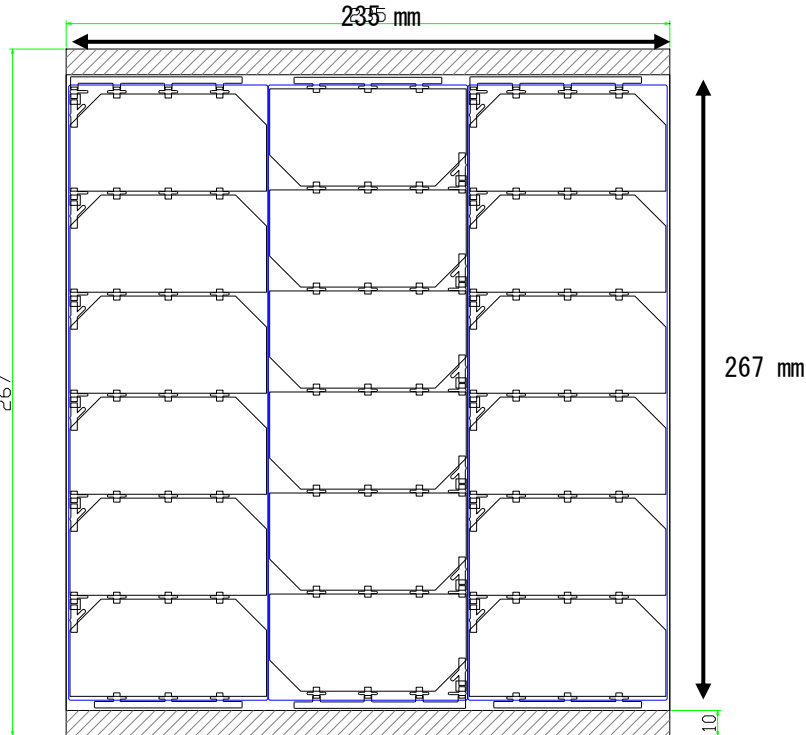
・ PSR内での水探索と水素製造への月軌道上発電システムの電力を利用であればPSR内に受電レクテナを設置し、直接受電して利用することが電力効率の観点からは最適と考えられる

・ 有人居住区へも供給するのであれば、PSRの外の居住区の近くにも受電レクテナを設置し、ビームの方向制御により両方に送電可能と考えられる

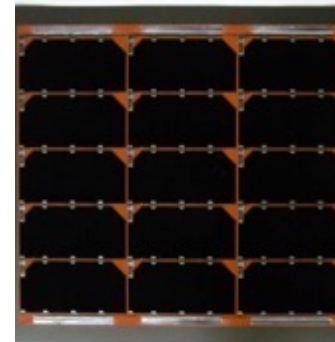
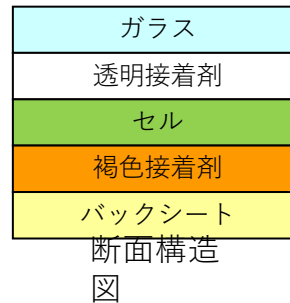
4. 月面設置発電システム

4.1 太陽発電セルに関する検討

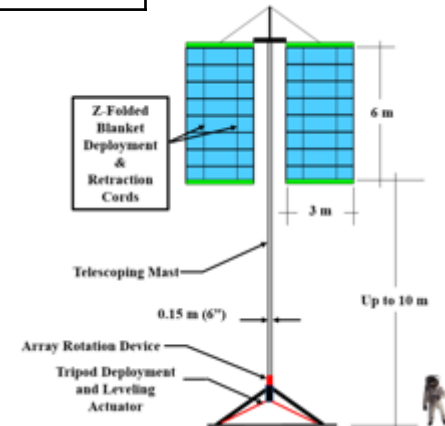
太陽光発電アレイ用ユニットシート形状と特性等の調査検討を実施した。



	特性値(1シート)	備考
出力(typ.値)	20.8 W	18セル分合計
重量	46.5 g	ガラス厚み100um
出力重量比	2.2 g/W 0.447 W/g	
サイズ	267 × 235 mm	
厚み	約0.4 mm	



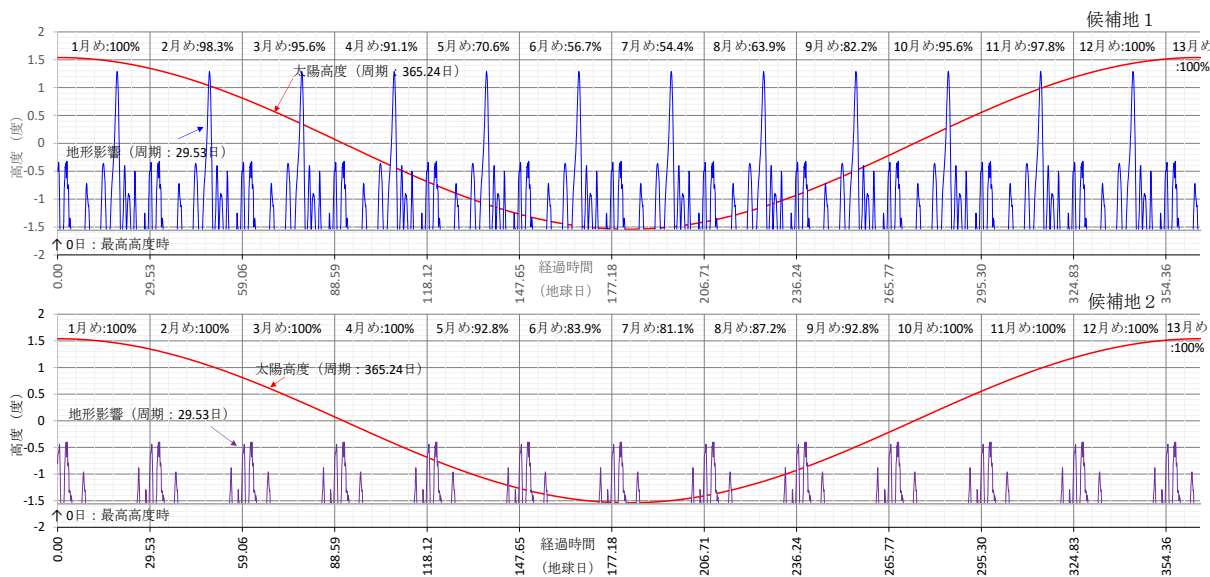
イメージ画像



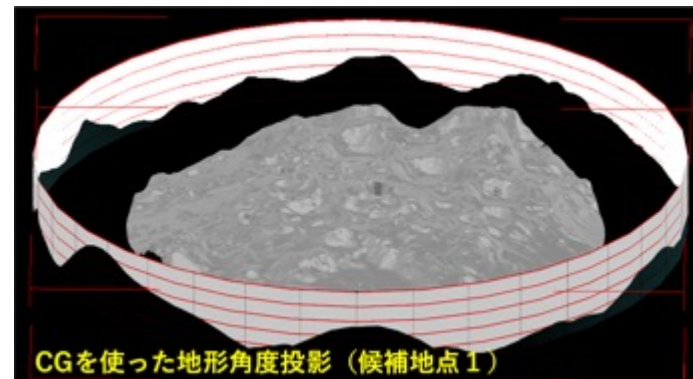
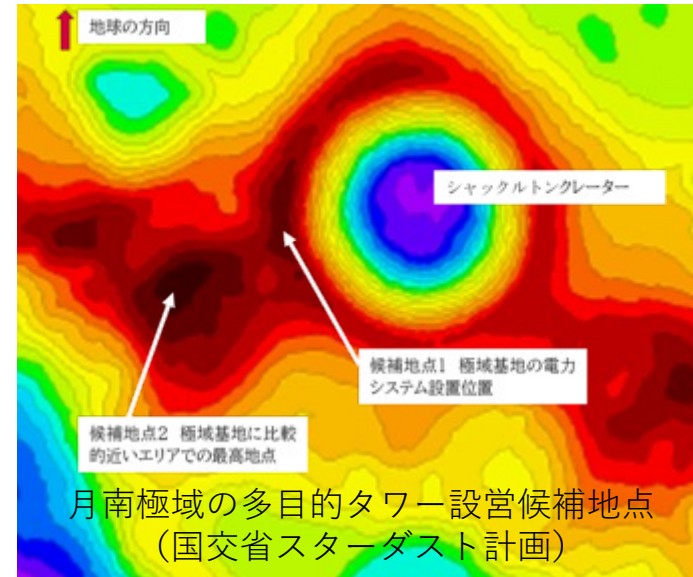
・ 6 m × 3 m × 2翼だと572シート。出力(BOL):11.9 kW 重量:26.6 kg

4.2 太陽光発電環境の検討

月極域での月面設置太陽光発電システムの検討には、日照時間の経緯を把握することが重要であるため、国交省スターダストプログラムの「月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討の技術開発」で作成した月南極域の3Dモデルを基に日照環境の年間の変化を求めた。



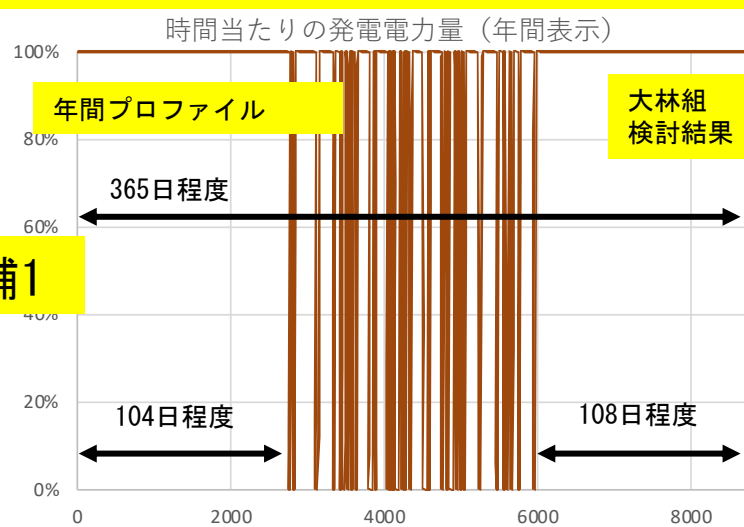
太陽高度と候補地点からみた太陽方位の最高地形高度の比較



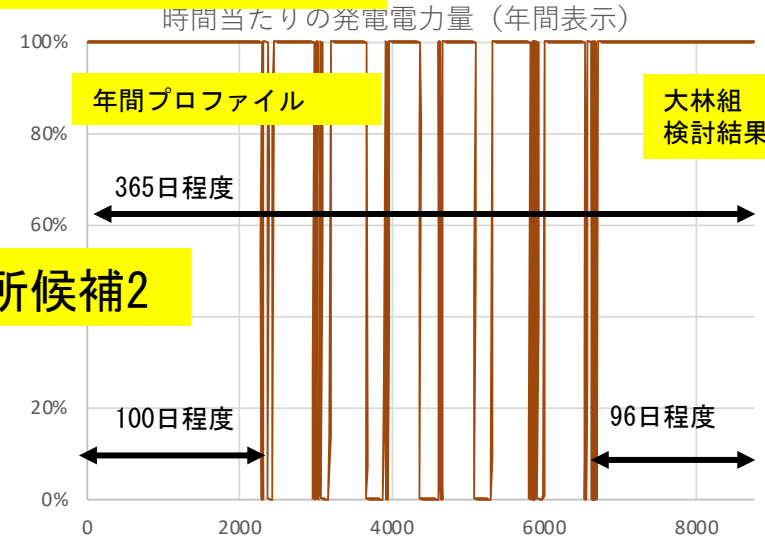
各発電方式特色の整理

4.3 月面設置太陽光発電システム

電力プロファイルは正確に予測でき、計画的な利用が可能である



場所候補1



場所候補2

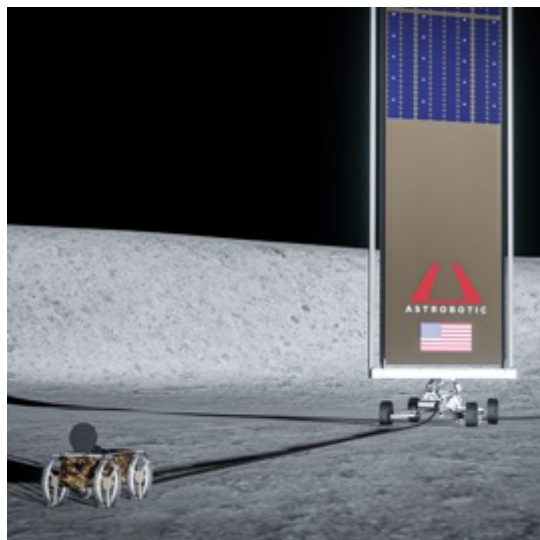
〈月面太陽光発電システムの特色の分析〉

・月面太陽光発電システムは、設置されている南極地域であればほぼ月面水平線方向から照らされるため、太陽光を遮蔽する地形から太陽が顔を出すと100%の発電が可能となる。

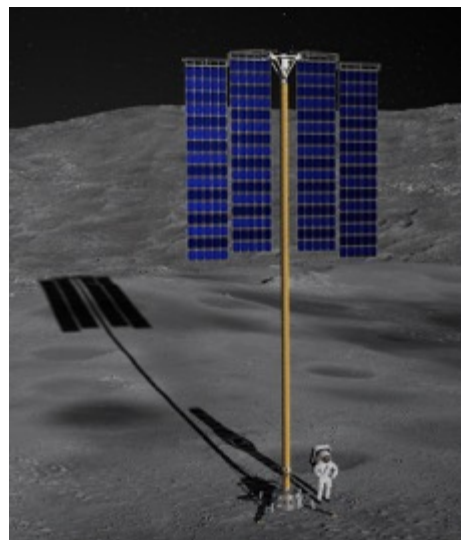
・太陽と月の動きについての時刻は正確に予測できるため、太陽電池にいつ太陽光が照射されるかについては正確に予測が可能となる。このため、発電プロファイルは正確に予測でき、計画通りに電力使用が可能となる。

4.4 既存事例調査

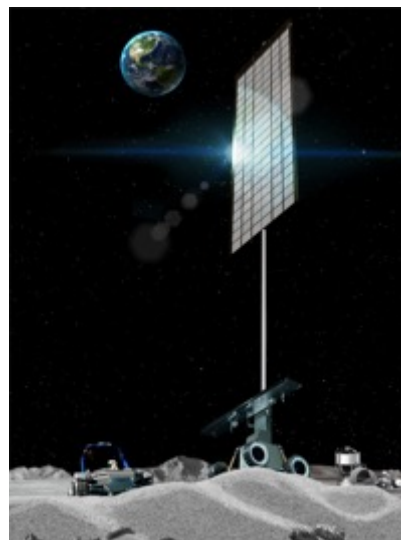
NASAからプロトタイプ作成・環境試験実施者として選定された3社、国交省スターダストプログラム「月面における展開構造物の要件定義および無人設営検討の技術開発」で作製された構体BBMを使用したタワー型太陽光発電システム等の事例調査を実施した。



Astrobotic



Honeybee Robotics



Lockheed Martin



国交省スターダストプログラムで作製された構体BBMを使用したタワー型太陽光発電システム等の事例

4.5 建設方法、仕様の検討

①建設方法

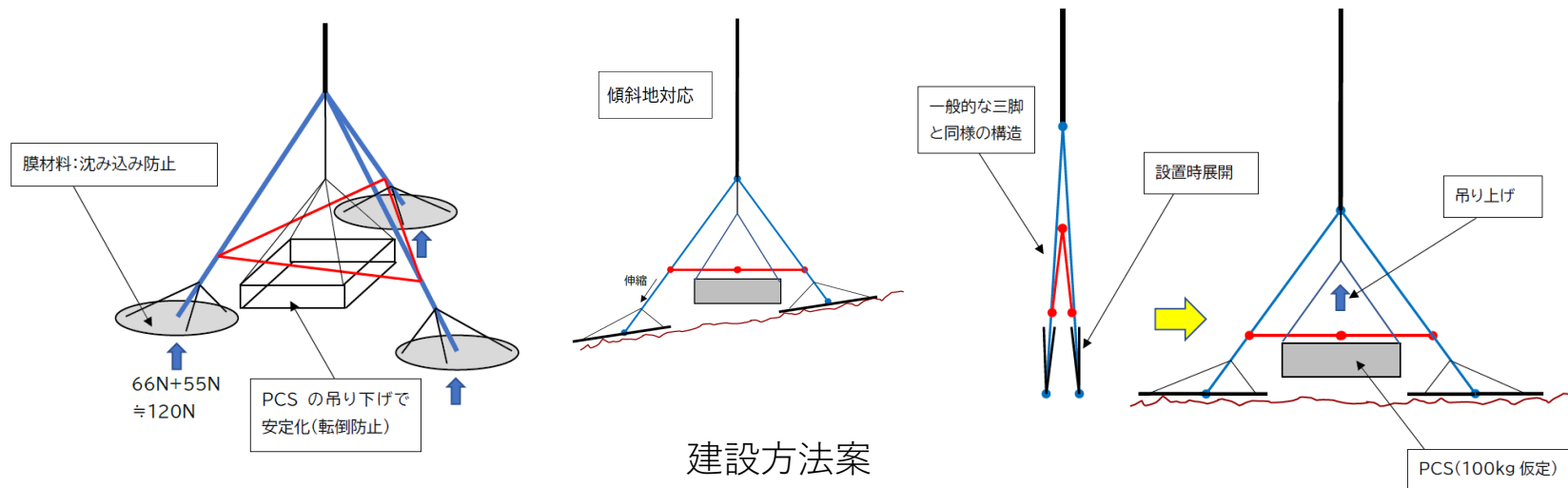
掘削・整地が必要となると大掛かりな工事になるため、簡易に設置できる方法が必要である。傾斜や沈み込みに対応できるような設置方法の検討を行った。

②仕様

NASA等の国内外の開発、検討状況等から各年代ごとの必要な仕様の検討を行った。

年代毎の太陽発電システム仕様

項目	～2030年	～2035年	～2040年
タイプ	展開型太陽電池タワー		
太陽電池セル	多接合型化合物		
発電電力容量	1～10kW	10～50kW	50～100kW
展開・収納機構	有（自動）	有（自動）	有（自動）
回転機構	無（多面体型） or 有	有（1軸）	有（1軸）
高さ	10数m	10数～30m	10数～数10m
寿命	5年	10年	10年
対応傾斜角度	10°	15°	15°



5. 月面上での送電システム

極域のクレータのリム上に基地を建設して月面活動を行えるようにすることを目標に、水素WGの必要電力算出結果を踏まえ、そこで必要と考えられる送電システムを検討しました。



図1 かぐやHDTVカメラによる月の南極（シャクルトンクレータ付近）

出典：https://www.jaxa.jp/press/2008/10/20081024_kaguya_j.html

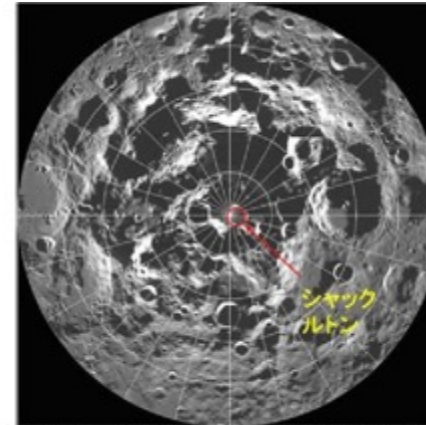
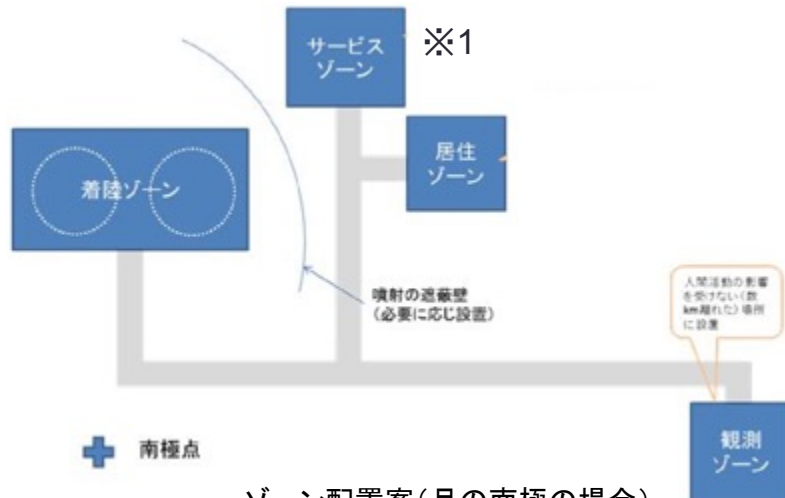
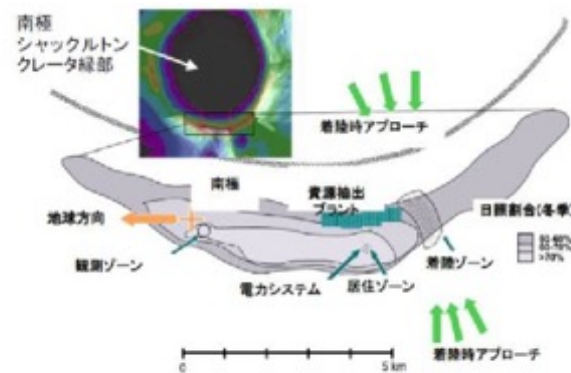


図2 月の南極付近（クレメンタイン観測データ（NASA提供）に基づき作成）



ゾーン配置案(月の南極の場合)

※1 第4回水素WG資料より、太陽光発電施設はサービスゾーンに設置される前提とする。



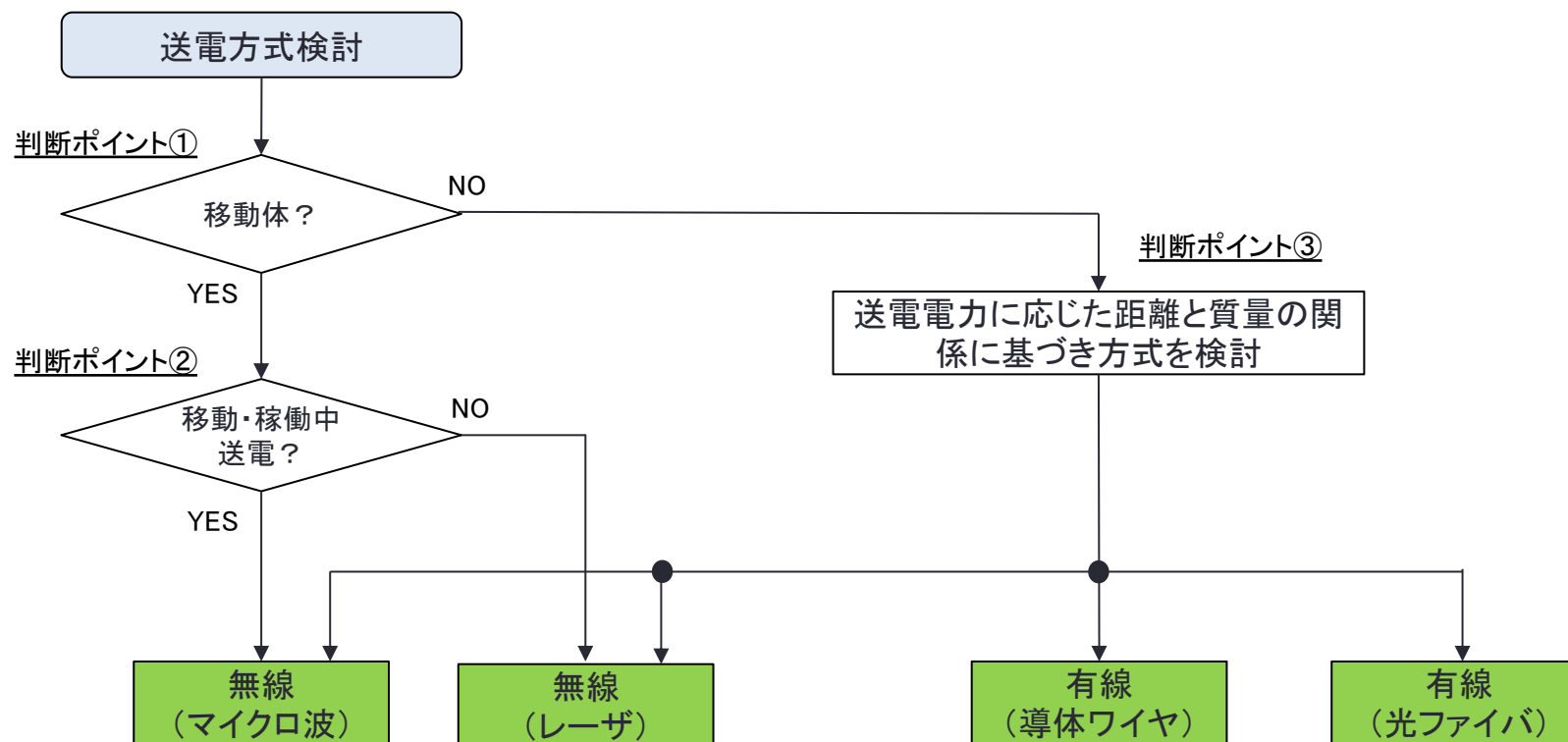
リム上の基地配置(ゾーン方式)の例

※2 参考文書より。

5.1 送電方式の選定方法の検討

送電方式決定するための現時点で考えられるフローを検討しました。各種送電方式を採用し得る部分については、地球からの輸送がボトルネックと考えられるため、最も質量の小さいものを採用することとし、送電電力に応じた距離と質量の関係を基に送電方式を選定することにしました。

なお、必要器材は着陸ゾーンに一旦到着してから必要な場所に輸送することが考えられ、有線のケーブル敷設と無線の送受電装置にはそれぞれ送受間での器材の輸送が必要となるため、敷設に関する優劣はここでは検討対象外としました。



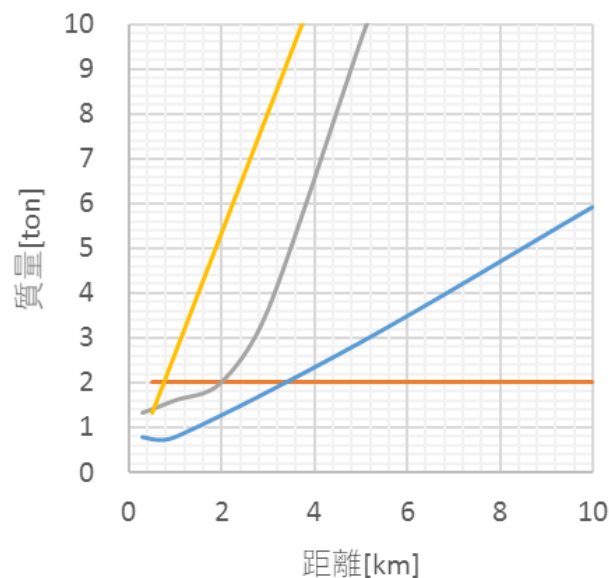
※室内の局所的な給電については、地上における電源コードに加え、室内WPTの採用が考えられる。

5.1 送電方式の選定方法の検討 (Cont.)

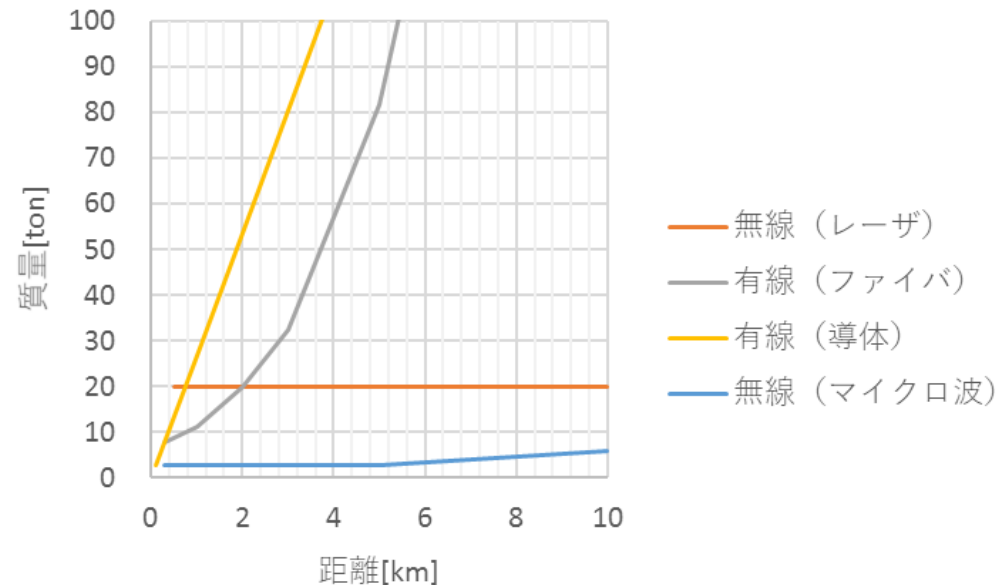
判断ポイント③(固定点間送電における送電電力ごとの方式) (つづき)

各方式は以下の特徴を有するため、送電電力が増加すると、システム規模への影響が小さいマイクロ波方式が優位になると考えられる。

- マイクロ波は、一定の空間伝送効率を得るためには送電電力に関わらず一定の規模(アンテナサイズ)が必要。一方で、送電電力を上げて、システム規模で支配的なアンテナサイズへの影響は小さい。
- レーザは、照射エリアの広がり小さく、距離によって質量は変わらないが、高出力化には複数レーザを束ねる必要があり、電力に比例して質量は増加する。
- 有線(導体)、有線(ファイバ)は、距離の増加に伴って質量は増加する。また、高出力化には導体断面の増加やファイバを束ねる必要があり、電力に比例して質量は増加する。



送電電力10kWの例



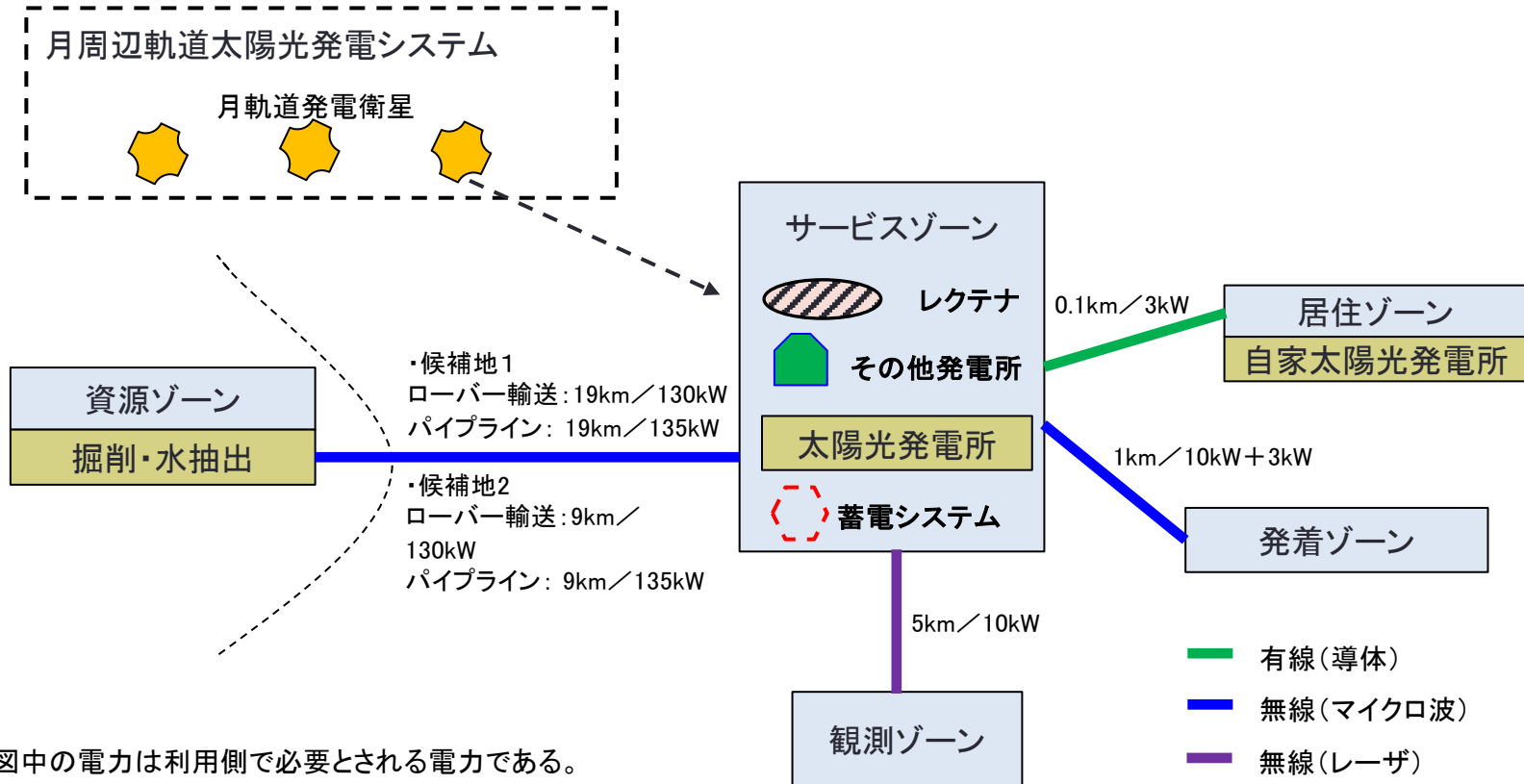
送電電力100kWの例

5.1 システムの検討状況

5-1-2 システム構成及び建設シナリオの検討

電力供給システム候補の内、「ケース1」の電力供給システム構成案を下記に示します。

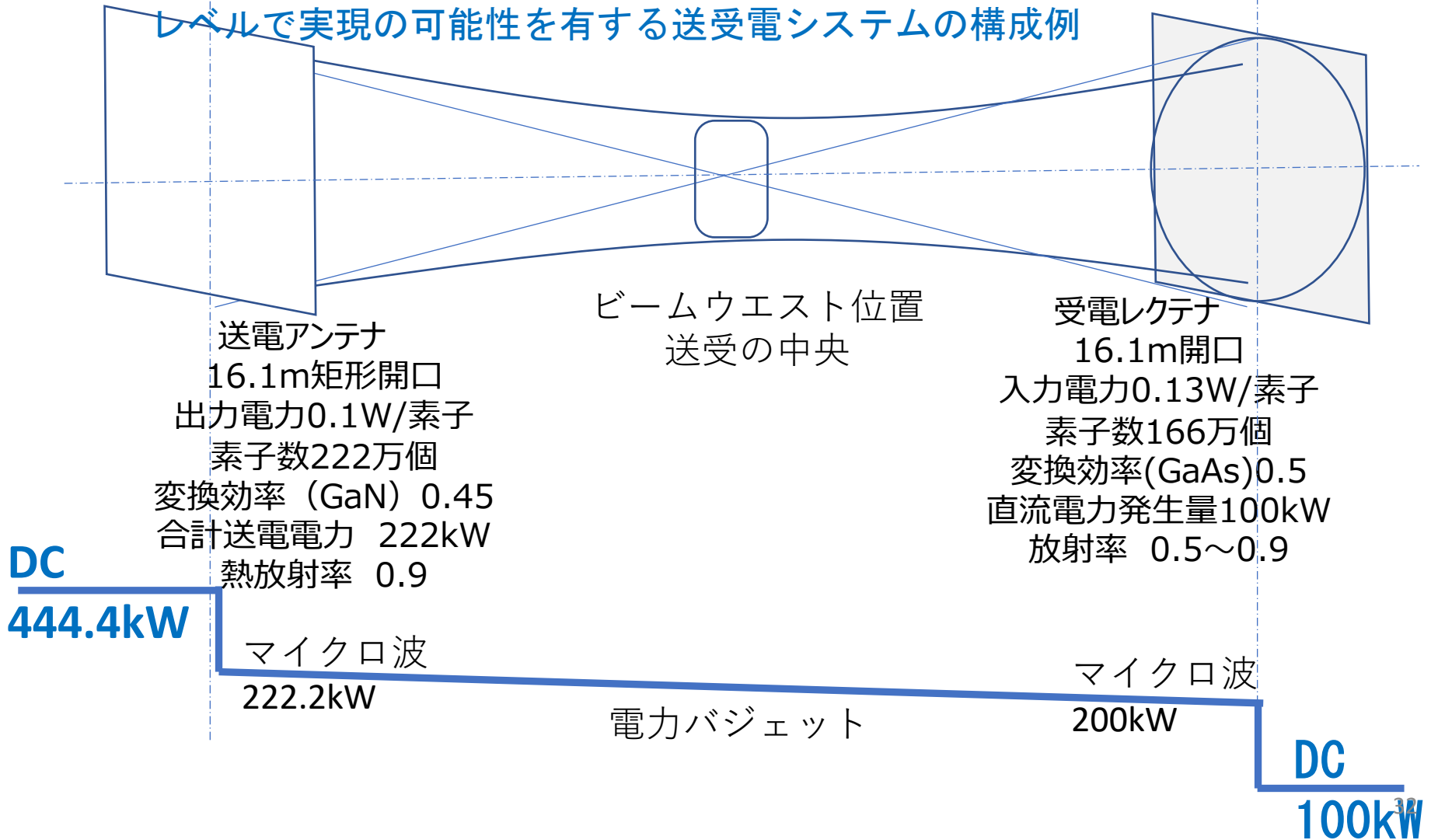
▶ ケース1における電力供給システム構成案



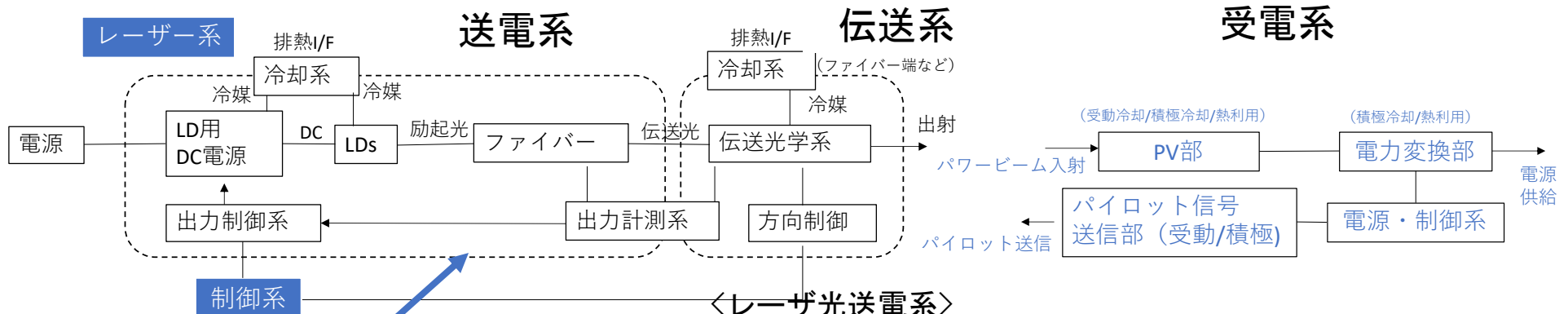
※図中の電力は利用側で必要とされる電力である。

5.2 月面上での送電システム(ミリ波による方式の構成例)

送信周波数 25GHz、送電距離 10km を想定した場合、現技術レベルで実現の可能性を有する送受電システムの構成例



3. 月面上での送電システム（レーザ光による送電システム構成例）



- ・製品例10kW（米国IPG社）
850x800x1400mm

<https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers/1-micron/yfs-sm-1-10-kw>

- ・国産はフジクラ開発品5kWなど

〈レーザ光送電系〉

- ・レーザ送電系は排熱が課題
- ・100kW供給と受光変換効率を想定すれば、レーザ出力は200kW超が必要
- ・レーザ系は110kW以下程度のモジュールの統合、もしくは複数の送電システムにより構成される

〈受電系〉

- ・冷却系は高効率の低温運転のために必要
- ・送電システム側が受光システムをターゲットにするために、受動的なコーナーキューブリフレクターか、積極的なパイロットレーザビーム送信か、要検討
- ・レーザ系は1系統で200kW級の10km伝送ビーム生成は難しく、10kW以下程度のモジュールの統合もしくは、複数の送電システムにより全200kW級の構成が考えられる。

課題としては、現状では電気・レーザ光変換（30～50%）と光・電力変換（20～40%）の効率が発展途上であること

5.3 光ファイバーケーブル

【例】高出力用光ファイバーケーブル



QBH Fiber Optic Cable: 1030 nm to 1090 nm Datasheet
<https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/components-and-accessories/qbh-fiber-optic-cable-1030-1090nm-ds.pdf>

ファイバーコア径 $\leq 1,000\mu\text{m}$
 ファイバーケーブル重量 $200\text{ g/m} = 200\text{ kg/km}$

(参考) 裸線の場合

$$\pi(\phi 0.1\text{cm}/2)^2 \times 100\text{cm/m} \times 2.2\text{g/cm}^3 = 1.7\text{ g/m} = 1.7\text{ kg/km}$$

別物 (藤田撮影)



5.4 レーザによる電力伝送方式

レーザー発振器：将来有望な国産技術
 フォトニック結晶レーザー (PCSEL)

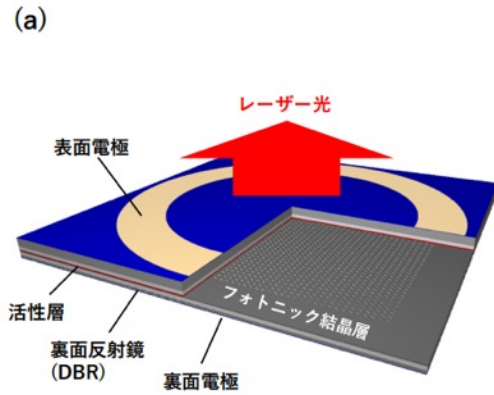


図 1. (a) フォトニック結晶レーザーのデバイス構造の模式図。

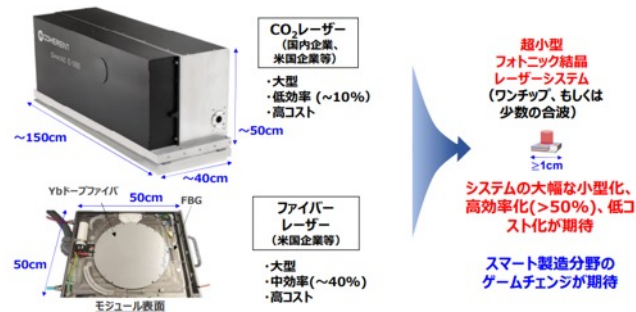


図 5. スマート製造分野のゲームチェンジのイメージ。今回、実現した PCSEL と同じ設計のフォトニック結晶構造を用いて、面積拡大 ($\geq 1\text{cm}$) を行い、動作時の温度上昇を考慮した格子定数分布を導入することで、キロワット級 (さらには、それ以上の光出力) をもつ PCSEL の実現が期待されます。(あるいは、今回開発した PCSEL を単純に 2次元アレイ化することでも同様の効果が期待されます。) なお、面積拡大 (あるいはアレイ化) により、ビーム品質が劣化しても、パワー増大効果で相殺出来、輝度は、 $1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ をそのまま維持することが可能となります。これにより、スマート製造分野において、大型レーザーの一新、すなわち、ゲームチェンジが期待されます。

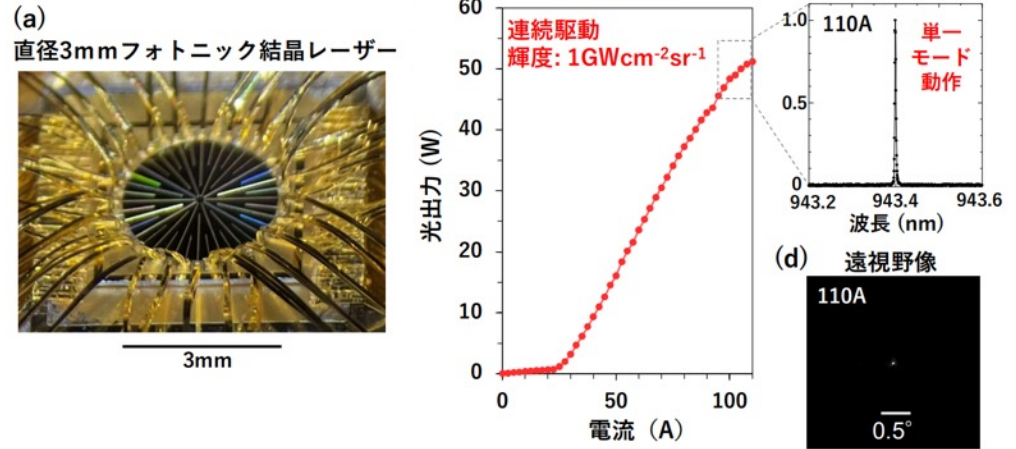


図 4. (a) 開発した直径 3mm フォトニック結晶レーザーの実装後の写真。(b) 連続動作における光出力特性。(c) 発振スペクトル。(d) 遠視野像。連続動作にて、光出力 50W 単一モードかつ極めて狭い拡がり角 ($\sim 0.05^\circ$) の高ビーム品質動作に成功しました。得られた輝度は、 CO_2 レーザー、固体レーザー、ファイバーレーザー等の大型レーザーに匹敵する値 ($1\text{GWcm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) にまで到達しました。

【解説】

- 原子配列を制御できる精緻な半導体設計・製作技術により、光の閉じ込めと放出を自在に制御できるフォトニック結晶を用いた、京大野田先生が世界トップを走る新しいレーザー発振技術。
- 従来の半導体レーザーは積層端面からの放射で低ビーム品質 (絞れない) だが、これは面発光 (surface emission) 型で、大きな面積からの高ビーム品質 (絞れる、広がらない) の放射が特徴。
- 50Wのシングルモード動作確認済. kW級設計出来(2023年6月)
- 方向制御は従来ミラー方式で別途対応として、ビーム自体はこのまま送光できる可能性あり. 小型軽量化に有利. 除熱がポイント.

5.5 月面上での有線による電力伝送

・電力伝送における「ラストマイル」の電力伝送(配電方式)について

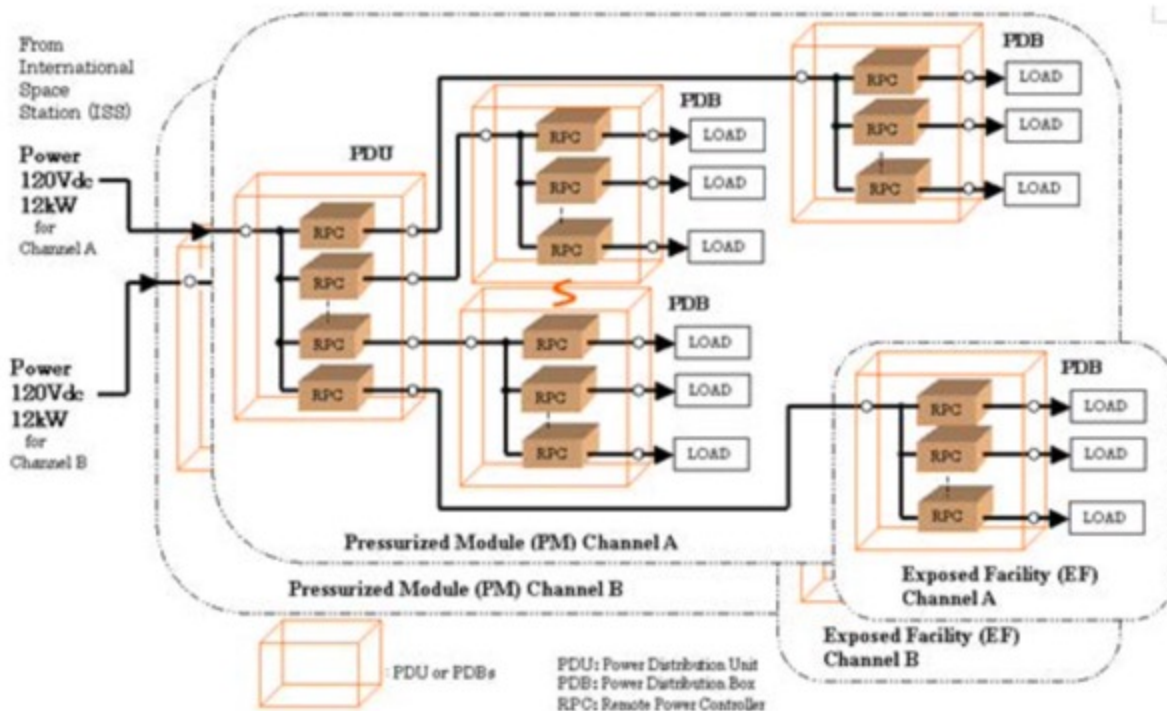
= 全てのエネルギーは最終的には有線による電力エネルギーにて必要としている装置に配電され、必要な機能を果たす。

= ISSにおいては1984年における議論を経て、120V直流による配電方式となっており、対応する配電機器も充実し運用実績もある。

・上記の直流120Vの技術の延長線上での長距離の電力伝送は、電力損失を許容される範囲内にするにはケーブルの重量が膨大となり、それを地球から運搬する必要があるという観点で課題が多いと考えられる。

・オーダーの異なる高電圧にするには放電対策と絶縁確保の観点で新たな課題があり、新たな技術開発が必要である。

・月面は高真空であることからパッシェン法則からは高電圧での電力伝送が可能な可能性はあるが、局所的なアウトガスによる真空度の劣化、絶縁材料の問題、レゴリス等による帯電による影響等、不確定な要素が多いのが課題である。



「きぼう」の電力分配系統

国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」で獲得した有人宇宙技術。より
https://www.google.co.jp/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewilm8qQ27X1AhU4s1YBHWcGBA0QFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fjaxa.repo.nii.ac.jp%2F%3Faction%3Drepository_action_common_download%26item_id%3D4195%26item_no%3D1%26attribute_id%3D31%26file_no%3D1&usq=A0vVaw1RZXCo9LAQLZgwJ8XQmS

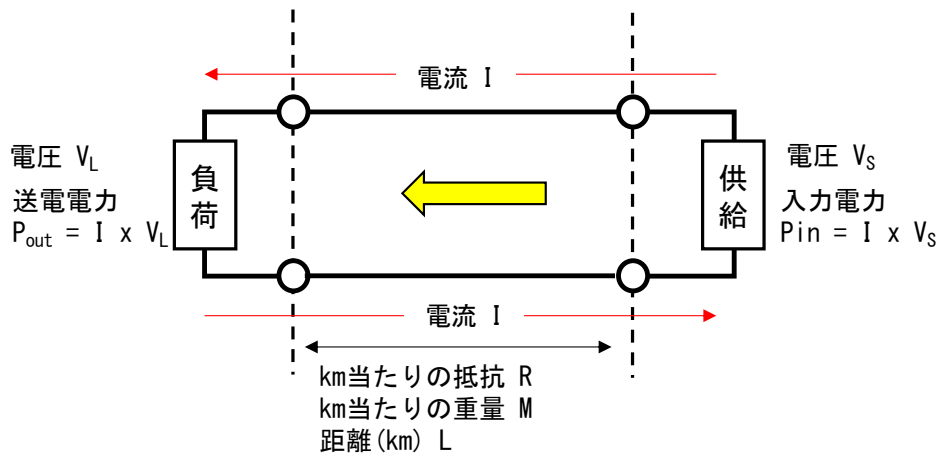
導体による有線による送電の検討

1. 前提条件の整理

- 送電電圧 120VDC、400VDC → V_L
(受電側の電圧で定義)
- 送電距離 100m、500m、1000m → L
- 送電電力 10kW、100kW、1MW → P_{out}
(受電側の電力で定義)

上記の条件にて有線送電システムの **電力線重量** 及び **送電効率** を算出する

2. 計算方法



(重量) = $M \times L$
(効率) = P_{out} / P_{in}

3. 電力線の方式の選定

「アルミニウムの電気伝導率は銅の60%ですが、比重が約3分の1であり、そのため同じ重さの銅に比べて2倍もの電流を通すことが可能」ということからアルミニウム電力ケーブルにて試算することとする。

4. 前提とする電力ケーブルの仕様

住友電工製 600V 単心より合せ形架橋ポリエチレン絶縁 ビニルシースケーブル(アルミ導体)

[記号：600V AL-CVT]

[https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300\(600VALCVT\).pdf](https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300(600VALCVT).pdf)

仕様書に示されているのは地上の三相交流向けのケーブル向け三本の撚り線なので、月面直流送電向けとしてはの重量は仕様書の重量を2/3として二本の依線相当とする

種類と仕様概要

構造表

600V AL-CVT

[https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300\(600VALCVT\).pdf](https://www.hst-cable.co.jp/products/pdf/HST-SS30-2300(600VALCVT).pdf)

公称断面積	導体構成形状	絶縁体外径 mm	絶縁体厚さ mm	シース厚さ mm	シース外径 (約) mm	線心より合せ外径 (約) mm	導体抵抗 (20℃) Ω/km	試験電圧 V/1分	絶縁抵抗 MQ·km	概算質量 kg/km
60	円形圧縮	9.5	1.5	1.5	15.5	34	0.510	2 500	1 500	910
100	円形圧縮	12.1	2.0	1.5	19.5	42	0.306	2 500	1 500	1 400
150	円形圧縮	15.2	2.0	1.6	23	49	0.204	3 000	1 000	2 070
200	円形圧縮	17.0	2.5	1.7	26	55	0.153	3 000	1 500	2 560
250	円形圧縮	19.0	2.5	1.8	28	60	0.123	3 000	1 000	3 170
325	円形圧縮	21.7	2.5	1.9	31	66	0.0951	3 000	900	3 930

↑
試算のケーブルのケース

「導体抵抗」は3本の撚り線の内一本分の抵抗値とする
往復でこの2倍の抵抗を仮定することとする

「概算質量」は3本撚り線の重量なので、直流送電のためには2本で十分なので、2/3と仮定する

5.5 有線による電力伝送方式

<方針>

- ・ 月面上の室内及び近距離の120VDC系の電力システムは、基本的にISSの電力システムにおいて確立した技術を基に実現可能である。
- ・ またNASAの方針としても、Gatewayについては基本的にISSの技術によりNASA、ESA、及びJAXAにて分担して構築するようであり、月面上でも同様とするのがまず第一歩である。
(IAC2023 “Systems and Infrastructures to Implement Sustainable Space Development and Settlement - Systems” のセッションにおいて、D3.2A.1 Gateway at the Crossroads of Sustainable Lunar Exploration by Mrs. Molly Anderson (NASA) United States の講演)

<課題>

- ・ ISS JEMにおける電力システムにおける「電力システム設計基準」等、又はさらにNASAの設計基準や関連する「要求仕様」に基づき、それを月面上の環境に適用するための改良設計の実施という観点にての取組となるが、課題はそれらの「情報」の入手方法である。

まとめ

月面における電力供給システムとしては、「宇宙システムの電源」という観点に加え、「電力グリッドとしてのネットワークシステム」となる。そのためそのベースとなる地上用の電力供給システムの要件に加え、

- ・ 月面の資源が利用できない時点においては地球からの輸送をミニマムにするという観点から、電気的な効率よりも「重量効率」が重要な判断基準となる。
- ・ その観点にて送電においては送電電圧を高くして電流損を減らすことができないため、10km程度を超える距離の送電についてはその「重量効率」の観点から無線による方式が優位となる。
- ・ 蓄電の方式としては同様に「重量効率」観点から水素による燃料電池によるものとなる。(ただし、随所にリチウムイオン等によるバッテリーにより無停電は実現する必要がある)
- ・ 人間の生命維持のために最低3種類の方式の異なる電力供給システムによるネットワークとする必要がある、軌道上での太陽光発電、月面上太陽光発電、燃料電池等を揃える必要がある。(NASAの安全基準に則れば)

等がシステム構築において留意すべきこととなる。



一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構