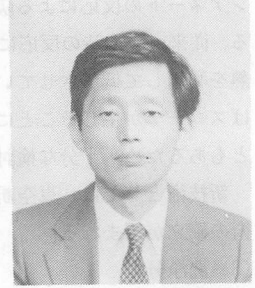


■ 展望・解説 ■

スペーステクノロジー

Space Technology



藤田 康毅*

Yasuki Fujita

1. はじめに

人類最初の人工衛星スプートニク1号の誕生から今年には33年を迎え、宇宙開発も開発期から成熟期を迎えるに到った。この30年の間に宇宙開発は私達の生活の一環を支える技術として発展し、国際電話、テレビ放送、国内衛星通信、衛星放送、気象観測、海洋観測、資源探査など広範囲に利用されている。

これらの宇宙利用は人工衛星を打ち上げて、その軌道高度からの広い地球視野を応用したもので軌道位置利用と呼ばれている。位置利用の主役は地球周辺軌道を廻る人工衛星で、科学観測衛星、技術開発衛星、通信衛星、放送衛星、気象衛星、地球観測衛星、資源探査衛星など既に世界で3800機の人工衛星が打上げられ、利用されてきた。

これらの人工衛星の利用は今後も更に応用分野の拡大とユーザの増加が期待されており、私達の生活に密着した技術として発展して行くことであろう。

スペースシャトルの就航と米国NASAの宇宙ステーション計画の遂行が本格化するに従って、新たな宇宙時代の到来が現実化されてきた。即ち有人宇宙時代の到来である。宇宙開発の初期の段階で米ソは有人宇宙機を軌道に上げて終には月面に人類の足跡を遺してきた。

しかしスペースシャトルと宇宙基地の実現は宇宙利用をより経済的に、より広範囲に拡げることを目指して進める一つのステップであり、更には宇宙を人類の生活の場として考えて行こうと言う大きなシナリオの上に立って進められているものである。

宇宙は無重力、高真空、太陽エネルギーと言う地上では得難い環境を有しており、均一で高純度な薬品、材料、半導体などの製造には非常に適した場所であり、大気層を透さずに星を直接観測できる非常に優れた天

文観測の場所でもある。このような宇宙環境利用は宇宙開発の初期から注目され、米ソで種々の実験が進められてきたがスペースシャトルの就航によってこれが現実化し、更に宇宙基地計画によって定常的な施設として利用できるようになってきた。ここに宇宙環境の利用という新たな道が拓かれることになり、新しい材料工場、薬品工場、半導体工場としての宇宙利用が初まると共に、無重力場を利用して地上では不可能な大スパン建造物の組立基地としての宇宙利用も可能となってきた。

このことは従来の人工衛星利用にも大きな変革をもたらし、大口径アンテナを搭載した宇宙プラットホームの構築など新しい計画が進められることになった。

その一つの構想が太陽光発電衛星であり宇宙で太陽エネルギーを電力に変換し、これをマイクロ波にして地上に送信、地上でこれを受信して電力に変換して利用しようと言うものである。地上のエネルギー源枯渇に対する一つの対応策として注目されている。

宇宙基地の設置は新しい宇宙開拓への出発でもあり、これを基点として新たな月及び惑星基地開拓への扉が開かれようとしている。月面基地から惑星基地へ、米国の新しいフロンティア計画が1986年に発表され、2027年には火星基地の構築を目指して開発が進められることになった。更に昨年はブッシュ大統領が“月に戻ろう”と呼びかけてこれらの計画が本格的に進められることになった。

これらの開発計画は国際的な共同開発を基調にしたものであり、我が国も積極的に計画に参加、推進して行けるよう基礎技術の開発を開始、推進している。

これら一連の宇宙開発計画の中で宇宙システム自体のエネルギーをどうするか、又地球資源枯渇問題に対して非地球資源エネルギーの活用が可能であるかと言うことは宇宙システムを決める重要なファクタであり、本論文ではこの点から宇宙システムとエネルギー供給の関連を主体に宇宙技術の現状と展望を与えている。

* 三菱電機(株)鎌倉製作所宇宙システムグループ参事
〒247 鎌倉市上町屋325

2. 宇宙開発の現状と将来動向

2.1 人工衛星

今迄に打上げられた人工衛星は世界で約3800個、この内2/3がソ連、1/3が米国でその他の国は合せて1/20である。用途別には技術開発・科学分野が75%、通信分野が15%、観測分野が10%になっている。技術開発分野の内米ソの軍用衛星が60%、宇宙科学・技術試験衛星が40%である。即ち従来の人工衛星の開発は米ソの政府出資に負うところが非常に高く、民間出資によるものは20%程度であったと言える。しかしながら最近では通信分野の衛星通信、衛星放送を始めとして衛星を用いた事業が本格化し、観測分野でも衛星の観測データを販売する企業体も出現し、人工衛星も一つの産業の構成品として扱えられるようになってきた。

衛星通信事業では国際通信事業を提供するインテルサット、インマルサット、インタースプートニクの国際通信機構を中心に、新規参入を図るパンナムサット、オリオン、地域通信事業を行なうアラブサット、ユーテルサット、パラパなどの事業体が生れている。

国内衛星通信事業では米国で8社、日本で3社の通信事業体が衛星通信サービスを行ない、カナダ、インドネシア、インド、オーストラリア、ブラジル、イギリス、ドイツ、フランス、イタリア、メキシコでも衛星通信が利用されている。衛星放送に関しても日本、フランス、ドイツ、イギリスで直接衛星放送が実施されており、米国、インドその他では通信衛星を用いたテレビ伝送サービスが実施されている。

移動体通信事業は現在カナダ・米国が共同で事業化を進めており、オーストラリアが移動体衛星通信サービスを始める予定である。日本、ノルウェーでは試験衛星を打上げて移動体通信実験を実施し、実用化へを目指して開発を進めている。

これらの衛星通信事業は事業の継続性と発展性の点から21世紀に向けて更に大きく伸びる分野であり、米国における調査結果では先進諸国における情報通信の多様化と発展途上国に対する通信網の整備の観点から今後2000年迄に300機程度の通信衛星の需要が見込まれている。これらの衛星通信ではサービスの多様化に対するためユーザ間のN対N接続通信網の設置が図られ、小型多数ユーザ局に対応できる大型アンテナ、高出力増幅器を持った大型通信衛星の開発要請が強くなってきている。

衛星観測分野は人工衛星開発の初めから有用性が高

く評価されて気象、陸域・海域観測、資源探査、天体観測などに利用されてきた。特に米国(GOES)日本(GMS)ヨーロッパ(メテオサット)の協力による世界的な気象観測網の整備は気象予報の上で大きな役割を果たしてきた。地表面・海表面の監視に関しても初期の米国ランドサット、シーサット以来、日本の海洋観測衛星、フランスのスポットなど農作物、林業資源、水資源などの監視、水産資源管理、漁海況予測などに使用されてきた。これらの衛星観測システムは全て政府機関によって開発されて来たがシリーズ化、継続化の観点から得られたデータ解析及びユーザへの配布を民間に移行する動きが生じ、併せて観測システム全体を民間事業体で進める動きも生じてきた。衛星観測も観測機器の高解像度、高分解能、多周波数帯観測による観測対象の広範囲化と精度の向上が進められ、現在では可視、赤外、電波を用いて、10~20mの分解能が得られるようになっている。観測データ解析はランドサット以来ブラジル、カナダ、スウェーデン、イタリア、インド、オーストラリア、アルゼンチン、南アフリカ、タイ、中国、インドネシア、日本の15ヶ国で実施し全世界的にデータ収集が図られている。

これら衛星観測に関しては各国が協力して今後更に高精度で大型の観測機器を搭載した衛星開発が進められ、地球環境監視の観点からも強力に進められるものと考えられている。

宇宙科学分野は衛星利用の最も有効な分野で従来の電波、光望遠鏡の観測から直接観測への移行、大気圏外からのX線、紫外、可視、赤外、電波による観測など地球磁気圏構造の解明、太陽系の解明、X線天文学の誕生など宇宙物理学の分野を大きく進歩させる成果が得られてきた。我が国では宇宙科学研究所が中心となって開発を進めており、世界的に見ても注目される成果が得られている。この分野は宇宙利用の一つの大きな分野として人類文化の創造に今後も大きく寄与して行くものである。将来的には超長基線干渉計による星間構造、クェーサの解明、ブラックホールの解明、地球外生物の探査、月、惑星探査など太陽系の誕生、宇宙の誕生の究明に向けて大きく発展して行くと考えられている。

人工衛星は宇宙利用の最も有効な手段の一つとして今後益々発展し、高性能大型化が図られて行くであろう。

2.2 宇宙プラットフォーム

人工衛星の大型化、利用の定常化が進むに従って静

止軌道位置の有効利用、システム構築費用の低減化、宇宙基地の有効利用などの観点から低軌道において大型構造体のプラットフォームを組立て、これを極軌道、静止軌道に軌道間輸送機を用いて運び、これにミッション機器のみを別途打上げてドッキングさせ、大型の観測用プラットフォーム、通信プラットフォームを構築する構想が提案された。プラットフォーム本体は半永久で最低30年寿命のものを作り、ミッション機器は10年間で取り換えることによって各種の新規ミッションのサービスが可能となる。宇宙基地システムの構想の基本はこれらのサービスが可能のように考慮されており、宇宙基地構想が全て構築された場合には十分実現可能な方式である。この概念の利点はプラットフォームの構築を国家機関で実現させておけば各ミッションの企業体の出費が少なくて済むこと。移動体通信、パーソナル通信など大型アンテナ、高出力送信器の必要な場合、観測機器が精度の点から大型化して衛星としてはロケットクリアランス内に収納できない場合など今後の宇宙開発の進展に従ってミッションによっては不可欠な技術となる。但しプラットフォーム自体にも姿勢軌道制御用燃料、太陽電池パドル等に消耗、劣化要素を持っており30年寿命のプラットフォームをどう設計するかが一つの課題となっている。

2.3 宇宙基地

宇宙基地の構築は人類が月・惑星探検に出発する基点として夢に描き続けてきた構想であり、新しい宇宙インフラストラクチャの構築に向けての出発点である。1961年、ポストークに乗ったガガーリンによる人類最初の宇宙飛行以来、米国のマーキュリ、ジェミニ計画の遂行と有人宇宙飛行が勢力的に進められ、ソユーズ、アポロ計画の進行によって宇宙基地実現への基礎的実験がなされた。即ち材料・理化学実験、ランデブ・ドッキング実験、船外活動の実施などである。

1969年にはアームストロング、オールドリン、コリンズのアポロ11号が人類初の月着陸に成功、次いで'73年には最初の宇宙ステーションと云われるスカイラブを打上げ人間の長期宇宙滞在の実証を行った。

スカイラブ、ソユーズによる人間の長期宇宙滞在、材料、理化学実験の成功は宇宙環境利用の新しい道を開き、スペースシャトルの実現に向けて一歩踏み出すことになった。1969年ポストアポロ計画としてニクソン大統領が再使用型有人宇宙機の開発を示唆し、スペースシャトルの検討が開始され、72年には正式に開発が認められた。1981年コロンビア初飛行に成功、新し

い宇宙時代の幕開けとなった。

スペースシャトルは初期計画の段階から宇宙ステーションへの物資、人間の輸送を想定して計画されたものがあってステーションの予算が削除されたためシャトルのみが先行して開発され、システムとして不完全な形で、運用されてきた。米国宇宙ステーション計画の実現化によってシャトルも本格的な運用形態が取り戻されることになる。宇宙ステーション計画は米国が中心となってヨーロッパ、カナダ、日本が参加した国際プロジェクトであり、予算の削減などで計画が遅れ、規模も縮小されることになったが漸く本格的にスタートするまでに進んできた。

第1次、第2次と漸次拡張して行くことで全体のシステム構成を完成させる方法をとっており、第1次計画ではメインフレームと米国モジュール2個、日本、ヨーロッパモジュール各1個で構成され、電力75kw、ドッキングノード4個、マニプレータなどが用意されている。更に軌道上作業機(OMV)、軌道間輸送機(OTV)の運航によって宇宙基地システムとしての機能を十分に発揮できるようになる。

21世紀始めには宇宙基地、宇宙往還機を中心とした宇宙システムが低軌道上に完成し、ここから各衛星及びプラットフォームにサービスが提供される形が整備され、新しい宇宙時代が生れてくるであろう。

2.4 月面・惑星基地

米国大統領の“月に戻ろう”の呼びかけに応じて、米国、日本、ヨーロッパで月面基地の研究が活発になってきた。月面基地計画はフェーズ1～4の4段階方式がとられており、夫々以下のように計画されている。

段階1. 無人探検と基地選定 ('95～2000)

段階2. 短期有人基地建設 (2000～'06)

段階3. 常時拡張型有人基地 (2007～'14)

段階4. 恒久自律運用基地 (2015～'25)

月面基地建設に関しては米国では火星基地建設に対する前哨基地の役割を持たせることを考えており、日本では観測基地、資源開発の拠点として、特にDHe³核融合燃料の採掘を目的として建設しようとしている。

いずれにしても月面基地建設となれば国際協力の上に立って共同で開発を進めることとなる。

惑星探検のための月面基地と云う点から見ても重力が地球の1/6で岩石には酸素が多量に含まれていることを考えれば非常に魅力のある前哨基地であり、月面から火星への米国の考えも非常に有効である。

50年後の世界を考えた場合、宇宙ステーションでは

表1 衛星の種類と役割

種類	特色	用途	衛星例
実用衛星	固定通信衛星	地球上の固定地点間を広域性、同報性、マルチアクセス性を持った通信網で結ぶ。 地球上のサービス域を常に照射できるよう静止軌道に設置し、国内、国際通信に利用。	電話、TV伝送、データ伝送、CATV、ビデオ会議 (国際) INTELSAT-I, II, III, IV, V, VI, VII (国内) ANIK, PALAPA, CS, INSAT, SBS, SATCOM
	移動体通信衛星	地球上の固定地点と移動体間を広域性、マルチアクセス性を持った通信網で結ぶ。 静止軌道に設置し、広域性と移動局の低減化の為、高出力増幅器を使用している。	船舶電話、FAX伝送、船舶位置通報、自動車無線サービス、捜索救助サービス (国際) MARISAT, MARECS, INTELSAT-V MCS (国内) 現在未運用 MSAT, TRUCKSAT, ETS-V
	直接放送衛星	地球上の固定地点から広域受信点に放送を伝送する。一鍵視聴区域の解消。 静止軌道に設置し、受信局の低減化のために高出力増幅器を使用する。	一般テレビ放送、高品位テレビ、映画/スポーツ/教育/音楽等のテレビ放送 BS-1, 2, 3 TV-SAT, EKARAN, UNISAT
衛星	気象観測衛星	静止衛星4個、極軌道衛星2個を組合せて、全地球の気象観測網を設置。 マルチプルスキャンセンサ等の観測器を搭載。	気象現象、海洋現象の監視、気象予報、気象変動監視 TIROS, NIMBUS, NOAA, GOES, SMS, GMS, METEOSAT
	海洋観測衛星	衛星の広域性を利用した波高、海温等の観測。 分解能の点から中高度太陽同期軌道を利用。	水産資源探査、漁海況予報、海難救助 SEASAT, MOS-1, TOPEX, NOSS
衛星	地球資源衛星	衛星の広域性を利用して、地球表面の地形、温度、表面状況等の観測を実施。 分解能の点から低高度太陽同期軌道を利用。	国土、土地利用調査、農林資源管理、鉱物・エネルギー資源探査、水資源管理 LANDSAT, SPOT, ERS-1, RADARSAT
	データ中継衛星	低中高度衛星のデータ伝送、データ中継、追跡管制網を設定する。 複数衛星の同時追尾の為のフェーズドアレイ型アンテナ	中高度衛星のデータ伝送・中継網 TDRS ETS-VI
	測位衛星	複数個の衛星を設置し、同時に4個の衛星を揃えて位置決定を行うシステム。 地球を周期12時間、3軌道、各6衛星で覆う。	移動体測位と航法の最適化、救難活動 TRANSIT, NAVSTAR/GPS
	無人宇宙実験衛星	打上げ後長期間各種実験製造を行い回収。 衛星本体の再使用型、低中高度軌道。	宇宙材料生成、薬品生成、理化学実験 EURECA SFU
技術試験衛星	衛星本体技術の新規開発。 搭載ミッション機器等新規開発技術の宇宙実証。 追跡管制システムの実用化に向けての評価。	衛星技術の確立、宇宙実証技術の実用化、新規技術力の向上 ATS-1~6 ACTS ETS-I~VI	
科学衛星	磁気圏観測衛星	地球周辺空間の直接観測により磁気圏の構成を明確にする。	地球磁場、電離層、バンアレン帯等の解明 SPUTNIK, EXPLORER, しんせい、じきげん
	太陽活動観測衛星	大気圏外からの太陽の直接観測、太陽風観測。 太陽活動と磁気圏との関連の明確化。	太陽活動の明確化 OSO, HEAO, Helios, ひのとり
	月観測衛星	月面の詳細観測及び着陸位置決定。	月基地への出発 LUNA, PIONEER
	惑星探査衛星	太陽系惑星の探査、ハレー彗星の探査。	惑星基地へのデータ収集 PIONEER, VIKING, すいせい
	天文衛星	大気圏外からの恒星の直接観測	太陽系起源の解明 GALILEO, ぎんが
プラットフォーム	ミッション機器の大電力化、大型化に伴って衛星を宇宙で組立て、所定の軌道に設置する方法が検討されている。 一軌道プラットフォーム、静止プラットフォーム。	大型宇宙構造物の構築、組立作業、交換、補給 宇宙インフラストラクチャ	

材料工場、理化学実験所、薬品・半導体工場が並び定期便が運航されており、これを基地として月面基地に資材輸送機と有人宇宙機が発着している。月面基地には常時科学者が滞在し、科学観測、天文観測が続けられており、地上にHe³燃料を運んで核融合炉で地上のエネルギーが賅われている。火星には前哨基地ができ一部の探検隊が滞在し地質構造の解明を続けている。宇宙開発は今第二世代の時代を迎えようとしている。

3. 宇宙用エネルギー供給システム

3.1 太陽光発電

太陽光発電は太陽エネルギーを光電素子で電気エネ

ルギーに変換し発電するシステムで、従来の衛星の電力は殆んどこの方式を採用してきた。システムはエネルギー変換を行なう発電系、日陰時の電力を供給する蓄電系、発電された電力を定電圧に制御し各負荷に供給する電力制御系及び電力分配系で構成されている。

発電系は光電変換用の太陽電池、これを支持するパネル、太陽追尾用の駆動機構、ハーネスなどを含んでいる。太陽電池は発電系の効率を決定する最も重要な要素で太陽光エネルギーのスペクトル分布に対応した半導体の吸収エネルギー比率で変換が決まり、単結晶(Si, GaAs) アモルファスシリコン、多結晶薄膜(CuInSe₂/Cds, CdTe/Cds)などのセルが研究開発

されている。更にAlGaAs/GaAs, InGaP/GaAsの波長に対する応答性の違いを利用しこれをヘテロ接合した高効率セルも研究されている。将来的には複数のセルをタンデムに積層して各セルの波長応答を有効に活用する方法、太陽光を集光して入射エネルギーを増大させセルの使用数を減らす方法などが進むと考えられる。

太陽電池パドルにはリジッド形、セミリジッド形、フレキシブル形、ロールアップ形があり各種ミッションに適したものが採用されている。リジッド形はCFRP/Alハニカムサンドイッチ板、セミリジッド形CFRP格子版フレームにCFRP膜を貼り張力を掛けて剛性を持たせたもの、フレキシブル形はフラットパック方式とロールアップ方式があり、前者はガラス繊維強化カプトン又はカプトン/FEPテフロン膜、後者は未だ宇宙実績はないが地上でのPET, PENフィルムなどが候補と考えられる。

追尾機構に関してはDCブラシレスモータ、DCステップモータなど寿命20年でも十分保証し得る実績を持っている。

これらの太陽電池パドルは宇宙用として比電力 (w/kg) で評価されるが現状では $50w/kg$, NASAを始め21世紀に向けて $100\sim 300w/kg$ を目指す研究開発が進められている。

蓄電系は従来主として電気化学系蓄電システムが使用されてきた。即ちニッケルカドミニウム、ニッケル水素バッテリー及び短期間ミッションでの一次電池としてのアルカリ性燃料電池である。しかし地球周回ミッションでの日陰時間が $0.6\sim 1.2hr$ であるのに対して月面基地などでは $336hr$ と100倍以上になり蓄電システムの根本的な見直し、エネルギー密度の高いバッテリーの開発が要望されるようになった。次世代バッテリーとしては軽量化NiH₂, アルカリ再生型燃料電池, 固体酸化物H₂/O₂電池など種々のものが候補に上っているが現在最も有望なものとしては再生型アルカリ燃料電池で、エネルギー密度 $100\sim 300wh/kg$ が期待されている。

電力制御・分配系に関しては宇宙ステーション用の電力分配系概念であるリング状分配系を基本として電源は120VのDC電源を採用し、居住者が地上で使用する状態を維持するよう考慮している。

3.2 太陽熱発電

ソーラダイナミック発電システムは集光器、エネルギー貯蔵器付受熱器、電力変換ユニット、放熱器で構

成され、米国宇宙ステーション計画で第1次25kW、第2次300kWの電力を供給する予定であった。しかし最近の宇宙ステーション計画ではソーラダイナミック発電を削除している。

集光器は太陽光を集めて受熱器を加熱するオフセットパラボラ反射鏡で、鏡面として六角形パネル配列の切子面形を使用、反射コーティング機に銀又はアルミニウム、保護コーティングにAl₂O₃+SiO_xを使用する。サブストレートとしてはグラファイト/エポキシ表皮、アルミニウムハニカムサンドイッチ板が考えられている。支持構造には六角形パネルトラス展開構造を採用して鏡面の収納性を高めている。

受熱器は円筒形キャビティの周りに熱エネルギー貯蔵用の超合金ヒートパイプを配置し、ヒートパイプによって作動流体に伝達し、流体ループを介してタービンを回転させ発電すると共にポンプで交換器を介して受熱器に戻す。これらの熱機関に関してはブレイトンサイクル、ランキンサイクル、スターリングサイクルの方式が採用され、性能、コスト、寿命、製造性などの点から最適な方法が選択されることになる。

宇宙ステーションの場合には開発実績などからブレイトンサイクルが有力候補として開発が進められた。

パワ変換器は熱から機械的動作を介して電力に変換するものであり多くの分野で広く使われている技術である。宇宙基地ではパーシャルアドミツションアキシシャルインパルスタービン、ピットポンプ、ライスーランドル発電機の組合せが効率の点から選ばれている。

放熱システムは単相ポンプ流体ループ又は可変ヒートパイプが使用され、作動流体として前者はメタノールを後者はアンモニアが考えられており、ラジエータにはアルミニウム、白色ペイントを予定している。

3.3 原子力発電

従来の惑星探査機などに使用された原子力発電はラジオアイソトープ熱電気発電であった。これにはトランシット衛星のSNAP-3, 9, サーベア, ニンバス-III, パイオニアF/G, バイキングのSNAP-19, アポロのSNAP-27, ボイジャのMHWなどが含まれている。これらの発電機は $30\sim 200W$ 程度の低電力のものであり、熱電材料の変換効率 $5\sim 7\%$ から見て大電力の発電機には不向きである。このため米国、ソ連において原子炉熱を利用した熱発電方式の開発が進められた。これには米国のSNAP-2, 8, 10, 50, MPRE SR-100, SP-100, ソ連のROMASKA, TO PAZ, 西独のITR, 仏国のERATOなどが含まれてい

る。特にSNAP-50とSP-100は100KWe以上の発電が可能で今後の宇宙システム用電源として注目される発電方式である。原子炉発電システムは原子炉、一次系、二次系（発電系）、排熱系で構成される。原子炉はピン状被覆管入り高濃縮酸化ウランを燃料とし、リチウム冷却を行って炉心入口温度1030°C、出口温度1100°C、直径400mmの円筒形をなし、蒸発器で二次冷却系のカリウムに伝熱する。熱機関はランキンサイクルを選びカリウムタービン発電機により発電する。

カリウムは凝縮器で液化され、ナトリウムヒートパイプにより放熱板に連結される。ヒートパイプはチタニウム管ウィックで作動流体としてナトリウムを使用し、放熱板にそのまま接続されフィン効率90%以上でカーボン/カーボン放熱フィンから宇宙空間に放熱する。タービン入口温度1040°C、凝縮器温度650°C、放熱板温度630°Cで流体ループは電磁ポンプを使用して循環させる。この系の発電効率としては約16%、遮蔽を含めない系全体の重量は約8トン程度で炉熱出力2MW、発生電力200KW以上を想定している。今後宇宙システム用電源として原子炉発電は月面基地、惑星基地、軌道間輸送機などの電源用に非常に有効なシステムとして期待されている。

3.4 燃料電池

宇宙用電源としての燃料電池の利用は従来有人宇宙機の電源として用いられてきた。即ち米国のマーキュリ、ジェミニ、アポロ、スペースシャトルの電源は全て燃料電池を採用している。これらの用途は数日から最大1カ月の短期ミッションであり、燃料としての酸素/水素が推進系燃料と共用でき、生成物としての水が飲料水に使用できることが採用の理由であった。

この宇宙用燃料電池は純酸素、純水素を反応物質に用いる陽イオン交換膜電解質型とアルカリ水溶液電解質型の二つの方式があり、前者はジェミニ宇宙船に、後者はアポロ、スペースシャトル用に使用している。

アルカリ電解質燃料電池は①燃料 H_2 /アルカリ水溶液/酸化剤 O_2 ②の電解反応の発電部、反応物質供給部、生成水除去部、冷却系などで構成され、シャトルの場合、出力電力2~12kW、電圧27.5~32.5Vdc、重量116kg、最大放出熱7.3kW（12kW）、最小水生成速度1.3g/秒、酸素タンク、容量367kg、重量95kg、水素タンク 容量43.7kg、重量102kgである。将来的にはこれに水分解システムを追加した再生型アルカリ燃料電池の開発が進められており、長期ミッションの宇宙用二次電池として、エネルギー密度の点から有力

な候補と目されている。

固体高分子電解質燃料電池はジェミニ宇宙船に使用され、エネルギー密度が高い利点に拘らず、電流密度が低いことから大容量のものが得られなかった。しかしNASA研究開発、新しい高分子膜の開発などが進められ、ダウケミカル社の膜を用いた燃料電池の開発が進み、カナダバラード社ではセル電圧0.5Vで5A/cm²の燃料電池が開発されるに至った。これらの燃料電池は地上試験の段階でフライト実績はないが今後宇宙用バッテリーへの応用が期待されている。

3.5 マイクロ波伝送発電

1970年代後半、エネルギー危機対策の一つとしてNASAが宇宙太陽発電衛星の概念設計を実施した。この構想は5×10kmの太陽電池パドルで太陽エネルギーを電気エネルギーに変換し、高出力増幅器でマイクロ波をアンテナから送信し、これを地上の10kmφの受信アンテナで受けて直流又は交流電力を得ると言うものである。一つの衛星で5GWの発電を考え世界主要消費都市に受電アンテナを設置して電力を供給する。このためマイクロ波伝送に関する要素技術の研究が全世界において急速に進められた。

計画自体は米国の財政縮少などの影響で取り止めにあったが研究成果はマイクロ波による電力伝送が十分にフィジブルで重要な技術であることの認識を強くさせることになった。その一つの用途に太陽発電衛星からのマイクロ波伝送による宇宙基地、プラットホーム、軌道間輸送機への電力供給、地上の発電システムから航空機、衛星、宇宙基地、プラットホームへの電力供給、発電所から消費地までの電力中継などが考えられている。マイクロ波の伝送効率を使用周波数と送受アンテナの開口径によって決まり、静止軌道から2.45GHzの電波で送信1km、受信10kmのアンテナで98%の効率を得られ、受信レクテナでの受信電力は85%の変換効率で直流電流に変換できる。問題は送電側のマイクロ波への変換効率である。即ち電力からマイクロ波への変換がクライストロンで70%太陽光エネルギー/電気エネルギー変換がGaAsセル25%、熱エネルギー/電気エネルギー変換は熱電気素子10%熱機関30%といづれも系として20%以下でしかない点がマイクロ波伝送発電にとっても効率の点でクリティカルな問題となっている。

将来の宇宙システムのエネルギー供給に関しては種々の方策が検討され、研究されているがまだ十分に有効と云えるものはなく今後の大きな課題である。

4 宇宙ミッションとエネルギー供給システム

宇宙システムは用途に応じて軌道高度、軌道傾斜角が選定される。即ち地球観測には低高度極軌道、気象衛星、通信衛星では静止軌道、理化学実験、材料実験フリーフライヤーでは共軌道などであり、更に月面基地、火星基地、惑星探査など特別な軌道が選定される。

これらの軌道条件に応じて周期、日照/日陰比率が変わってくる。宇宙システムのエネルギー供給系に、これらミッション条件に最適な方式を採用することがシステム設計の一つの大きな課題である。

4.1 人工衛星

衛星は種々の用途に使われているが軌道条件としては高度36000km、赤道上の静止軌道、高度400~800km、傾斜角90°の極軌道、高度400km、傾斜角28.5°の共軌道、高度20000km、傾斜角90°、周期12時間の極軌道が主要なものであり、他は科学衛星などの特殊目的の衛星軌道である。

静止軌道は地球の自転と衛星の公転周期が一致する軌道で地球上からは常に一点に置かれていることになり定点観測、無線中継点として利用できるため、通信衛星、放送衛星、気象衛星、静止プラットフォームなどに利用されている。周期は24時間、最大日陰1.2時間、長寿命7~10年と云うことから太陽電池アレーとNiH₂バッテリーを用いた太陽光発電が利用される。

低高度極軌道は地表面の識別度を上げる為に低高度を、地球全域を観測するために極軌道を、観測データの経時変動を見るために準回帰軌道を選択する。

低軌道衛星では公転周期約1.6hr、最大日陰約0.6hr、寿命2~3年を考慮すれば太陽電池アレーとNiCdバッテリーを用いた太陽光発電が有効である。

共軌道衛星は軌道投入重量最大、スペースシャトル又は宇宙基地とのアクセスが必要なミッションに対して有効である。即ち、理化学・材料実験衛星又はプラットフォームなどである。この場合軌道高度はマイクロGの制約とシャトルアクセスを考慮して500km程度に選定される。この衛星の場合回収を必要とするか否かが重要なファクターとなり、エネルギー供給源としては太陽光発電を使用するが、太陽電池パドルは伸展/収縮可能なロールアップ又はフラットパックのフレキシブルパドルが使用される。

高高度極軌道衛星は地球全域に亘って常に複数個の衛星と通信が可能なシステムを構築する目的で設定されたもので、測位衛星、船舶・航空機通信衛星などに

使用される。高度は12時間周期と云うことから21000km、軌道傾斜角は全域をカバーすることから極軌道を選定する。寿命は7~10年を想定し、18~24個の衛星群でシステムを構成する。衛星の電力は太陽電池アレー、NiH₂バッテリーを使用する。

惑星探査衛星などの特殊な観測衛星は外惑星に関してはラジオアイソトープ電池、内惑星に関しては太陽光発電システムが利用できる。

4.2 宇宙ステーション/プラットフォーム

宇宙基地/プラットフォームは軌道上組立作業が必要なシステムがあり、必要な電力は衛星より1桁大きいものとなる。組立作業のため軌道はシャトルからアクセスできる軌道として高度400~500km、傾斜角28.5°がとられている。電力供給方式は有人と云うことから太陽光発電、太陽熱発電が候補として検討され、現在の米宇宙基地では75kWの電力を太陽電池アレー、NiH₂バッテリーを用いた太陽光発電で賄っている。将来更に大型化する二次計画に対しては従来太陽熱発電が主体となる予定であったが熱発電の長寿命化と信頼性の問題が未だ解決できず光発電方式が今後とも踏襲される可能性が高い。但し二次電池に関しては現状ではNiH₂を使用しているが、再生型アルカリ燃料電池の寿命が保証されるようになればエネルギー密度の点から燃料電池が使用されることになる。

4.3 月面基地/惑星基地

月は地球から距離384Mm、公転/自転周期27.3日の衛星である。月面基地を月の赤道上に設置した場合日照/日陰時間は320/336時間となり地球周回衛星の0.6~1.2hrの日陰時間に対して280倍以上の値となる。月面基地でのエネルギー供給を考える場合、日陰時の供給をどうするかと云う事が第1となる。常時滞在の有人月面基地を考えた場合、必要電力は1MWe位となり衛星の所要電力に較べて100倍となる。しかも月への物資輸送は低軌道への投入重量の1/10程度であり電力密度の高いエネルギー供給システムが絶対的な条件となる。大電力/高電力密度のシステムとしては原子力発電が最適である。但し原子力発電系を建設、テスト運転を行い発電するまでに2週間位必要で短期間で発電できるシステムが必要となる。太陽光発電、燃料電池がこれに使用されることになる。

火星は地球から距離0.524A.U、質量が地球の1/10、自転周期24.6hr、公転周期1.88年、密度が地球の0.76倍で地球に似た惑星である。太陽から遠いことから太陽定数は地球の0.43倍の半分以下となる。

表2 宇宙用エネルギー供給技術の概要と比較

方式	太陽光発電		太陽熱発電	燃料電池	原子力発電		マイクロ伝送発電
	高効率パネル方式	フレキシブルパネル方式			原子炉	ラジオアイソトープ電池	
構成							
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 低電力 (<40KWe) ではエネルギー密度が高い 受動型で信頼度が高い 人工衛星等で最も使用実績が多い 太陽電池セルの改善によって更に高効率化が期待できる 建設が比較的簡単 日陰時のバッテリー運用がクリティカル 大電力では原子力に比してエネルギー密度が低い 	<ul style="list-style-type: none"> 建設が非常に容易 移動可能で日陰時でも発電できる 太陽電池セルの変換効率が低く、大面積が必要 受動型で信頼度が高い 長期運用での放射線劣化が大きい 大電力ではエネルギー密度が低い 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池に比べて変換効率が高いため高電力に適する エネルギー蓄積に蓄熱器が使用でき、バッテリーより軽量化ができる 高温、可動系を有し寿命、信頼性が低くなる 建設が容易で保守点検不要 充放電を兼ねて使用可能 米国有人宇宙船で使用実績多い 	<ul style="list-style-type: none"> NiCd, NiH₂バッテリーに比べてエネルギー密度が高い 生成された水が飲料水として使用できる 生成した水を電気分解して、再生型燃料電池として使用することも可能 H₂O₂を使用しているため電池の劣化モードが少ない 建設が容易で保守点検不要 充放電を兼ねて使用可能 米国有人宇宙船で使用実績多い 	<ul style="list-style-type: none"> 大電力 (>40KWe) ではエネルギー密度が最も高い 大電力がコンパクトな形で得られる為、ラジエータ以外の一体で遠征できる建設が比較的簡単 放射線シールドの必要範囲によっては重量メリットが大幅に低くなる 高温動作の可動部を持ち、信頼性に問題がある 安全性の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 小型で低電力の電源として有効 日陰中、外惑星探査など太陽照射のない又は低いミッションでは唯一の方法しか得られない 小電力 (<200W) のみしか得られない 熱電子物音が低く、大電力には向かない 米国の惑星探査機等での使用実績は多い プルトニウムの放射線汚染が避けられない 	<ul style="list-style-type: none"> 高周波数帯、大型受電アンテナを使用すればRF電力を伝送して、非常に高効率で遠征電力に変換できる 太陽発電衛星を配置してこれからの軌道上、宇宙システムに電力を伝送し、電源とすることが可能である 送電系を地上に設置して軌道上の宇宙システムに電力を供給することもできる
技術状況及び実績	<ul style="list-style-type: none"> 基本的には既存技術に対応できる 電力密度の高いセル及びエネルギー密度の高いバッテリーの開発が進められている 現在まで打上げられた3800機の人工衛星の中の9割以上で実績を持っている 	<ul style="list-style-type: none"> 地上用のものとしては製造されている アモルファス太陽電池の高効率化が進められている 宇宙用としての開発検討が進行中 ロールアップ形太陽電池パドルとしてはNASAスペースシャトルコアプ、フラットパドルがCTS以来、多数の実績 	<ul style="list-style-type: none"> 地上用の反射炉は実現している 宇宙ステーション用の発電システムとして米国で開発中 わが国ではNALが研究開発を進めている 宇宙ステーション第1次では不採用、第2次以降に使用を予定 	<ul style="list-style-type: none"> 米国有人宇宙船としてジュミニ、アポロ、シャトルで一次電源として使用 電気分解を追加した再生型燃料電池の開発中 HOPE用電源としてわが国でも開発を開始した 固体高分子型燃料電池の技術進歩により更にエネルギー密度の向上が期待できる 	<ul style="list-style-type: none"> 溶融金属型原子炉としてはわが国では未開発 米国ではSP-100システムを開発中 ソ連ROMASKA、仏ERATO計画も進行中 	<ul style="list-style-type: none"> 日本では238Puの取り扱いの問題があり未開発 米国ではトランジット、バイオニア/P/G、バイキング火星、LES、8/9、ボイジャー、ガリレオ用を開発中 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽発電衛星のスタディ以来、送電アンテナ、受電アンテナ(レクテナ)の要素技術開発が進められてきた 送電系が地上から宇宙まで達する高出力の増幅器等の開発によってシステム効率が大幅に改善されつつある
用途	人工衛星、プラットホーム、宇宙ステーション、短期月面基地	フリーフライヤー、短期月面基地、長期月面基地	宇宙ステーション、月面基地	宇宙ステーション、月面基地、宇宙輸送機	月面・惑星基地、軌道間輸送機	惑星探査機	軌道間輸送機、太陽発電衛星
技術開発課題	<ul style="list-style-type: none"> 種別高効率GaAsセル H₂O₂再生型燃料電池 	<ul style="list-style-type: none"> a-Si太陽電池の高効率化、信頼性 NiH₂バッテリーの高容量化 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽熱発電システムの開発目標設定及び検討 各構成ハードウェア技術の開発 固体ポリマ燃料電池 	<ul style="list-style-type: none"> HOPE燃料電池の開発推進 再生型燃料電池の開発 固体ポリマ燃料電池 	<ul style="list-style-type: none"> 溶融金属型原子炉 第1次、第2次冷却ループ技術 凝縮器及びラジエータ(ヒートパイプ) 	<ul style="list-style-type: none"> プルトニウムの使用に関する明確な判断 	<ul style="list-style-type: none"> 宇宙用高出力増幅器の効率向上 太陽光/電気変換効率の効率向上

このため火星基地の電力源としては月と同様原子力発電を第1とすべきであり、補助としては燃料電池を考慮するべきであろう。

5. 非地球資源の利用

宇宙開発の将来の目標として人類の地球外移住と自律運用基地の建設及び非地球資源の活用と云うことが課題となっている。非地球資源活用として最も注目を集めたものが太陽発電衛星構想でエネルギーコストの上でも十分に採算の合うシステムであることが積算されている。

月・惑星基地計画の立案によって更に非地球資源活用の道が拓けることになり、月基地での酸素製造、He³の採掘、Fe, Al, Tiなど金属の採掘及び精錬などが候補に上げられている。これらの資材は自律運用基地建設のための材料として使用し、酸素などは月基地を基点として惑星探査に向けての月面打上げロケットの推進剤としても利用することを考えている。月周回基地などへのエネルギー供給も当然月面基地から実施することになる。

惑星探査の進展に従って更に新しい資源活用の道が拓けてくるものと期待されている。

6. むすび

宇宙開発が始って丁度第一世代を終り第二世代が始まろうとしている。第二世代は有人宇宙機、宇宙基地による地球外地域への進出の時代であると云える。この30年の宇宙技術の進歩は正に日進月歩、目を見張るものであったが今後の30年は人類の歴史にとっても非常に大きな足蹟を残すものになるように見られる。即ち2020年にはスペースプレーンが飛び、月基地ができ、火星への探検が進められている時期となろう。この論文では従来の宇宙利用の歩みと今後の発展を全般的に解説、展望し、その中で特にエネルギー供給技術が各ミッションに対してどのように活用されているかを中心に述べた。

宇宙技術の現在及び将来の姿をある程度掴んで頂ければ幸いである。

参考文献

- (1) "OUTLOOK FOR SPACE", NASA SP-386.
- (2) 「宇宙開発の現状と展望」三菱電機技報 (1987)
- (3) 「スペース・テクノロジー」エレクトロニクス(1989年6月)
- (4) "Manned Spacecraft Electrical Power Systems" Proceeding of IEEE, Vol.75, No. 3 1987.
- (5) "Lunar Based Power System" IAF 1986.
- (6) "Advanced Electro Chemical Concepts for NASA Application" 24th IECEC 1989.