

HIGH FRONTIER 4 ALL

APPENDIX

Copyright © 2020, Ion Game Design & Sierra Madre Games

Authors: Phil Eklund

Part of High Frontier 4 All - Core : SMG28-4

EAN: 653341041166

緑文字：2020/5/08 の印刷データからの変更点。

Living Rule & Japanese Version

Original English Book (2021/08/11) →

Japanese Ver. 5.0 (2021/11/27)

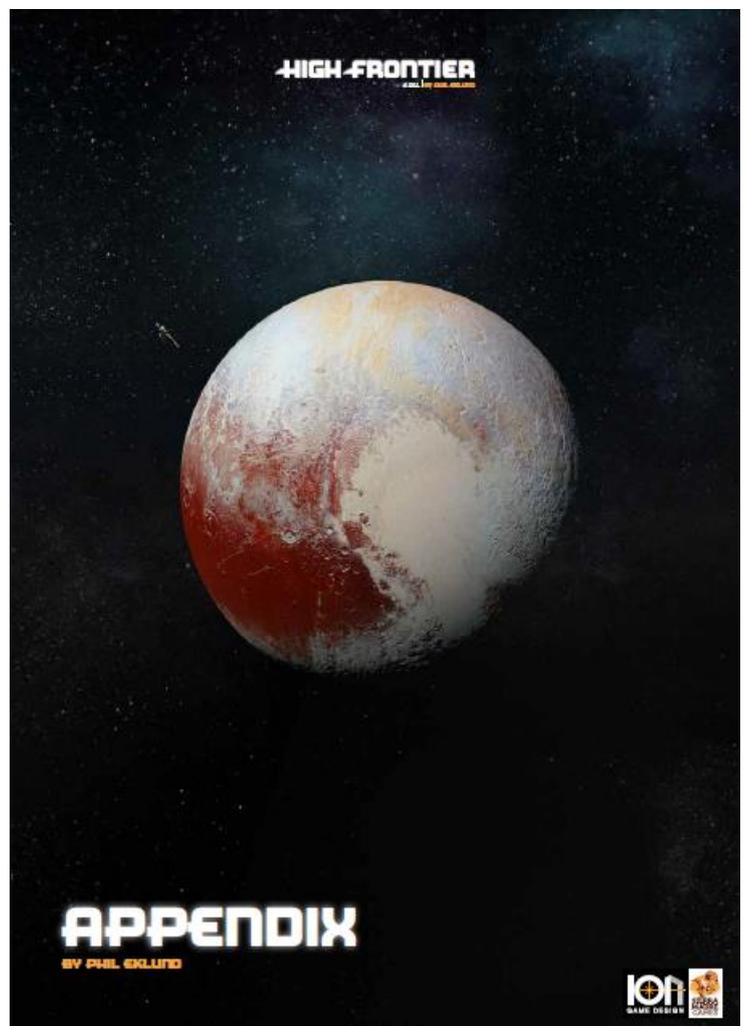
<https://boardgamegeek.com/filepage/211458>

Japanese Translation: NAKAMURA, Masahiro

<https://boardgamegeek.com/user/Sunfish>

<http://yaminabe.air-nifty.com/>

Japanese Rule Playtest: Tokyo SMG Fun Group



目次 Table of Contents

Living Rule & Japanese Version.....	1
V. バリエーションとシナリオ Variants & Scenarios.....	3
V1. クイックスタート Quick Start (by Phil Eklund).....	3
V2. 土星へのレース Race To Saturn (by Phill Eklund).....	3
V3. グランドツアーGrand Tour (by Andy Graham).....	4
V4. 利他主義 Altruism (by Phil Eklund).....	4
V5. ヘルメスの墜落 Hermes Fall (by Phil Eklund).....	5
V6. CEO (by Victor Caminha).....	5
V7. Bios: Earth (by Phil Eklund & Pawel Garycki).....	7
V8. Bios: Venus, Bios: Mars (by Pawel Grycki).....	9
V9. セイレーン The Sirens (by Pawel Graycki and Phil Eklund).....	11
V10. 赤色巨星 Red Giant (by Phil Eklund).....	13
V11. ダイヤモンド Diamonds 4 All (by Jon Manker and Pawel Garycki).....	14
V12. パンスペルミア仮説 Panspermia Scenario (by Pawel Garycki).....	16
W. 戦略ガイド Strategy Guide.....	18
W1. Core Game (by Chad Marlett & Eric Schiedler).....	18
W2. ミッションサイクルの短縮 Reduce Mission Cycle Time (by Eric Schiedler).....	20
W3. よくある質問 Frequently Asked Questions (by Joe Schlimgen).....	21
Y. エッセイ Essay (by Phil Eklund).....	27
Z. パテントカード解説 Patent Card Descriptions (Phil Eklund & Noah Vale).....	30
Z1. クルーカード Crew Cards.....	30
Z2. スラスター・カード Thruster Cards.....	31
Z3. ロボノーツ・カード Robonaut Cards.....	39
Z4. リファイナリー・カード Refinery Cards ※未訳.....	47
Z5. ジェネレーター・カード Generator Cards ※未訳.....	47
Z6. リアクター・カード Reactor Cards ※未訳.....	48
Z7. ラジエーター・カード Radiator Cards ※未訳.....	48

V. バリエントとシナリオ Variants & Scenarios

Copyright c 2019, Ion Game Design & Sierra Madre Games, Publication date: April 2020.

Part of High Frontier 4 All - Core : SMG28-4 EAN: 653341041166

Living Rules update: Apr 25, 2021.

本冊子にはゲームのバリエントと、ソリティア、協力プレイ、ナラティブなどの設定のシナリオが収録されている。各バリエントは共通のフォーマットで記載されている。Core と Module からのすべてのルール変更が記載されている。変更点には各ゲームをプレイする際の初期配置、ルール、ゲーム長さ、勝利条件などの変更が含まれている。

V1. クイックスタート Quick Start (by Phil Eklund)

このバリエントは、ゲームの序盤戦の展開を加速するものである。これは多人数（4人以上）でのプレイ、協力ゲーム、60年以上の長期ゲームをプレイする際に推奨する。

- a. プレイ人数 Number of Players. 2人以上の競技プレイ。
- b. 初期配置 Setup. Core rulebook の C 章と導入した任意の Modules に従い、以下の修正がある：
 - シニアディスク Seniority Disks (C1). 短期ゲームでは 4 枚、中期ゲームでは 5 枚、フューチャー Future を使用する場合は 7 枚のシニアディスクを配置する。
 - 初期アクア starting Aqua (C5). 各プレイヤーとも 0 アクアでゲームを開始する。
- c. 特別ルール Special Rules:
 - 第 1 太陽サイクル Solar Cycle. 最初の 12 年は、オペレーション operation, アクション action, イベントは実施しない。プレイヤーは自身のターンに任意のペナントデッキから一番上のカードを自分のハンド Hand に獲得することのみを実施できる。これで選択されたカードには、ボーナスサポート bonus supports (I2g) は付属しない。この期間中はアカデミアハンド上限 academia hand limit (I2a) は適用されない。この最後の年には、黒点キューブ sunspot cube を移動しない（従ってスタート位置に戻っているはずである）。
 - ボーナ斯拉ウンド Bonus Round. 各プレイヤーが 12 枚のカードを獲得したら、ボーナ斯拉ウンドが実施される。各プレイヤーはカードを任意の順番で何枚でも売却でき、売却されたカードは対応するデッキの底に送られ、このカード毎に 1 アクア Aqua を獲得する。このボーナ斯拉ウンドは、通常のプレイ順に従って実施される。これにより黒点キューブ sunspot cube が移動することはない。
 - コアゲームの開始 Start Core Game. ボーナ斯拉ウンドが完了したら、最初のシニアディスク Seniority Disk を捨札にし、通常のゲームを開始する。このディスクは評議会 assembly (O6) には配置されず、引継ぎ baton pass (O6a)（訳注：O6b の誤記？）も発生しない。
- d. ゲーム終了 Game End. 最後のシニアディスクが除去された時点でゲームは終了となる。
- e. 勝利条件 Victory Conditions. 得点は Core rulebook の M 章に従う。

V2. 土星へのレース Race To Saturn (by Phill Eklund)

世界政府はイノベーション促進のための新技術競争を開催した：土星往還レースである。

- a. プレイ人数 Number of Players. 2人以上の競技プレイ。
- b. 初期配置 Setup. Core rulebook の C 章と導入した任意の Modules に従う。

- c. 特別ルール **Special Rules.** なし。
- d. ゲーム終了 **Game End.** いずれかのプレイヤーがレースに勝利した時点。
- e. 勝利条件 **Victory Conditions.** Core rulebook の M 章は使用しない。クルー **Crew** を最初に Tian に着陸させ、LEO まで帰還させたプレイヤーが勝者となる。

V3. グランドツアー **Grand Tour** (by Andy Graham)

宇宙の探査は経済的な動機ではなかった；これは探検と栄誉の問題である。

- a. プレイ人数 **Number of Players.** 2 人以上の競技プレイ。
- b. 初期配置 **Setup.** Core rulebook の C 章と導入した任意の **Modules** に従い、以下の修正がある：
 - シニアディスク **seniority Disks (C1).** 黒点サイクル **Sunspot Cycle** の中央にシニアディスクを 2 枚配置する。
- c. 特別ルール **Special Rules.** なし。
- d. ゲーム終了 **Game End.** 最後のシニアディスクが除去された時点でゲームは終了となる。
- e. 勝利条件 **Victory Conditions.** 最終集計 **endgame score** では、クレイム **Claim (M2a)** とグローリーチップ **glory chit (M2b)** の勝利得点 **Victory Points** のみ集計する。

V4. 利他主義 **Altruism** (by Phil Eklund)

種の未来のために、一人で進むのか、共に進むのか。

- a. プレイ人数 **Number of Players.** 1 人。または 2 人以上の協力プレイ。
- b. 初期配置 **Setup.** Core rulebook の C 章と導入した 0 以外の任意の **Modules** に従い、以下の修正がある：
 - シニアディスク **Seniority Disks (C1).** 短期ゲームでは 4 枚、中期ゲームでは 5 枚、**フューチャー Future** を使用する場合は 7 枚のシニアディスクを配置する。
 - パテントデッキの初期配置 **Patent Deck Setup (C4).** 通常の方法で各パテントデッキをシャッフルした後、各デッキの下半分（切り上げ）を内容を確認せずにゲームから取り除く。

例：各デッキの初期配置はスラスター 6 枚、ロボノーツ 6 枚、リファイナリー 6 枚、ジェネレーター 8 枚、ラジエーター 6 枚、リアクター 6 枚、GW 級スラスター 3 枚、フレイター 3 枚、バナール 5/6 枚、コロニスト 9 枚となる。

 - 派閥能力 **Faction Privilege (C5).** ソリティアゲームで租税 **Taxes**, 事務総長 **Secretary-General**, 不法行為 **Felonious** の派閥能力 **faction privilege (B6a)** を持つ派閥を選択した場合、初期配置に 6 アクア **Aquas** を追加する (**Module 2** を導入している場合も同様)。
- c. 特別ルール **Special Rules.**
 - リサーチオークション・オペレーション **Reserch Auction Operation (I2).** リサーチオークションに代えて、このオペレーションではひとつのパテントデッキの一番上のカードを、対応するボーナスサポート **bonus supports (I2g)** と共に獲得する。このコストはこれで入手したカードの枚数に等しい値となる。ソリティアゲームでも **アカデミアハンド上限 academia hand limits (I2a)** は適用される。マーケッター **Marketter** の派閥能力を持つ場合は、1 回のリサーチオークションで支払うアクアが 3 枚以上のカードを入手した場合でも最大で 2 アクアとなる。

- d. **ゲーム終了 Game End.** 最後のシニアディスクが除去された時点でゲームは終了となる。
- e. **勝利条件 Victory Conditions.**
 - **ソリティア Solitaire.** プレイヤーの得点が 40VP 以上（短期）、60VP 以上（中期）、100VP 以上（フューチャー）で勝利となる。
 - **協力ゲーム Cooperative.** 各プレイヤーの得点の合計が 30VP 以上（短期）、50VP 以上（中期）、75VP 以上（フューチャー）で勝利となる。

V5. ヘルメスの墜落 Hermes Fall (by Phil Eklund)

地球は小惑星ヘルメス(8:00)の脅威に晒されていた。プレイヤーの使命はヘルメスに到着し、この小惑星を偏向させるために必要なインフラを建設することである—現在の軌道からこれを逸らすためには、この小惑星自体のレゴリスを使用する工場と固定式のダートスラスターが使用できる。” Good luck and godspeed.”（訳注：アポロ 11 号打ち上げ時のコントロールからの激励）

- a. **プレイ人数 Number of Players.** 1 人。
- b. **初期配置 Setup.** **利他主義 Altruism (V4b)** と導入した任意の **Modules** に従い、以下の修正がある：
 - **シニア Seniority (C1).** 黒点サイクル Sunspot Cycle の中央にシニアディスク *Seniority Disks* を 2 枚配置する。
 - **パテントデッキの初期配置 Patent Deck Setup (C4).** **V4b** に従って各パテントデッキを準備する際に、**Mass Driver Thruster** を取り除いておく。その後にスラスター・カード 5 枚のデッキに **Mass Driver** を加えて再度シャッフルする。
 - **派閥能力 Faction Privilege (C5).** **V4b** と **V4c** を参照。
- c. **特別ルール Special Rules.**
 - **リサーチオークション・オペレーション Reserch Auction Operation (I2).** オークションは実施しない。これに代えて **V4c**（の特別ルール）を使用する。
 - **16. Hermes A と B** での探査は、**すべての ISRU のロボノーツ** で自動的に成功となる。
 - **17. Hermes A と B** での工業化には、追加で稼働状態のダートロケット（灰色スラストトライアングル）の破棄 Decommission が必要となる。
- d. **ゲーム終了 Game End.** 最後のシニアディスクが除去された時点でゲームは終了となる。
- e. **勝利条件 Victory Conditions.** ゲームが終了する前に、ヘルメス hermes の両サイトが工業化されている。

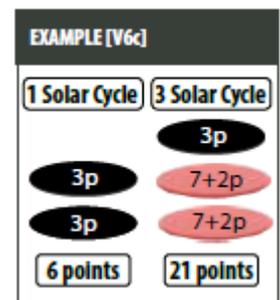
V6. CEO (by Victor Caminha)

12 年ごとに取締役会が開催され、この CEO の業績に基づいて会社の宇宙開発計画の続行の可否が決定される。この CEO があなたである。あなたの会社に利益をもたらしてください。ただし悪評を立てずに、である。

- a. **プレイ人数 Number of Players.** 1 人。
- b. **初期配置 Setup.** Core rulebook の C 章と導入した任意の **Modules** に従い、以下の修正がある：
 - **シニア Seniority (C1).** 短期ゲームでは 4 枚、**フューチャー Future** を使用する場合は 7 枚のシニアディスクを配置する。

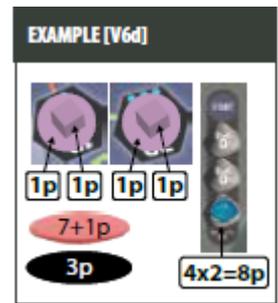
- 派閥能力 **Faction Privilege (C5)**. V4b と V4c を参照。
- c. **特別ルール Special Rules.** このバリエーションでは **Module 1/2** を使用している場合は **フューチャー-Future** も使用できる。また以下の特別ルールを適用する：
- **惨事 Fatality (E7).** クルーCrew またはヒューマンコロニスト Human Colonist が強制的に **破棄 Decommissioned** される毎に、**催告パイル demand pile** に**惨事ディスク fatality disk** (未使用のプレイヤー色を使用する) を 1 枚追加する。
 - **取締役会 Board Meeting.** 黒点サイクルフェーズ **Sunspot Cycle Phase (D2)** に以下のステップを追加する。
 - D2b でシニア境界 **seniority threshold** を通過したが対象のシニアディスクが除去される前に、取締役会にて **KPI** (重要業績評価指標 **Key Performance Indicator**) が満足すべき状態にあるかを確認する。以下の手順で、取締役会の KPI を算定する：
 - I. 催告パイルにシニアディスクが置かれている場合、シニアディスク毎にパイル内のシニアディスク枚数に 7 を足した値となる。したがって、KPI はシニアディスクが 1 枚の場合は 8, 2 枚の場合は 18, 3 枚の場合は 30 となる。
 - II. さらに催告パイル内の惨事ディスク毎に 3 となる。
 - III. KPI はこれらすべてのディスクの値の合計値となる。
 - 催告パイルからすべての惨事ディスクを除去する。
 - 黒点サイクル **Sunspot Cycle** からシニアディスクを 1 枚除去し、これを催告パイルに移す。

例：最初の太陽サイクル **Solar Cycles** が終了しシニアディスクが除去される前の時点で、催告パイルにはシニアディスクは置かれていないが、惨事ディスクが 2 枚存在した。この時点の KPI は 6 である。その後の 36 年目 (3 サイクル) の取締役会の時点では、催告パイルにシニアディスク 2 枚と惨事ディスク 1 枚が置かれていた。今回の取締役会での CEO に対する KPI は 21 となる。



- **リサーチオークション・オペレーション Reserch Auction Operation (I2).** オークションは実施しない。これに代えて V4c (の特別ルール) を使用する。
- 忘れるな：**最初の太陽サイクルでは催告パイルにはディスクが置かれていないと思われるため、通常はプレイヤーが最初に KPI に直面するのは第 2 太陽サイクルからとなる。[V6c]
- d. **ゲーム終了 Game End.** ゲームは以下のいずれかの状態となった時点でゲームは終了となる：
- 最後のシニアディスクが除去された。
 - ある太陽サイクル終了時、取締役会の KPI が満たされていない場合。取締役会で KPI を満足させるためには、それまでのゲームで最低でも KPI の値に等しい勝利得点 **victory points (M2)** を計上している必要がある。

例：催告パイルにはシニアディスク 1 枚と惨事ディスク 1 枚が置かれていた。これまでにプレイヤーは 2 枚のクレーム Claim と 2 個の工場 Factories を集めていた。クレームと工場はそれぞれ勝利得点 1 点の価値を持ち、これらの工場は 3 番目と 4 番目の D 型工場であるため合計で 8 点の価値を持つ。プレイヤーのこれまでの勝利得点は 12VP となり、今回の取締役会の KPI である 11 (7+シニアディスク毎に 1+赤ディスク毎に 3) を達成していた。ゲームは続行となった。



- e. **勝利条件 Victory Conditions.** M2 に従って得点を集計する。
- 30-34: 物議をかもす controversial
 - 35-39: 良好 good
 - 40-59: 記念的 memorable
 - 60+: 伝説的 legendary
- f. **フューチャー使用時の勝利条件 Victory Condition, With Future.** 7 回目の最後の取締役会では、プレイヤーは勝利得点に代えてフューチャーを達成していなければならない。続いてプレイヤーの最終得点 *endgame score* (M2) を計算する。
- 0-77: 物議をかもす controversial
 - 78-94: 良好 good
 - 95-114: 記念的 memorable
 - 115+: 伝説的 legendary

V7. Bios: Earth (by Phil Eklund & Pawel Garycki)

あなたが Bios 三部作 (*Bios:Genesis*、*Bios:Megafauna*、*Bios:Origins*) をそろえている場合、このフルキャンペーンのプレイに続けて、High Frontier 4All をプレイすることができる。生化学的な反応 (バイオント) として始まったプレイヤーは、微生物、肉眼生物、感情とコミュニケーション能力を持つ大型哺乳類へと発達し、最後は意識を持った知性体からそれを超越し、太陽系に定住してさらには近隣恒星系へと旅立ってゆくのである。ここでは最新のゲーム間での特性の変換ルールを収録した。

- a. **プレイ人数 Number of Players.** 1-4 人の競技プレイ。ソリティアの場合は *利他主義 Altruism* (V4) または *CEO* (V6) の設定を使用する。
- b. **初期配置 Setup.** Core rulebook の C 章と導入した任意の *Modules* に従うが、*Bios: Origins* の終了状況により *High Frontier* の初期配置に以下の修正を追加する。以下の手順で実施する (*Bios: Origins* の M 章に代えて適用する) :
- I. **初期派閥 Starting Faction.** *Bios: Origins* での順位に従い、得点の高いプレイヤーから担当する派閥を選択する。プレイヤー毎に、*Bios: Origins* で最も高い得点を得たのが政治 *political* である場合、黄色か紫のいずれかを選択する。文化 *cultural* である場合、白か緑を選択する。産業 *industrial* である場合、赤か灰色を選択する。
 - II. **初期政治 Starting Politics.** 有効理念 *Active Law* は *Bios: Origins* の終了時の哲学 *Philosophy* により決定される：中央またはその隣だった場合は「中道」CENTRIST。右派 (平和主義 *pacifist*, 統一主義 *unity*) だった場合は「統一」UNITY。左派 (不可知論 *agnostic*, 平等主義 *equality*) だった場合は「平等」EQUALITY。解放主義 *abolitionist* か自由主義 *freedom* の場合は「自由」。

- III. **軌道設備 Orbital Capacity.** 海事 maritime 8 を達成していたプレイヤーは、通常の 2 倍のアクア Aquas で開始する。
- IV. **核エネルギー Nuclear Energy.** エネルギー energy 8 を達成していたプレイヤーは、ランダムなスラスタ 1 枚を所持して開始する。
- V. **先導者 Bellwethers.** 通常のプレイヤーは、使用するパテントデッキの数(6-9)に等しいアクアを所持してゲームを開始する。プレイヤーが先導者を所持している場合、1 枚につき 1 アクアを追加する。
- VI. **火星と金星 Mars or Venus.** 火星か金星を舞台にプレイしてきた場合、V8 も参照。
- VII. **居住可能な金星 Habitable Venus (オプション)。** プレイヤーは居住可能な金星のオーバーレーカード(V8b)を使用してプレイすることもできる。
- c. **特別ルール Special Rules.** Bios 三部作 (*Bios:Genesis*、*Bios:Megafauna*、*Bios:Origins*) からのフルキャンペーンをプレイしている場合、以下の追加ルールを適用する：
- I. **初期能力 Starting Privilege.** プレイヤーのクルー Crew は、その種に応じて以下の能力を与えられる：
- アーキタイプ *Archetype*. 追加能力なし。
 - フライヤー *Flyer*. 質量 Mass [0]. (小型化)
 - ブロワー *Brower* とスイマー *Swimer*. ISRU [3] (地衣類) 訳注？
 - アーマー *Armored*. 放射線耐性 Rad-hardness [+2] (外骨格)
- II. **ボーナス Bonuses.** *Bios: Origins* で最大値に到達した技術に応じて、ゲーム開始時に以下の軌道設備やエネルギーのボーナスを獲得する：
- 大地支配 *Footprint*. ランダムなリファイナリー 1 枚を所持してゲーム開始。
 - エネルギー *Energy*. このヒューマン *Human* が記載されていないこのプレイヤーのスラスタのカードは、最低 1 個のバレーナアイコンを持つものとして扱う(H4c)。
 - 冶金学 *Metallurgy*. ランダムなロボーツ 1 枚を所持してゲーム開始。
 - 疫学 *Immunology*. このプレイヤーのクルー Crew とコロニスト *Colonists* は、コロナ質量放出 CMF Flare とベルトロール *Belt Roll* を無視する。
 - 海事 *Maritime*. 追加の初期カードをすべて、ハンド Hand ではなく LEO に配置する。
 - 情報 *Information*. マップ上から任意のグローリーチット 1 枚を獲得。1VP を表にする。
- d. **ゲーム終了 Game End.** 最後のシニアディスクが除去された時点でゲームは終了となる。
- e. **勝利条件 Victory Conditions.** *High Frontier* の得点は M2 に従う。キャンペーン全体の評価には *Bios: Origins* 記載のルールを使用する(C6i)。
- 勝利チット *Victory Chits*. 各個別ゲーム (*Bios:Genesis*、*Bios:Megafauna*、*Bios:Origins*、*High Frontier 4 All*) が終了した時点で、各プレイヤーはそのゲーム内で自分より VP が少ないプレイヤーの人数に等しい枚数の勝利チット (*Bios: Origins* の備品を使用する) を獲得する。最終的な勝者は、このチットが一番多いプレイヤーとなり、同点の場合は共同勝利となる。
- f. **インターステラーとの接続 Continuation into Interstellar (第 3 版)。** ソリティアプレイで、アド・アストラ・フューチャー *ad astra future* (1D1b) を達成していることが必要。

- I. **カードの変換 Card Translation.** プレイヤーは **Interstellar** で使用するために任意のカードを保持しておくことができる。これらは第4版のカードから最も近いカードに変換する。
- II. **アド・アストラ離脱 Ad Astra Exit.** ゲーム内で一度でもアド・アストラ離脱を使用していれば、**Interstellar** の太陽系離脱 **Sol Exit** を使用できる。木製離脱 **Jupiter Exit** を使用した場合、最初のベルトロール **Belt Roll** を推力 0 で実施したのちに、スラスターが稼働状態であれば速度 2 ステップを獲得する。

注意： オールト離脱 **Oort Exit** では 1 ステップ分の恒星間速度を得られる。[V7fii]

- III. **恒星船 Starship.** ソリティアの場合を除き、ランダムに 1 枚選択された紫面 **Purple-Side** の恒星船 **starship** または巣箱船 **beehive** (サイズ 1 の周期彗星 **Synodic Comet** に稼働状態の TW 級スラスターとバナール **Bernal** を設置したもの) でゲームを開始する。
- IV. **フューチャーの報酬 Futures Rewards.** プレイヤーがアド・アストラ離脱を実施する際に、達成済のフューチャー毎にランダムに 1 枚のコロニスト **Colonist** を引く。これに加えて：知性化 **Uplift** = 政治体制をロボット解放 **Robot Emancipation** から開始できる。巣箱船 **Beehive Ark** = 巣箱船クイックスタートを使用する。恒星船 **Starship** (アンモニア **Ammonia** とエンズマン **Enzmann**) = 追加でコロニスト 2 枚、工場 1 個、燃料 10 ステップのいずれかを獲得。軽水素 **Protium** = 軽水素ブレイクスルー **Protium Breakthrough**。スターウィスプ **Star Wisp** = 6 光年以内で無料の探査を 1 回。系外惑星狩り **Exoplanet Hunt** = 無料で探査を 1 回。
- V. **燃料 Fuel.** スペクトル型を問わず、アイソトープ燃料 1 毎に **Interstellar** 燃料 1 ステップに変換する。アクア **Aquas** からは変換できない。
- VI. **初期政治 Starting Politics** はプレイヤー色に対応して以下のように決定される：赤=オレンジ、白=白上段、黄色=白下段、紫=赤、緑=緑下段、灰色=緑上段。クルーの政治特性も同様となる。
- VII. **独立戦争 War of Independence** は **SOS** ウィスプを無効にする。
- VIII. **勝利 Victory.** プレイヤーの達成した勝利段階の **ZPG** を 1 として、この段階に等しい勝利チットを獲得する。レガシースターショット **Legacy Starshots** のバリエーションを使用する場合、次回以降はこの基準値が 1 段階ずつ上昇する。最後のチットはヒューマン **Humans** がマップ外に離脱した場合に与えられる。

V8. Bios: Venus, Bios: Mars (by Pawel Grycki)

あなたは金星や火星の（かつては）豊かな海洋中の原始スープから誕生した。今や金星人もしくは火星人は、自分たちの海洋が干上がる前に太陽系へと進出しようとしていた。本シナリオには **Bios:Genesis**, **Bios:Megafauna**, **Bios:Origins** のキャンペーンゲームから継続するオプションも含まれている。

- a. **プレイ人数 Number of Players.** 1-4 人の競技プレイ。ソリティアの場合は **利他主義 Altruism** (V4) または **CEO** (V6) の設定を使用する。すべてのプレイヤーは同じ惑星の同じ種としてゲームを開始する。
- b. **初期配置 Setup.** Core rulebook の C 章と導入した 0 以外の任意の **Modules** に従うが、以下の変更を適用する：
 - **シニアディスク Seniority Disks (C1).** 短期ゲームでは 4 枚、中期ゲームでは 5 枚、**フューチャー Future** を使用する場合は 7 枚のシニアディスクを配置する。

- **地球/金星オーバーレイカード Earth/Venus Overlay Card** には片面に地球が、反対面に金星が記載されている。地球生物 **Earthlings** が登場しないプレイでは地球面を使用する。金星人 **Venusians** が登場しないゲームでは金星面を使用する。いずれの場合も、このカードをマップ上に直接重ねて、該当の惑星を覆うように配置する。
 - **枯渇状態 Busted.** 金星人に対しては、**Aerostat-Xity** は初期配置の時点で枯渇状態 **Busted (I5a)** とみなされ、ここでグローリーチットを獲得することができない。火星 **Martians** に対しては、火星は枯渇状態とみなされ、これらすべてのサイト **Sites** からグローリーチットを獲得できない。これらの枯渇状態サイトは、特殊能力 **Abilities** を使用した場合でも探査可能には戻せない。
- c. **特別ルール Special Rules.**
- **代用 Ersatz LEO.** 金星人に対しては、LVO があらゆる面で LEO の代わりとなる：アクア **Aqua** の保管(C5), クルー破棄 **Crew Decommission** のロケーション(E7), フリーマーケット **free market** の売却場所(I3), ブースト **boosted** されたカードの目的地(I4), 発射台事故/スペースデブリ **pad explosions/space debris (K2c)**. 火星人にとっては LMO がこれに該当する。
 - **Module 2.** ホームバナー **Home Bernal** は金星オーバーレイカードに記載された 4 か所、または (火星 **Mars** の) **Sol-Mars Lagrange Points (L1,L2,L5)** と火星とその衛星間のラグランジュバーン **Lagrange Burn** でアンカー状態 **Anchored** にできる。Venus/Mars の周囲にはバンアレン帯 **Van Allen Belts (VAB)** が存在しないため、これに関するすべてのルールは無視されることに注意。観光サイクラー **Tourist Cypher** の特殊能力は有効である。また月協定 **moon treaty (2Ba)** は存在しない。
 - **降伏の儀式 Footfall Future と金星の新天地 New Venus Future のフューチャー(Module 1,2).** これらは記述通りに実施されるが、目標が変更される：金星の新天地は地球の新天地 **New Earth** に、降伏の儀式は **Venus/Mars** に対して足を踏み下ろす。
 - **衛星協定 Moonlets Treaty.** **Mars** でゲームを開始する場合、**Phobos** と **Deimos** に対してバナー **Bernal** をアンカー状態とすることはできず、またこれらでグローリーチットを獲得することもできない。
 - **宇宙エレベータ Space Elevator.** マップ上の **Earth** と **Mars** に記載されている宇宙エレベータは、**GEO** ホーム軌道 **Home Orbit** に (**Earth** の場合) または任意の火星のホーム軌道 (**Mars** の場合に) にアンカー状態となっている **GEO Elevator Bernal (2B4i)** でのみ建築できる。
- d. **ゲーム終了 Game End.** 最後のシニアディスクが除去された時点でゲームは終了となる。
- e. **勝利条件 Victory Conditions.** Core rulebook の M2 に従う。Interstellar のオプションを使用する場合は V7 を参照。
- f. **キャンペーン引き継ぎルール Campaign Transition Rules, Bios: Genesis to Bios: Megafauna.** 地球外に起源をもつ肉眼的生物が **Bios: Megafauna** に引き継がれた場合、地球とは異なる惑星でゲームを開始することができる (いずれの場合も K 章と L 章を使用する)。いずれの惑星を選択するかは、その生物のレフュジア **refugium** により決定される：(訳注：該当生物の数で投票決定するという意か?)
- 火星古代海洋 **Mars-Paleo Ocean** = 火星
 - 地球内部生命圏 **Deep Hot Biosphere** = 金星

- 惑星間ダスト Interplanetary Dust = 火星か金星、まだ選択されていない場合は地球（ルールはプレイヤーの選択で K 章か L 章を適用）。
- 同数 Tie = 今回の *Bios: Genesis* の勝者が選択。

推奨： *Bios Megafauna* から *Bios: Origins* に移行しやすいように、レインダンス・スーパーパワー raindance superpower において、ハート上限 heart limit より個体数 population が多いという使用条件を無くすことをお勧めする。[V8f]

g. キャンペーン引き継ぎルール **Campaign Transition Rules, *Bios: Megafauna* to *Bios: Origins*.**

- I. **異星の地形 Alien Terrain.** 火星と金星のクラトンの地形は、以下に従う：
 - **盆地 Basin** は海 sea とみなす。
 - **高地 Highland** は緑植物アーキタイプが存在する場合は湿地 swamp（これを表すため、未使用のプロワー駒を配置する）、他の場合は草原 weeds とみなす。
- II. **気候チットの変換 Climate Chit Transformation.** 火星ソリティア/金星多人数ゲームの各クラトンは以下のように置き換える：
 - **山地 Mountain**（黒ディスク）→オレンジチット
 - **海 Sea**（白ディスク）→青チット
 - **地下茎の森 Tubers Forest**（緑プロワー植物）→緑チット
 - **荒地 Wasteland**（緑クリープルとディスクのいずれも存在しない）→白チット
- III. **異星のアメリカ Alien America.** 火星または金星のクラトンの西側に、アメリカに相当するクラトンとして 2 枚の地球クラトンを追加する。この地球クラトンをプレイヤー人数のスターに応じた気候チットを適用したランダムな地形チットで完全に覆う。

V9. セイレーン The Sirens (by Pawel Graycki and Phil Eklund)

天王星の超臨界ダイヤモンドの海から誕生した炭素系生命体。このセイレーンと呼ばれる知的生命体は、天王星の表面重力は地球とほぼ同じであることから、地球人の液体燃料ブースターとよく似た方式のロケットにより、重力井戸の問題を解決する方法を見出した。¹ 各プレイヤーは地球人の派閥とセイレーンの派閥としてゲームを開始し、セイレーン側は LEO に相当するものとして天王星の衛星のコーディリア Cordelia を使用する。

- a. **プレイ人数 Number of Players.** 1 人以上の競技プレイ。
- b. **初期配置 Setup.** Core rulebook の C 章と導入した 0 以外の任意の Modules に従うが、以下の変更を適用する：
 - **シニア Seniority (C1).** 短期ゲームでは 4 枚、中期ゲームでは 5 枚、**フューチャー Future** を使用する場合は 7 枚のシニアディスクを配置する。
 - **地球人 Earthlings (C4).** プレイヤーは全員が「セイレーン」派閥 Factions となることも、1-2 人のプレイヤーが「地球人」派閥となることもできる。後者の場合、すべてのパテント

¹ 超臨界ダイヤモンド Supercritical Diamonds. あなたはセイレーンたちが歩く世界が 1G の重力にも関わらず、ダイヤモンドが砕けるほどの圧力を受けていることに驚いたのではないだろうか？ 圧力はあなたの頭上にある流体柱の重量の関数であり、表面重力とは異なる。例えばマリアナ海溝では 1,000 気圧の圧力がかかることを思い出してほしい。あるいはタイタンや金星のように、地球よりも表面重力は小さいが、比較的高い気圧を持つ天体を考えてみてほしい。

デッキ（およびコロニストキュー Colonist queue）は、地球人用とセイレーン用に2分割される。トレード *trade*（次項目と特別ルール参照）または交渉 *negotiation* を除き、地球人はセイレーンの各デッキを使用できず、逆もまた同様である。

- **ソリティア Solitaire. CEO (V6)**を使用するが、パテントデッキは上記のように地球人とセイレーンで分割し、セイレーン側がすべての D と V のパテントを、地球人側が残るすべてのパテントを使用する。コロニストキューの残りは、地球人とセイレーンで二分する。

ートレード *Trade*. プレイヤーは天王星系 Uranian System の D か V 型の衛星にヒューマン Human を着陸させている場合、着陸中のスタック内の任意の白面パテントカード1枚を黒面 Black-Side にできる。

ーファーストコンタクト *First Contact*. プレイヤーが最初に天王星の衛星に着陸した際は、該当の太陽サイクル Solar Cycle における取締役会の KPI は自動的に満たされる（セイレーン人たちを発見したのである）。

- **枯渇状態 Busted. Luna, Uranus Aerostat, Cordelia**にはそれぞれ枯渇ディスク Busted Claim disks を配置し、またそれぞれに故郷に対応する種族はこれらのサイトからグローリーチットを獲得できず、特殊能力 Abilities を使用した場合でも探査可能には戻せない。

注意：プレイヤーはセイレーン企業の CEO としてはプレイできない。[V9b]

c. **特別ルール Special Rules.** 以下の特別ルールを適用する：

- **リサーチオークション・オペレーション Research Auction Operation (I2).** あるプレイヤーがその種で唯一のプレイヤーであり、同種のパテントデッキを使用できる唯一のプレイヤーである場合、オークションを実施できない。これに代えて V4c（特別ルール）を使用する。
- **コーディリア Cordelia.** セイレーンにとっては、天王星近傍のこの衛星があらゆる面で LEO の代わりとなる：アクア Aqua の保管(C5), クルー破棄 Crew Decommission のロケーション(E7), フリーマーケット *free market* の売却場所(I3), ブースト boosted されたカードの目的地(I4), 発射台事故/スペースデブリ *pad explosions/space debris* (K2c). このプレイヤーは Cordelia と Uranus Aerostat でグローリー *glory* (L) を獲得できない。
- **ダイヤモンドは永遠ではない Diamonds Aren't Forever.²** セイレーンのクルー Crew とセイレーンのキューから登場したコロニスト Colonists は、放射線耐性が 0 であるとみなされる。セイレーンが含まれるスタック Stack がグリッチ Glitch を受けた場合、対象スタックがサイト Site 上に配置されている場合には影響はないが、宇宙に配置されている場合はスタック内のセイレーンたちは破棄 Decommissioned される。
- **ヒロイズム Heroism (Lc).** 地球人も登場する場合、ヒューマン Humans（訳注：地球人の意味か？）とセイレーンが最初に会ったターン Turn の最後に、該当ターンのプレイヤーはヒロイズムチット *heroism chits* (C7) を一枚獲得する。またこのセイレーンとヒューマンの双方がグローリーを獲得する。
- **技術交換 Technology Trade.** 地球人のプレイヤーは、自派閥のヒューマンがセイレーンと同位置に配置されている自身のターンの最後に、セイレーンのパテントデッキのひとつの

² ダイヤモンド Diamond は炭素の準安定結晶である。ジェームズ・ボンドに反論するわけではないが、指輪に付けられた宝石ダイヤは、最終的に安定状態であるアモルファス・グラファイトに変化するため、黒く変色する。超臨界状態のダイヤモンドの安定性は不明である。超臨界状態のダイヤモンド元素で構成されたセイレーンは、放射線に敏感に反応するのである。

一番上のカードを自身のハンド Hand に獲得できる。同様にセイレーンのプレイヤーも、ヒューマンと同位置に存在していれば、自ターンの最後に同様の行為を実施できる。

- **プロモーションコロニー Promotion Colonies (Module 1,2).** 記載されたドームアイコンに関わりなく、セイレーンのカードはプッシュコロニー *push colonies (2A3a)* またはアンカー状態 *anchored* のプロモート状態バナール *promoted Bernal (2A3c)* でのみプロモートを実施できる（これは彼らの太陽エネルギー需要を満たすため、内惑星系へ進出しなければならないことを反映している）。
 - **セイレーン・バナール Sirenian Bernal.** ホーム軌道 Home Orbit はマップ上に記載されており、いずれのバナールがいずれの軌道を使用することもできる。これらのダートサイド水資源は 6 ではなく、近接状態にある衛星の水資源 Hydration となる。サイクラー・バナールは *Cycler Bernal* は " μ Dust Ring" の放射線ベルト Radiation Belt を安全に通過できる。天王星エレベータ *Uranus Elevator* は任意のホーム軌道にアンカー状態となった *GEO* エレベータ・バナール *Elevator Bernal* で、ロフストーム・ループ・バナール *Lofstrom Loop Bernal* は任意のホーム軌道でのみ建築できる (2B4i)。
 - **降伏の儀式 Footfall Future (1D5f)** は地球と天王星のいずれかを目標に指定でき、これにより地球人またはセイレーンをゲームから除去できる。複数の派閥が生き残った場合、これらは独立戦争 *War of Independence* を継続する。
- d. **ゲーム終了 Game End.** 最後のシニアディスクが除去された時点でゲームは終了となる。
- e. **勝利条件 Victory Conditions.** Core rulebook の M2 に従うが、ボーナス VP (M2b) の例外としてセイレーンのドームはプッシュコロニー *Push Colonies*（セイレーンには太陽エネルギーが貴重なのである）とエアロスタットの場合は +3、その他（バナールを含む）のすべては +1 となる。

V10. 赤色巨星 Red Giant (by Phil Eklund)

長い (!) 暗黒時代を経たのち、地球を拠点とする未来の種族の天文学者たちは、太陽が赤色巨星に膨張するであろうことを発見した。³ この膨張は地球を飲み込み、内惑星系を居住不可能にしてしまうのである。この危機を乗り越えるため、各派閥は今後居住可能となるだろう太陽系外惑星系への植民計画を開始した。

- a. **プレイ人数 Number of Players.** 2 人以上の競技プレイ。
- b. **初期配置 Setup.** Core rulebook の C 章と導入した任意の *Modules* に従う。
- c. **特別ルール Special Rules.** 以下の特別ルールを適用する：
- **乾燥 Desiccation (B7a).** 太陽からの輻射熱により、天王星 *Uranus* と海王星 *Neptune* の各ゾーンのサイトの水資源 Hydration は -1 される（最低値は 0）。
 - **未来太陽の光量 Bright Future Sun (H3c).** 核融合の進行により太陽は輝きを増している。このため各太陽圏 *Heliocentric Zone*（海王星 *Naptune* を含む）における太陽光利用推力修正 *solar thrust modifier* には、それぞれ +2 が加算される。太陽圏によるカードの使用制限は、外側に 2 ゾーン分緩和される。
 - **独立戦争 War of Independence**（用語集参照）が、第 2 太陽サイクル *Solar Cycle* の終了時に勃発する。これは地球政府の崩壊をあらわしている。

³ 赤色巨星 Red Giant. 太陽は今から 50 億年後には赤色巨星へと膨張するだろう。温暖化が進むと、海洋が沸騰して石灰岩や他の炭酸塩に閉じ込められていた炭素が放出され、地球は金星と瓜二つとなるかもしれない。

- d. **ゲーム終了 Game End.** Core rulebook の M1 に従う。
- e. **勝利条件 Victory Condition.** Core rulebook の M1 に従うが、以下の例外がある：
- 天王星圏 Uranus zone 以遠のサイト Sites またはスペース Spaces に存在するものを除き、グローリー glory, トークン Tokens, 時価 stok price, ダートサイド水資源 dirtside hydration から VP を獲得できない。

V11. ダイヤモンド Diamonds 4 All (by Jon Manker and Pawel Garycki)

プレイヤーはロケットの開発に苦勞しながら、工場やコロニーを建設するため太陽系の各地へと進出した。しかしその過程で、ゲームの行方を左右するような、予想外の富に遭遇したのである。

戦略ノート：このゲームはグローリーとディスカバリーチットの獲得により勝敗が決まる。クレイム Claim と工場 Factories は、より遠方に存在するグローリーへとクルーを運び、これを LEO に持ち帰るための手段に過ぎない。ET 生産では、こうした報酬を手に入れるために不可欠な技術を製造できるのを忘れないこと。[V11]

- a. **プレイ人数 Number of Players.** 使用するルールにより、1 人または複数での競技/協力プレイ。
- b. **初期配置 Setup.** Core rulebook の C 章と導入した任意の Modules, およびシナリオに従い（または Race for Glory に従った初期配置を実施する）、以下に従う：
- セイル Sail とロケット Rocket のミッション Mission** を各一枚、各プレイヤーに配布する（ミッション中の水の支払いはアクア Aquas に読み替える）。
 - ディスカバリーチットの配置 Place Discovery Chits** を iC2 に従い内側 5 か所の（Ceres を含む）太陽圏 Heliocentric Zone のサイト Sites に配置するが、各ゾーンへのチット配置方法には以下を追加する：
 - **混合 Mix.** すべてのディスカバリーチットを（スペクトル型 Spectral type を表にして）伏せて混ぜる。
 - **配置 Placement.** すべてのプレイヤーは同時にチットをアイコン（宇宙生物学 Astrobiology, 気圏 Atmospheric, プッシュ Push, 地下海洋 Submarine）の記載されている任意のサイトに配置する。これをシンボルの記載されたサイトがすべて埋まるまで続ける。
 - **片手 Single-Handed.** 各プレイヤーは一度に片手に 1 枚のみチットを掴むことができる。これらは他のチットを掴む前に配置しておかねばならない。
 - **ダークサイト Dark Sites.** すべての D 型チットの配置を終えた後は、M 型と S 型のチットを D 型サイトに配置できる。
- c. **特別ミッションカードの解説 Interpretation of Specific Mission Cards:**
- 赤シャツの消耗品 Red Shirt Expendable:** ハザードロール Hazard Roll に失敗した場合、セイル Sail を破棄 Decommissioned する。（訳注：『スタートレック』のモブキャラを揶揄したスラング）
 - 完璧主義者 Completionist:** Industrial Diamonds (V11f) をプレイしている場合、このミッションの得点は 10VP となる。
 - 緊急事態 Emergency Eminence.** これに代えて、3 ターン連続でエアーター燃料補充 Air-eater Refuel Op を実施する。

- **ダブルメッセンジャー Double Messenger**, **宇宙迷路のエース Space Maze Ace: Industrial Diamonds (V11f)**をプレイしている場合、サイトでの各ディスカバリーロールの結果から2を引く。
- **リング・マイ・ベル Ring my Bell: Saturn と Uranus** の両方でフライバイを実施した最初のプレイヤーになる。
- **困難だからこそ挑戦する We Choose to do It because It is Hard: Module 1** を使用している場合、本ミッションの達成には**いずれかの太陽系離脱航路**を使用した**アド・アストラ・フューチャー ad astra future (1D1b)**の達成が必要となる。(訳注: ケネディの宇宙計画に関する演説より)
- **宇宙のエーギル Aegir in Space:** プレイヤーのロケットが、マップ上で最も多くの燃料ステップを搭載している。**Module 1** を使用している場合、これは**アイソトープ燃料のステップ数**となる。

d. **ゲームのプレイ Gameplay. T.**

- **発見フリーアクション Discovery Free Action.** プレイヤーがディスカバリーチットを回収するためには、該当サイトと同位置 **Colocated** に該当プレイヤーのヒューマンが存在する状態で、発見のフリーアクション **free action (G)**を実施する必要がある。ダイスを1個ロールし、以下の修正を適用する：
 - ✓ 対象サイトに記載されたアイコン (宇宙生物学 **Astrobiology**, 気圏 **Atmospheric**, プッシュ **Push**, 地下海洋 **Submarine**) 毎に[-2]。
 - ✓ 対象サイトに1台以上の稼働状態のバギーが存在する場合[-1]。地下海洋サイトの場合、稼働状態のバギー1台につき[-1]。
 - ✓ 実施する**スタック内に存在するコロニスト Colonist** 毎に[-1]。

結果が0以下であれば対象ディスカバリーチットを獲得し、それ以外はゲームから除去する。

- **ディスカバリーチット**は記載された水滴数に等しい質量 **Mass** を持つものとして、**FTs** 同様にスタックで運ぶことができる。**チットを搭載しているスタックのみが、そのチットを水 FT やアイソトープ燃料に変換して使用できる。**
- **レイガン発見 Raygun Discovery (フリーアクション)**。プレイヤーがディスカバリーチットの配置されたサイトに近接 **Adjacent** する位置に、稼働状態のレイガンを配置している場合、フリーアクションとしてそのチットの内容を確認できる。これは移動中には実施できない。A Stack carrying a chit may expend them, either as water FTs, or (for isotopes with iso-standard) as isotope fuel. • **Raygun Discovery (Free Action).** If you have an operational raygun Adjacent to a Site with a discovery chit, as a free action you may examine it in secret. This is not possible during movement.
- **公開情報 Common Knowledge.** すべてのプレイヤーは、ディスカバリーチットでおおわれているサイトの情報を該当チットの内容を見ずに確認できる。

e. **ゲーム終了 Game End.** Core rulebook M 章と、使用したシナリオ、**モジュール**に従う。

f. **Diamond 4 All** の得点は、Core rulebook M 章と、使用したシナリオ、**モジュール**に従うが、**トークン token VP (M2a)**と**工場時価 factory stock price VP (M2b)**の得点は使用せず、**グローリーチット**の得点は2倍となる。

g. **Industrial Diamonds (Core Game に近いバリエーション)**での得点は、Core rulebook M 章と、使用したシナリオ、**モジュール**に従う。Life Game と Industrial discovery のチットは **LEO か自身のア**

ンカー状態バナール **Anchored Bernal** でのみ得点できる。他のすべてのディスカバリーチットは、地震の任意のスタック内に存在する場合のみ得点できる。

Industrial Diamonds バリエーションでの戦略ノート：ディスカバリーチットはゲームの本題ではなく追加要素であるため、プレイヤーが黒か紫のカード、レイガンとバギー、そしてコロニストが手元にあるときに調査に乗り出せばよい。探査の目標はアイコン多いサイトがお勧めである。初期配置の際には、まずそうしたサイトにチットを配置すること。適切に配置を実施すれば（ダークサイトのルールを忘れないこと）、シンボルのないサイト、例えば **Hermes** や **Ariadne** などのミッションカードに記載されたサイトに2枚（M や S）のチットを配置できる。[V11]

V12. パンスペルミア仮説 **Panspermia Scenario** (by Pawel Garycki)

太陽系内の生命は単一の起源を持ちながらも、様々な天体へと拡散してきた。何らかの未知のゴールドロック原理により、いくつかの生物が同時に意識を発達させ、宇宙へと進出してきた。

戦略ノート：おそらく最もプレイが難しい異星人はニュクレイ **Nuclei** で、太陽系の順行に達するには10回ものバーン **Burns** が必要であり、さらに彼ら好みの周期彗星 **Synodic Comets** に着陸するためには更なるバーンが必要となる。ソリアン **Tholians** はコアルールでは「枯渇しない」はずの大型サイトを枯渇させることができる。これは彼らのトリンを基盤とした生化学活動により、天体表面が汚染されたと解釈すること。[V12]

- a. **プレイ人数 Number of Players.** 2-4人での競技プレイ。以下のリストから2種の種族とその母星と低軌道を選択する。また色とクルーカード **Crew Card** も選択する。本ゲームは種族ごとに2人のプレイヤーが担当することが望ましい。
- b. **地球人の初期配置 Earthling Setup.** V9b 参照。
- c. **火星人の初期配置 Martians Setup.** 地球人(V9b)と同様だが、初期配置と特別ルールに関してはV8を使用する。
- d. **金星人の初期配置 Venusians Setup.** 火星人と同様。
- e. **セイレーンの初期配置 Siren Setup.** V9 参照。
- f. **オセアニアンの初期配置 Oceanian Setup.**
 - 母星はエウロパ **Home World Europa.** Europa の放射線ベルト **Radiation Belt** を低軌道として使用し、**L2/L1 Jovian** の各スペースをバナール **Bernal** 用に使用する。サイクラー軌道 **Cyclor** は木星の放射線ベルトの安全通過地帯とみなす。
 - オセアニアンのクルー **Oceanian Crew** の質量 **Mass** は2で（大型の海棲生物である）、**Geyser** と近接状態にあるサイト **Sites** には必要な正味推力が不足する場合でも着陸できる。
 - **プロモーションコロニーのシンボル Promotion Colony symbols** は、オセアニアンの場合は記載されたドームアイコンに代えて、すべて地下海洋 **Submarine** とエアロスタット **Areostat** であるとみなす。これらは海王星圏 **Neptune Zone** とすべてのエアロスタットのみ使用できる。ダートサイド水資源は地下海洋サイトのもののみカウントするが、それぞれ2を追加する。ホーム軌道水資源 **Home Orbit Hydration** は6となる。
- g. **ソリアンの初期配置 Tholian Setup.**
 - 母星はタイタン **Home World Titan.** LTO を低軌道として使用し、**L1/L5 Saturnian** の各スペースをバナール **Bernal** 用に使用する。サイクラー軌道 **Cyclor** は土星の放射線ベルト

Radiation Belts と、リングの安全通過地帯とみなす。Hyperion に対して *moonlet treaty* (V8c) を適用する。

- ソリアン **Tholian** のクルー **Crew** とコロニスト **Colonist**. 探査において、ソリアンのクルーとコロニストはサイズロール **Size Roll** に代えて「水資源ロール」 **hydration roll** を実施し、対象サイトの水資源以下の結果を得れば成功となる。
- **プロモーションコロニー Promotion Colonies** のアイコンは、記載されたドームアイコンに代えて **気圏 Atmospheric** であるとみなす。希薄な大気を持つ **Triton** と **Pluto** もこれに含まれる。**Sturn** と **Mars** のラボは、エレベータが作られた後でのみ機能する。

h. ニュクレイの初期配置 **Nuclei Setup**.

- **母星はビー・ゼド Home World Bee-Zed**. このバリエーションでは、この小惑星は周期彗星 **Synodic Comet** ではないものとみなされる。この赤色スペースを低軌道として使用し、最初の 6 か所の各バーンを **バナル Bernal** 用に使用する。サイクラー軌道 **Cycler** は木星フライバイの放射線ベルト **Radiation Belts** を使用する。すべてのブーストのコストは半分（切り上げ）となる。
- ニュクレイ **Nuclei** のクルー **Crew** とコロニスト **Colonist** の質量 **Mass** は 0 である。周期彗星におけるニュクレイのクルーとコロニストのサイズロール **Size Roll** は自動成功となる。重力が小さいため、ニュクレイはホーム軌道 **Home Orbit** で工場が存在するかのように 7 ステップ分の工場燃料補充を実施できるが、FT や燃料ステップを **アクア Aquas** に変換することはできない。
- **プロモーションコロニー Promotion Colonies** のアイコンは、記載されたドームアイコンに代えて **宇宙生物学 Astrobiology** であるとみなす。

i. 特別ルール **Special rules**. 本シナリオでは **Siren (V9)** のルールを使用し、以下の修正を適用する：

- **枯渇状態 Busted**. 各種族の母星に指定されたすべてのサイトは枯渇状態となる。該当種族は、自身の母星からは **グローリー** を獲得できない。
- **地球 Earth**. ゲームに地球人が登場しない場合、地球オーバーレイ **Earth overlay (V8b)** を使用する。

j. ゲーム終了 **Game End**. 最後のシニアディスクが除去された時点でゲームは終了となる。

k. 勝利条件 **Victory Conditions**. オセアニアン、ソリアン、ニュクレイの VP は **Sirens (V9e)** の得点に従う。

W. 戦略ガイド Strategy Guide

W1. Core Game (by Chad Marlett & Eric Schiedler)

ルールブックを一読しただけではわからないかもしれない、戦略立案に必要な各種のコンセプト。

- a. **ロボノーツ Robonauts/ISRU.** 多くの場合、プレイヤーの最初のロボノーツがその戦略を左右する。
 - **ミサイルロボノーツ Missile Robonauts** の ISRU は 2 か 3 で、いずれも低効率のスラスタとして機能する。これらは 2 または 3 個の水滴を持つサイズ **Size 3+** のサイトに最適である。多くのクルーのスラスタは Luna に着陸することができるが、その探査に必要な ISRU を備えていない。5-4 スラスタのロボノーツは、Hertha, Lutetia, Eichsfeldia, Minerva を狙うのに適している。
 - **バギーロボノーツ Buggy Robonauts** は孤立したサイズ 1 のサイトには不可欠であり、また Mars や Jupiter のガリレオ衛星のいくつかのような複数のサイトをクレームする際に活用できる。
 - **レイガンロボノーツ Raygun Robonauts** は質量 **Mass** が大きいものの、小惑星族に対する鍵であり、また（大気を持たないサイトであれば）着陸せずに探査 *prospect* が可能である。レイガンロボノーツのひとつは、白カードで唯一の ISRU 値 1 のカードである。
- b. **スラスタ Thrusters.** あなたのロボノーツとサポートが一致するスラスタを入手すること。またあなたが所持しているのがミサイルロボノーツであれば、スラスタは不要であることを忘れずに。2-2 スラスタは間違いなく本ゲーム最高のものである。3-1 と 5-1 はさらに優秀だが、これらのサポート（パルス型ジェネレータと X 型リアクター）は希少である。また 5-1 の放射線耐性が 0 であることも注意である。4-3 のダートロケット **Dirt Rocket** もパルス型ジェネレータを必要とするが、Deimons に到達して燃料を補充するために必要なバーンスペース **Burn Spaces 2** 回分の燃料 **Fuel** さえ確保できれば、ここで一気に燃料を補充し、ほとんどの小型天体に到達できる。0-0 のセイル **Sails** と 3-4 の太陽スラスタは、内惑星系の（Mars のような）サイトに対する序盤のクレーム **Claims** やグローリーには便利だが、ゲーム後半で運用するには限界がある。3-2 と 4-2 の電気ロケットは、サポートが法外に重くなければまずまずのものである。4-3, 5-4, 6-5 は燃料消費が激しいが、ランダーバーン *lander burn* の存在する大型の目標を狙うのであれば有効である。
- c. **リファイナリー Refineries.** 第二段階のミッションでは、あなたのリファイナリーの黒面を試してみしてほしい。ただし C 型のスペクトル型 **Spectral Type** には、リファイナリーが存在しないことに注意。
- d. **クルー Crew.** スラスタを搭載したクルーは、グローリーや序盤の Mars のクレーム—または ISRU1 のロボノーツを伴って Luna へと出発することができる。彼らの ISRU 値はいずれも貧弱であるため、クレームを実施できるサイトは限られている。またプレイヤーは工場 **Factory** でクルーを破棄 **Decommission** してコロニー **Colony** を設立し、勝利得点 **Victory Points** を獲得できる—もちろんクルーを本当の片道切符で送り出せるのはタイコノーツ **Taikonaut** のプレイヤーだけである。クレームジャンプ **Claim Jump (G4)** を実施するためにはタイコノーツがその場に配置されていなければならないが、また他のプレイヤーのクルーはこれを阻止できることに注意。クルーの搭載しているスラスタは、質量 **Mass** が過大な場合はランダーバーン *lander burns* に法外なコストが必要となるため、大型サイトには離着陸できなくなる場合もある。大型のロケットスタック **Rocket Stacks** は、正味推力 *net thrust* に重量級 *weight class* によるペナルティが存在する。

- e. **エアロブレーキ Aerobraking.** エアロブレーキから着陸する場合、そのサイトに対する最低推力は要求されないことを忘れずに。もちろん離陸はまた別のお話である。
- f. **失敗は許されない Failure Is Not an Option.** 多くのゲームがそうであるように、リスクを取らない保守的な戦略より、多少のリスクを伴う戦略のほうが勝利する可能性は高い。とはいえロールで1の目が出る確率は低と思うかもしれないが、そのミッションに多くのものを費やしている場合は、安全策をとるべきである。
- g. **赤シーズンには飛行しない Do Not Fly During Season Red.** ただしサイト Site や惑星の放射線ベルト Radiation Belt に飛び込める場合は除く。
- h. **磁気セイル The Mag Sail** (他のプロモート状態セイルを除く) は放射線ハザードに進入する度に+1のボーナスバーン Bonus Burn を獲得する！これはゲームの終盤には、強力なセイルとなる。これは Mercury にクルー Crew を送り込むには非常に有効である。
- i. **推力修正サポート Thrust Modifying Supports** は、推力を提供しているカードがこれらのサポートを必要としていない場合には適用されない。これにはセイル Sails も含まれる。**動力着陸 powered landing (H6a)**のルールにより、Ceres や Callisto のような遠方の目的地までメインスラスタで巡行し、(例えばクルー Crew のような) より強力なスラスタに切り替えて着陸することができる。
- j. **放射線ベルトのサバイバル Radiation Belt Survival.** あなたが放射線耐性の低いカーゴ Cargo を抱えている場合、高い正味推力(この値がベルトロール Belt Roll から引かれる)でバンアレン帯 Van Allen Belts を通過する必要がある。この方法のひとつが、クルーのスラスタ Crew を使用することである。放射線ベルトの直前のスペースで停止し、次のターンにクルーのスラスタをアクティブ化してベルトに入るのである。バーンに進入しない限り、燃料は消費されないことに注意。これはベルトを安全に通過するために必要な短時間だけ、機関を使用したことをあらわしている。
- k. **LEO から小惑星帯 Asteroid Belt まで2バーン Burns で。** 太陽系の外縁部を目指す NASA のいくつかの探査機(カッシーニ Cassini など)は、地球から目的地とは反対の金星に向けて出発し、金星フライバイのちに地球フライバイを経ている。これをゲーム内で再現すると以下のようなになる：LEO からサイクラー軌道 Cycler と GEO バーンを通過して Venus フライバイに到達する。ここからは惑星間をピンポンするように、ボーナスバーン Bonus Burns を活用して Mercury, Earth, Luna のフライバイを繰り返し、Luna に着陸できるほどのバーンを集めたのちに、小惑星帯に向けて出発するのである。ただしこれには限界もある：Venus フライバイは青シーズンしか利用できず、また多数の太陽のベルトロール Belt Rolls を生き残る必要がある。

Dom の戦略ノート:

- サイズ1のサイトで再ロールが実施できることは、あなたが思っている以上に重要である。
- サイズ3に対する探査の成功率は、あなたの想像以上に低い。
- Jupiter と Saturn は意外に遠くない。(訳注：エアロブレーキとフライバイが利用できる)
- Mars は罠である(通常は)。(訳注：エアロブレーキで降下できるが離陸は困難。価値の低いC型サイトしか存在しない)
- Ceres は罠である(あなたはそう思わないかもしれない)。Hygeia を試せ。(訳注：ランダーバーンの存在しない最大のサイズ)
- C型サイトはゴミである(もちろんそうでない場合もある；価値は相対的である)。

- X型リアクターはゴミであり、Metastable Helium（訳注：高性能(5-1)だが放射線耐性(0)が極端に低いスラスター）はバンアレン帯 Van Allen Belts にヘリウムをまき散らす片道切符だ。
- Luna は China の領土である。（訳注：クレイムジャンプのためのタイコノーツが簡単に送り込まれてくる）
- Venus フライバイは、青サイクルを待てればあなたが思う以上に強力である。
- 「危険」のコンボは一瞬の名声 15 minutes of fame（訳注：Andy Warhol の「未来には、誰でも 15 分間は世界的な有名人になれるだろう」という発言より）につながる。
- 手持ちのカードだけでなく、長期目標に向けて手札を集めろ。
- 新たな長期目標に切り替える心構えを忘れずに。

Victor の戦略：

- 完璧なコンボを待ち続けるな；時間=アクアである。
- 最も有効な黒面 Black-Sides のための工業化を忘れるな。
- C型サイトは教習所のようなものである：確かにゲームチェンジャーとなり得るカード（Venus にも通用する ISRU0 や、Metastable 型スラスターに適合する Ultracold Neutrons 型リアクターなど）もわずかに存在する。しかし C型だけでは遠くへ行くことはできない。
- V型工場は厄介である。ISRU2 のロボノーツがあれば Vesta が狙える。3,4 となればかなりの遠方（Uranus）や、深い重力井戸の底（Callisto, Ganymede, Mercury, Titan）になる。
- S型工場では、Ganymede や Europa に到達するためには、高出力のスラスターと十分な燃料が必要となる。また Karin 族や土星の Dione, トロヤ群の Tethys, (ISRU1 のロボノーツがあれば) Flora や Kleopatra のような乾燥した小惑星で運試しをしてみるのも良いだろう。
- D型工場はこれを必要とするカードも少なく、最も難しい。しかし木星トロヤ群には僅かながら存在するほか、Centaurus や Centaur Comets なども存在する。
- 長期戦を視野に入れた場合、多くのフューチャーの目標が海王星以遠に存在するため、太陽利用 Solar-Power のサポートは避けることが望ましい。

W2. ミッションサイクルの短縮 Reduce Mission Cycle Time (by Eric Schiedler)

私はブーストオペレーションの合間の時間をミッションサイクルと考えている。ブーストを実施したターン毎にインカムで1アクア（もしくはそれ以上の収入を）を得る機会を失ってしまうため、私は1回のミッションを1回のブーストで済ませたいと考えている。また前回のミッションで使用したカードを次のミッションで使用するために破棄することが多いため、この点からもミッションごとのブーストとなる可能性が高いだろう。

1. **ミッションサイクルの短縮。**各ミッションを（その成否にかかわらず）可能な限り速やかに完了させること。これはミッションの内容を問わない。あなたはあるミッションを完了するまで、勝利得点 Victory Points やゲームの後半で役立つ何かを得ることができない。あなたは1つだけのロケットスタック Rocket Stack で、たったひとつのミッションを進めることができる。他のプレイヤーたちは発射台が空いた時から次のミッションを進めている。あなたの決断は、このミッション間のダウンタイムを最小限に抑えることに焦点をあてなければならない。このための重要な方法のひとつは、あなたのロボノーツとリファイナリーの ET 生産 produce (18) において、スペクトル型をそろえておくか、ひとつの衛星内や同じ小惑星族の中のふたつのサイト Sites で生産できるようにしておくことである。

2. **収入源を見つけろ。** *リサーチ Researching (I2)*に続けてカードを売却するのは、効率の良い収入源である。さらに効率が良いのは、*リサーチ*を開催して他のプレイヤーにオークションで落札させることで、こうすれば自分のハンドを増やさず、また後でハンドからカードを処理するためにオペレーションを消費する必要もない。しかし常に高収入が得られるレシピは存在しないので、状況に応じて行動する必要がある。(Jeffrey Chamberlain)
3. **無料のオペレーションを使え。**他のプレイヤーが開催した*リサーチオークション research auction*で購入すれば、オペレーションを使用する必要はなくなる。誰かが自分にパテントカードを売却してくれたのなら、オペレーションを使わずに済んだ。誰かが工場で水を売ってくれたのなら、燃料補充のために何回分かのオペレーションを実施せずに済んだ。重要なミッションサイクルを直接短縮できる、こうした無料のオペレーションの機会を見逃さないこと。
4. **黒面カードの計画を持て。**あなたがひとつかふたつの工場 *Factories* を稼働させ、その工場生産すべき黒カードを把握してそれに応じた計画を立てていれば、あなたは相手を打ち負かすことができるだろう。黒カードは強力だが、座しているだけでは駄目である—これらをどう使うのか、計画しておかねばならない。私が指摘しておきたいのは、重要なのは自分の工場がゲーム終了時に何点の勝利得点 *Victory Point* となるかを心配するより、手持ちの黒カードの使い道を考え、その計画を実行に移す方が重要だということである。最終的な勝利得点の価値は、他のプレイヤーの行動やランダムイベントに大きく依存する。あなたの素晴らしい黒カードを、価値の下がらない宇宙ベンチャーによる確実な勝利得点につなげるのである。
5. **ミッション実現のために破棄を活用しろ。**破棄はフリーアクションであり、またすべての機材を（片道でも往復でも）全行程にわたって抱えてゆく必要もない。質量 *Mass* を減らせるときは減らすのである！質量と燃料は計画的に減らすのだ！複数のスラスターを併用し、質量と燃料を効率的に使おう！スラスターとクルー *Crew* のカードを除く機材は捨ててゆくことができる。これらが手元に戻ってくれば、次のミッションを計画することもできる。
6. **大規模ミッションを計画しながら小規模ミッションを並行しろ。**カード2枚だけのロケットスタック *Rocket Stack* でも何かを成し遂げることができる！効率的なスラスターとクルー *Crew* のカードの組み合わせであれば、*グローリー glory* による得点獲得を試みることができる。これはミッションを立ち上げようとしている場合や、中規模のミッションを計画している場合には必ずしも有効な戦略ではない。しかし例えば土星や木星を目標としたモンスター級のロケットスタックの建造を予定しているのであれば、その間に小規模ミッションを遂行する時間もあるだろう。
7. **手持ちのパテントの使い方を考えろ；特定のカードやミッションに入れ込むな。**すべてのミッションに完璧に適合するカードは存在しない。どのミッションも常に最高の手段ではない。他のカードと組み合わせない限り、最高のカードは生まれえない。一度の調達でゲームのすべてをクリアできるわけではない。宇宙ベンチャーでは複数（または巨大な）のミッションが必要となるので、ゲームの展開に応じてこれらを適宜達成してゆくのである。
8. **取引を恐れるな。**あるターンにもう1回分だけ推力が必要となったことはないだろうか？*ESA* と取引さえすれば、あなたは望むものを手にいれることができる。エキゾチック動力を持つ質量1のロボノーツが必要だ？清水に話を持って行け。彼らは望むものをデータベースに保存してあるはずだ。ソフトウェアのアップデートに資金が必要だ？*NASA* はいつも余剰資金を抱えているようだ。

W3. よくある質問 **Frequently Asked Questions (by Joe Schlimgen)**

訳注：全般に第3版以前の用語が使用されており、該当する場合は適宜最新の用語に置き換えた。

Q1. 工場 Factory を建設する際に、対象サイト Site の記号と一致するスペクトル型が記載されたカードを破棄 Decommission する必要があるか？

A: 工業化 industrialize (I7)のために破棄されるリファイナリーとロボノーツ、およびそれらのサポートのカードに記載されたスペクトル型の種類は問わない。例えば *Rece for Glory* において、M 型サイトで Basalt Fiber Spinning Refinery (S 型) と Kuck Mosquito Robonaut (V 型) を破棄して工場を建設することもできる。しかしこの工場で生産されるカードは、該当サイトのスペクトル型と一致するスペクトル型である必要がある。

Q2. アポロ計画のような月ミッションはどのように実施すればよいか？

A: これは NASA にとってふたつの目的を持ったミッションとなる：将来の工場建設のためのロボノーツを Luna に着陸させる、そしてグローリーのために宇宙飛行士を帰還させること、である。

1 年目：月計画開始 Launch of Lunar Mission. 何年かのリサーチの末に、NASA は 6 アクアを支払って *Re Solar Moth Thruster* (出力 3-4, 質量 Mass=0)、*Free Electron Laser Robonaut* (ISRU=1, 質量 2)、*Marx Capacitor Bank Generator* (質量 1)、*Radioisotope Stirling Generator* (質量 3)。この 2 種のジェネレータにより、ロボノーツにパルス型サポートを提供する (訳注：RSG の出力を MCBG でパルス型変換してロボノーツに供給する)。ブーストされたこれらの機材は、アストロノーツ・クルー (質量 1) と合流する。このプレイヤーはロケット駒 *Rocket Figure* を LEO に配置し、青の乾質量チット *Dry Mass Chit* を 7 のスポットに配置した。彼は 10 アクアを支払い 10FTs 分の燃料 *Fuel* を搭載し、湿質量チット *Wet Mass Chit* を 17 まで移動させた。これでロケットは「タグ級」 *tug class* (-2 重量級修正 *weight class modifeir*) となった。

1 年目 (続き)：月までの移動 Cis-Lunar Move. *Moth* が正味推力 1 でアクティブ化された。ロケットは地球サイクラー軌道 *Earth cycler* への進入で 4 ステップ分の燃料 *Fuel* を使用した。彼は慣性航行でバンアレン帯 *Van Allen Belt* に進むこともできたが、正味推力が低いためロール結果によってはジェネレータ、クルー、レーザーなどが損傷する危険があるため、ここであえて止まった。これで湿質量 13 の「トランスポート級」 *transport class* (-1 重量級修正) となった。

2 年目：月着陸 Lunar Landing. NASA はクルーの液体燃料スラスタ (出力 14-8) をアクティブ化し、重量級により正味推力 *net thrust* は 13 となり、放射線ベルトを安全に通過可能となった。またこれは Luna のサイズ *Size* を上回り、*Shackleton Polar Rim* (水資源 *Hydration*=1) への動力着陸 *powered landing* (H6a) が可能となった。ランダーバーンへの進入コストは 8 ステップ分となり、湿重量チットが乾重量チットの上に置かれて燃料切れとなった。NASA のロボノーツによる探査 *prospecting* (I6) で Luna はクレイムされた (レーザーロボノーツが稼働状態かつ ISRU1 であり、Luna のサイズが大きいため探査は自動的に成功する)。これに加えて、アストロノーツは地球圏 *Earth zone* のグローリーチットを獲得した。

3 年目：ISRU 燃料補充 Refueling. カargo移送フリーアクションにより、スタックは 2 個に分割された：クルーのみのロケットスタックと、スラスタ、ロボノーツ、2 基のジェネレータを含むアウトポストスタック *Outpost Stack #1*。湿質量と乾質量の両チットは、クルーの質量である 1 に移動された。ここで帰還用の燃料を補充するため、1 年を費やしてロボノーツでレゴリスを掘り返して水を絞り出し、湿質量チットを 1 ステップ分進める (1 から 2 へ)。

4 年目：凱旋パレード Ticker Tape Return. ロケットは湿質量 2 の「プローブ級」 *probe class* (+1 重量級修正) となった。クルーの 14-8 スラスタは動力離陸 *powered liftoff* に十分な正味推力 15 で打ち上げられランダーバーンを通過し、慣性航行で放射線ベルトを安全に通過した。ランダーバーンで 8 ステップ分の燃料を消費し、タンク残量は 1/9 となった。これでは *Cycler* のバーンへの進入には不足するため、このクルーはエアロブレーキによる LEO への「ショートカット」を選択

した。パラシュートは安全に開いたものと仮定して、このクルーは LEO へと到達した。端数の燃料は失われた（訳注：端数燃料は破棄せずに次回のために残しておくこともできる）。これによりグローリーチットは 2VP 面へと裏返された。

5 年目：次なるミッション The Next Mission. NASA はリファイナリーを Luna へと届ける次のミッションを計画する。すでに現地に残されている稼働状態のロボノーツと合わせれば、工業化オペレーション *industrialize operation* によりシャクルトンクレーターには S 型工場が建設できる。

Q3: 着陸に燃料が必要ないのは現実的なのか？

A: 動力着陸には常に燃料が必要となるが、小型天体で必要となる燃料は、本ゲームのスケールでは誤差の範囲である。ランダーバーンなしで着陸できる最大のサイズ 5 の小惑星の例として、Psyche の表面重力は 0.06m/s^2 で脱出速度は 0.13km/sec ある。乾質量 Dry Mass=5 で排気速度 4.5km/sec の 10-8 ロケットで Psyche に着陸するために必要な燃料はどれくらいだろうか？ロケット方程式をから求めてみると：湿質量 Wet Mass = 乾質量 $\times e^{(\Delta v / \text{排気速度})} = 5 \times e^{(0.13/4.5)} = 5.15$ となる。従って必要な燃料は $5.15 - 5 = 0.15$ タンクとなる。これは燃料 1 ステップ分よりはるかに少ない値である。

Q4: 太陽オーベルト効果 Solar Oberth とは？

A: フライバイのルールは、重力スリングショットとオーベルト効果 Oberth effect のふたつの効果を近似したものである。（あなたはこれらに関係した狂ったドイツ人科学者たちを愛さねばならない。またこの両効果を解説してくれた、NASA の Nathan Strange 教授とのメールに感謝する）。

フライバイ効果とは、宇宙機と惑星との間の運動量の受け渡しを説明するものである（ゲーム用語では最も有効な用法をあらわしている）。例えば対面する惑星の正面を通過することで、惑星はスピードを上げるとともに、宇宙機は運動量を減らして減速する。この「重力スリングショット」*gravitational slingshot* はロケットの機関に依存しないため、動力がない場合や弾道飛行の場合にも効果がある。またスリングショットに使用される惑星自体の重力場に対しては、このスリングショットが宇宙機を助けることはない点には注意が必要である。地球フライバイの効果は、あなたが地球に捕われることは防げないのである。一般的に太陽を用いたスリングショットは、*Jupiter-Sol-Jupiter Exit* のように太陽系離脱に用いる場合にのみ有効である。

しかしもうひとつの効果であるオーベルト効果は、惑星から離れた場所ではなく、その近傍で推力を使用した場合の乗数効果を説明したものである。これは推進体を排出して破棄するのであれば、高い高度ではなくより低い高度で排出したほうがエネルギー的に有利になることをあらわしている。陸地で例えるのであれば、あなたが登頂しなければならない山の麓にいる場合を考えてほしい。あなたは 1 リットルの水を用意してきた。これは頂上まで運んでから飲むより、旅の前の最低標高地点で飲んでしまい、登る間に汗を流したほうが有効に使えるだろう。

このオーベルト乗数はエネルギー保存則に違反しているわけではない。ロケットが推進体を排出する際に、そのエネルギーの一部はロケットを動かすことに使われるが、残りは推進体を動かすことに使われているのである。（水泳選手も同様の問題を抱えており、彼らは前進のためのエネルギーに匹敵するエネルギーを、水を後方に追いやるために無駄にしているのである。対してジャガーは、簡単に地球との間で直接運動量をやり取りできるのである）ロケットの推力を天体近くで使用すれば、より多くのエネルギーがロケット自体を動かすために使用され、推進体のために「無駄に」使用される割合が少なくなるのである。

オーベルトによるデルタ v の乗数は、1 に脱出速度の 2 倍をデルタ v バーンで割った値を加え、この平方根をとった値に等しい（訳注： $v = \sqrt{(1+(2V_{\text{esc}} / \Delta v))}$ ）。従って高重力天体の近点で高速の化学

ロケットが高推力を発揮するような場合に最も効果的となる。対して最速点で排出する推進剤を増やせない電気ロケットではあまり効果がない。またセイル **Sails** や弾道飛行の宇宙機には効果がない。

マップ上に記載されている太陽オーベルト効果では、これを通過するために5回分のバーンを実施することで、未修正の推力（可能ならアフターバーンの1を加えたもの）に等しいスリングショットを獲得できる。この付近における太陽脱出速度は **68km/sec** であるため、ここでバーンを実施可能な推力 **6** の宇宙機の乗数は **3.4** 倍となる。これはゲーム内では $6 - 2 = 4$ の正味推力が追加されることで近似されている（2回分のバーンは太陽オーベルト地帯の離脱側2回分のバーンで失われる）。

Q5: なぜ惑星は動かないのか？

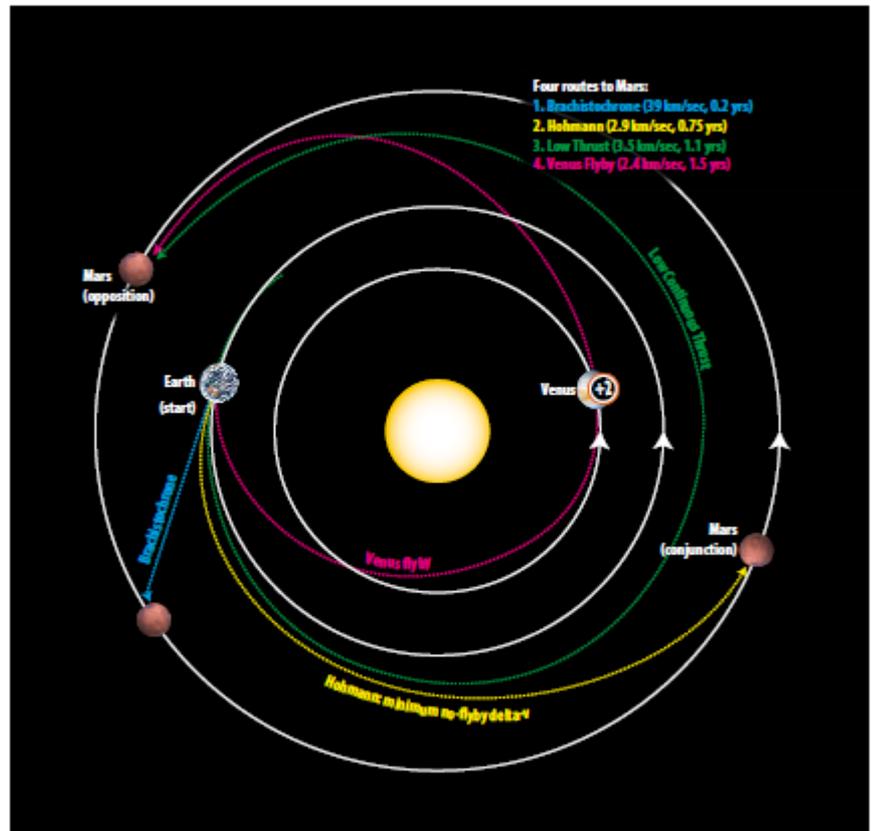
A: この答えのひとつは、本ゲームのマップは太陽を基準とした位置エネルギー地図であり、ほぼ円形の軌道では太陽からの距離のみが重要で、アライメント（軌道上の位置）はほとんど関係がないためである。ゲーム内ではハレー彗星のように高偏心軌道の場合のみ、（ランチウィンドウとして）周期的なアライメントを採用している（訳注：ゲーム上は進入・退出に特定のシーズンが求められることで表現されている）。

もうひとつの理由は、燃料効率の良いロケットの場合（本ゲームで登場するロケットは、ほとんどがこれに該当する）、最良と最悪のアライメントにおける位置エネルギー差は **15%** 以内に収まっていることにある。このような天体のビリヤードが重要になるのは、（NASAの **Dawn** までのすべてのミッションのような）デルタ v が極めて小さく燃料効率の悪いロケットだけなのである。

そして惑星が移動しない最大の理由は、LEO から火星以外のすべての目的地を目指す場合、完璧な位置関係（つまり惑星のアライメント）を待つための待機時間は1年未満であるという事である。水星のような低位置を目標とした場合、惑星のアライメントが最悪の状態からでも水星の半年（44日）を待機するだけで、最良の状態となる。動きの遅い惑星－例えば土星を目指す場合では、実質的にその位置は「固定」されているようなものである（「水星のような」 **mercurial** は「速い」、「土星のような」 **saturnine** は「遅い」を意味している）－もちろん位置関係が最悪の状態にある可能性はあるが、地球の半年を待てば、アライメントは完璧となるのである。（訳注：外惑星は実質的に停止しているため、位置関係は地球の公転軌道上の位置だけに依存し、最悪でも地球の半周を待てば良い。この1年以内のランチウィンドウのタイミングは、1ターン/1年のスケールでは誤差となる）

右図は地球から火星までの4つのルートである。最も短いのは（青色の）**最速降下曲線**

brachistochrone であり、ノズルを太陽に向けてバランスをとるためだけに推力を使用し、一直線に飛行するルートである。これは太陽の重力に逆らいながら、地球の公転速度である **30km/sec** で2か月間一直線に飛行することになる。この太陽に対する「浮上」levitationには、**16km/sec** のデルタ v に加えて、火星軌道で太陽中心円軌道に遷移するための **23km/sec** の急加速が必要となる。次に早いのは、9か月の航行の最初と最後に急加速が必要となるホーマン遷移 Hohmann transfer のルート



である（黄色）。これはまた、太陽以外の重力源を無視できるのであれば、最もデルタ v の低いルートでもある。言い換えれば、エネルギー最小となるルートは、両天体が最も離れている時期に発生するのである。緑色のルートは、前半は加速し、後半で減速する低推力のロケットやセイル向けのルートである。最後のルートは、火星に向かう前にまず内側に向かい、金星の重力アシストを利用するルートである。（訳注：この最後のルートのみ、年単位の地球、金星、火星の位置関係が重要となるため、金星スリングショットにはシーズン制限が課せられている）

Q6: 私は LEO に「工場積載限定」 factory loading only のフレイター-Freighter と自派のクルー-Crew を配置している。クルーがこれに搭乗して、宇宙のアウトポストまで飛行できないのはなぜか？

A: ゲームを簡略化するため、フレイターでは（訳注：燃料の）水を管理しない。しかし「工場積載限定」のフレイターは比推力が **0.19ks** 程度しかないようなローテク（例えば風船を膨らませただけの構造）を使用しており、大量の水推進体が必要となる。これは仮にアウトポストが4バーンの位置に存在するのであれば、このようなバルーン型フレイターには質量 **84** の水が必要となるほどである。水が安価に調達できる工場ではこれも問題にならないが、水需要が切迫している LEO では実質的に運用できないのである。

Q7: なぜエリス Eris が収録されていないのか？

A: 太陽系外縁部は広大な領域であり、そのすべてを再現するにはあまりにも大きすぎる。このためいくつかの代表的な TNO 準惑星ごとに、カイパーベルトを薄くスライスして収録することとなった。エリスを最大とする円盤状の天体群は、傾斜角が非常に大きくほとんどが **50AU** 内には収まらなかった。オーカス Orcus も考慮されたが、冥王星とオーカス周辺天体群は対極の位置にあるため、一方を収録するためもう一方をオミットせざるをえなかった。

2020 年追記。 エリスの軌道は黄道面（ほとんどの惑星が周回する平面）から **44 度** も傾斜しているが、その現在位置は黄道から **10 度** しか離れていない（訳注：公転軌道上で横道面と交差するような位置にある）。しかもエリス（公転周期 **557 年**）の軌道速度は非常にゆっくりとしているため、本ゲームの時間内では静止しているも同然の状態にある。これを反映して、エリスの傾斜した軌道まで

軌道を合わせるための ΔV も無視できる範囲に収まっている。もちろんエリスまでの距離は冥王星までの2倍にも達する。しかし本ゲームの扱う約1世紀の間は、エリスは黄道面付近に留まっているため、天王星や海王星、時期によっては木星の重力アシストにより到達することも不可能ではない。エリスを除外するにあたっては、こうした重力アシストの有効性も考慮されている。将来的なバージョンでは、マップにエリスが収録される可能性もある。

Y. エッセイ Essay (by Phil Eklund)

High Frontier の第 4 版は、40 年にわたるデザインとディペロップの集大成である！ここでは一匹狼のデザイナーである Phil Eklund に、若かりし頃の科学者、エンジニア、そして企業家の男女たちの思い出について語ってもらった。

始まりは原子力 Atomic Origins. 私の父、Melvin Eklund はロケット工学者だった。ロス・アモラス大学で働いていた時、彼は太平洋で原爆による「安定化した雲」にロケットを送り込み、その効果をヘリコプターから目撃した。この放射能が、生まれた私にも影響を与えているのかもしれない。

L5 協会の日々 L5 Society Days. 生まれか育ちか、私は 1978 年にはツーソンにあるアリゾナ大学の航空宇宙工学のナード学生となっていた。先見の明がある Gerard K. O'Neill の *High Frontier* を読んだ後、私は学友の Keith Henson が設立した宇宙活動家グループである L5 協会に参加した。私は *L5 News Magazine* にイラストを描きながら、1980 年には月協定 Moon Treaty が民間の宇宙利用を妨げるという理由から反対運動を展開した。

ロケット・フライト Rocket Flight は、私の初めての「出版された」ゲームであり、1978 年に 12 部ほど作成された。これはプラスチックでカバーされた 2 枚のマップが特徴だった。毎ターン、プレイヤーはこれにグリースペンシルでロケットの位置、高度、ベクトルを記入するのである。ターンは 2 日；1 ヘクスは 100 万キロメートルだった。迎撃には三次元表現が必要だったため、戦闘は非常にトリッキーだった。またベクトル変更が非常に困難だったため、通常は目標と一度しか交差できなかった。デコイは基本戦術だったため、多くのミサイルが偽装された岩塊に向けて浪費された。各ロケットは IFF として「フォワード式質量探知機」Forward Mass Detector を装備していた。この作品は、EMP と X 線スポーリングによる損傷を再現した初めてのゲームだったと思う。

青二才のロケット科学者 Fledgling Rocket Scientist. この翌年、私はヒューズ・エアクラフト社にとって初の大規模な航空宇宙関連事業に着任し、大気圏外キラー衛星をはじめとする様々なスター・ウォーズ計画に携わった。ヒューズ社で一緒に働いていたロケット研究者の中には、von Braun のロケットチームのひとりであり、そこから移籍して Howard Hughes 自身と共同で航空宇宙部門を設立した Hans Mauer 博士の姿もあった。Mauer 博士は、私が 1982 年に論文を発表した触媒核融合推進のような奇想天外なプロジェクトからは距離を置いていた。代わってクリーブランドで開催された Joint Propulsion Conference でスポンサーとなってくれたのは、ミラボー・ライトクラフト (*Pax Transhumanity* のカバーアートに登場している) の発明者であり、レーザービームを動力源とするロケットや航空機の推進者である Leik Myrabo 博士だった。Leik は彼の著書を私に手渡し、私のゲームにもアドバイスをくれたうえに、遠隔動力ロケットのルールの基礎となる研究を教えてくれた。

シエラマドレの誕生 Sierra Madre is Born. 未だ消費者の嗜好やマーケティングに無頓着だった私は、1992 年にアリゾナ州でボードゲーム会社を設立した。私の企業家としてのメンターは Neal Sofge (またの名を *Fat Messiah Games* の Fat Messiah) だった。Neal と私の共通点は、Myrabo 博士を師と仰いでいたことである。Neal は現在 NASA のゴダード宇宙飛行センターで、*High Frontier 4* のミッション・コーディネーターとしてボランティア活動を行っている。

天才 Genius. ヒューズ社のもうひとりの特筆すべきロケット研究者は、スターウィスプ、スペースファウンテン、レーザーセイル、反物質推進、そして前述の質量探知機など、自由な発想の発明家である Robert Forward 博士である。Robert はヒューズ研究所でもう一人の悪名高い天才、Richard Feynman と肩を突き合せていた。Robert は電離層をからどうやってメガワット級レーザーのエネルギーを生み出すかなど、様々な驚異について語っていた。生産的な興奮の熱気の中で、こうしたすべての要素は 1992 年に出版された *Rocket Flight* の第 2 版に盛り込まれた。この版では空間ではなくエネルギーに基づいた最初の「デルタ v」のマップや、排熱に関するルールが導入された。

マップ The Map. 概念の飛躍により、マップは距離（1ヘクス=100万 km）を表すものからエネルギー（1スペース=2.5km/sec）を表すものと変換された。この利点は：各軌道の太陽からの位置エネルギーは固定値であるため、各スペースは安定した軌道を表すものとなった。これにより太陽や惑星の回りにマーカーを移動させる必要がなくなった。これは惑星をビー玉で表し太陽を中心に公転させるというより古典的なマップを推す、ゲームデザイナー仲間である Robert Zubrin（火星協会 Mars Society の創設者である）には不評だった。しかしこの方式は、意外な視点を提示できた。あなたは月の表面に行くより、火星の衛星の表面に行く方が必要なエネルギーが少ないことを知っていたらどうか？火星が月よりも近い、太陽系の地図を描こうと思ったことがあったらどうか？あるいは惑星同士が最も離れているときに最もエネルギー消費の少ないルートが生み出されることをどう表現すれば良いだろうか？

キャンディランド Candyland. 私たちはこの怪物的なゲームを飼いならすために様々なことを試した。息子の Matt とゲームデザイナー仲間の John Douglass 博士の協力を得て、（訳注：マップを埋め尽くす形式の）スペース方式を捨て必要なデルタ v を再現した赤いダイヤモンドを散りばめたルートを配置した。ナビゲーションの助けとして、主要なルートは七色に着色してサインポストを設置した。残念ながらこの変更によりマップは *Candyland*（訳注：双六スタイルのファミリーゲーム）のようになったが、プレイヤーたちには好評だった。結局このダイヤモンドは削除され、代わりに進入にエネルギーを必要とする特定のスペースをピンク色に着色することになった。

フライバイ問題 The Fly -by Problem. 何年もの間、私は周惑星領域と太陽中心領域との間での遷移の表現について悩んでいた。私は JPL（訳注：NASA ジェット推進研究所）の Nathan Strange 博士から、オーベルト効果について教えを受けた。彼によると、惑星フライバイによりその重力によるブーストを受けることができるが、これで得たエネルギーは該惑星の周回軌道に入るためには役に立たない。ここで得られるエネルギーは、太陽との関係でのみ有効となる。この解決策は、フライバイを利用するルートを対象となる周惑星領域のいずれとも交差しないように設置するという方法だった。ルール全体が、マップの幾何学的配置にしたがって書き改められた。*Candyland* のルールが！

ラグランジュの家 Home on Lagrange. 周惑星領域のポケットを除き、太陽系全体は太陽の重力に支配されている。しかし各所にこの重力が相殺される中立点が存在している。これらが有名な「ラグランジュ点」Lagrange points である（L5 協会はラグランジュ点の L5 にちなんで命名された）。アリゾナ大学で宇宙物理学を専攻していた時、私はカッシーニ計画に参加していた LPL（アリゾナ大学の月惑星研究所 Lunar and Planetary Laboratory）のプログラマーと知り合った。ここで彼らのプログラムやポークチョップを見せてもらい、ミッションではどうやってこうしたポイントを狙い撃つのかを解説してもらうことができた。これらの領域では太陽の重力がキャンセルされているため、新たな軌道に自由にジャンプできるのである。*Candyland* のマップには、様々な他の軌道への乗り換えや軌道同士の交差点として、このようなラグランジュ点を簡単に反映させることができた。

時間 Time. エネルギー地図は燃料の消費量を正確に扱うことができたが、時間はまた別の問題だった。何年もの改変の末、私はルート上に「ラグ」lags を反映させるマークを追加し、ミッションが現実的な年数を要するように調整した。その後この概念は、交差点で針路を変更する際に余分なエネルギー（と推進体）を消費するという形に単純化された。しかしラグランジュ点においては、宇宙機は時間的にもエネルギー的にもコストを費やさずに、針路を変更することができるのである。

水資源 Hydration. 水は太陽系の鍵である！当然ながら水は様々な生命活動にとっても不可欠なものが、ロケットの推進体としての有用性に比べればバケツの中の一滴である。幸運にも私のキャンプ仲間である Jonathan Lunie 博士（現在はコーネル大学に在籍）は、太陽系のあらゆる場所に水が存在することを示した論文を発表したばかりであり、これが本ゲームの水資源システムの基礎となった。Jonathan はその後、2冊の教科書を出版した（私も編集とイラストを担当した）：*Earth, Evolution*

of a Habitable Planet (訳注: *Earth: Evolution of a Habitable World*, 1999 の誤記か?) と *Xenobiology*.

アウターワールド The Outer Worlds. 宇宙は危険である。私のもう一人のキャンプ仲間である Carolyn Porco は、カッシーニ計画のミッション・ディレクターだった。彼女のチームが土星周辺で新たな衛星や放射線流を発見するたびに、ゲームマップはより複雑さを増してきた。Carlyn と Jonathan はキャンプファイアーを囲んで、次の外惑星系探査の資金を得るべき目標 (木星の衛星群か? エンケラドゥスか? タイタンか?) について、よく口論していた。私がゲームマップ上のどのサイトを「科学的に価値のある」場所として指定するかについて、彼らの意見は当然ながら対立していた。Carolyn は地下海洋と生命の可能性が高いエンケラドゥスを支持していた。Jonathan は彼の構想する気球によるタイタン観測は、必要な資金に対して多くの科学的成果が得られると主張した。

放射線耐性 Rad-Hardness. Carolyn と Jonathn のいずれも、地下海洋が存在する可能性が高いもうひとつの天体であるエウロパについては、木星の (太陽系で最も強力な) 放射線に曝されることから探査には反対であることに同意していた。私は Raytheon 社と共同で仕事をしていた件で、宇宙機における放射線保護については精通していた。この経験から、木星の放射線帯から電子機器を保護するには重く、コストが嵩み、リスクも高くなることを承知していた。こうした議論から、放射線保護の要素は本ゲームにおける「防御力」defence factor へと発展した。

宇宙の政治体制 A Regime in Space. 私は政治がフロンティアの開発に与える影響について、幅広く調査してきた (この件については *Pax Porfiriana* のデザイナーズノートを参照してほしい)。最先端の開発を進める鍵は、革新者たちが自分たちの努力からどれだけ自由に利益を得ることができるかにかかっている。High Frontier における政策評議会は、旧来の左右の一次元的な極性を二次元的に拡張したノーラン図に基づいている。

最初はどこへ? Where First? 私のゲームは、人類が初めて地球を飛び出す手段と理由を示している。しかし最初にどこに行くべきだろうか? 私はこの問題について、月協会の Avery Davis と火星協会の Robert Zubrin というふたりの活動家と出会ったが、意見は対立していた。最終的に私は Robert の立場に賛成した; 鍵となったのは水である。小惑星や月にも水は存在するが、火星のほうが簡単に水を確保することができる。この水を抽出する技術の必要性から、ISRU (現地資源活用 in-situ resource utilization) という画期的なゲームコンセプトが生み出された。ISRU、すなわち「地球を離れて生活する」living off the land という概念は、Zubrin の「マーズ・ダイレクト」Mars Direct で提唱されたものである。Zubrin 博士はまた、ゲームに登場する 2 種類のスラスター、Zubrin Salt-Water Drive と Mini-magnetosphere Drive の発明者でもある。

熱力学ロケット Thermodynamic Rocket は、熱エネルギーを生み出す燃料と、そのエネルギーを水力に変換するためのノズルを持つロケットである。High Frontier における新機軸は、熱力学ロケットをふたつの要素に分割したことである: リアクター (動力を生み出す) とスラスター/ノズル (生み出された動力を一定の方向に指向させる)。ゲームの初期バージョンからスラスターとリアクターが存在していたが、その出力と構造による分類はあまり厳密なものではなかった。電気ロケットは推進体の温度は何百万度にも達するが、ロケットのコンポーネント自体は室温を超えるような温度には達しないのに対して、熱力学ロケットは燃料効率を高めるため非常に高温で動作する。結局のところ温度とは分子の運動速度を表したものであり、この分子を可能な限り高速で排出することで、排出される分子の量を節約することができるのである。

Phil Eklund, Sierra Madre Games, July 2015 (updated 2019).

Z. パテントカード解説 Patent Card Descriptions (Phil Eklund & Noah Vale)

温度 Temperatures はケルビン Kelvi (K)度で記載されている (0K が絶対零度、375K で水が沸騰する温度である)。K 度を C 度に変換する場合は 273 を引くこと。プラズマ温度はキロ電子ボルト(keV)で記載されている。keV を K 度に変換する場合は 11,604,000 倍する。

量子力学 Quantum Mechanics は極めて現実的かつ予測的に自然法則を表しているが、客観的に世界を表現するための手段である物理学の性質についての間違った前提により、一般には大きな誤解を受けている。それは量子力学が、宇宙が極小領域では異なる法則のもとで動いていることや、因果律と客観的現実が幻想であることを「証明」するものだという神話である。すべての観測は、観測対象もしくは観測機材についての知見をもたらしてくれる。望遠鏡で星を眺めた場合、観測された色収差はその星の特徴なのだろうか、それともレンズの特徴なのだろうか？再現可能な量子効果を観測した場合、それは間違いなく客観的な現実についての知見を得たことになる。しかし我々は広大な世界における特性を観察したのだろうか？我々が観測したのは量子や意識上の特性なのではないか？私は後者だと考えている。観測された光子は粒子なのか波なのか？それは上側のスリットを通過したのか？それとも下側のスリットを通過したのか？猫は生きているのか死んでいるのか？量子もつれ、ハイゼンベルグの不確定性、遠隔作用など、これらはすべて、私たちの意識とそのデータ圧縮の方法論に関わる事実を教示するものである。量子効果は人間の観測者が存在する場合にのみ発生し、観測者が存在しない場合には存在しないのはなぜだろうか？量子コンピュータ、量子タイムマシン、量子リアクター、量子もつれ、量子トランスポータなどの量子デバイスは、なぜプロトタイプの段階に到達しないのだろうか？こうした理由から、私は本ゲームでは量子技術の使用を避けている。

Z1. クルーカード Crew Cards

クルーカード Crew Card – これはパテントカードではないが、各プレイヤーの初期配置クルーは、6人の宇宙飛行士のための消耗品と生命維持装置をあらわしている。彼らはベクトラン Vectran (「防弾」繊維) で作られた 16 トンのビゲロー式 Bigelow の膨張型居住モジュール(1,760m³)に收容されている。45メートルの間隔で設置された一対のモジュールは、0.6Gの人工重力を生み出すために 5RPM で回転されている。食料と空気の清浄化は、土壌を使用せず定期的に根に霧状の栄養分を噴霧されることで成長する植物により供給されている。このような区画 25m 分、年間のすべての食料が供給されるのである。植物からの蒸散で発生する排熱のため、低温のラジエーターが必要となる。また 10 トンの生命維持モジュールのために 12kWe が、通信用の Ka バンドのアンテナのために 0.2Mwe が必要となる。こうしたハブユニットの周囲には、ほとんどの宇宙放射線を防ぐ高電位(10GeV)の荷電プラズマが展開されている。荷電粒子がこの磁場を通過する際には、そのコースは居住者を避けるように湾曲されるのである。しかし太陽嵐が発生した場合には、クルーたちは小型(直径 8m)のストームシェルターに退避する必要がある。このシェルターは 100kg/m²のポリエチレン(厚さ 12cm)と、黒鉛と推進体の水により遮蔽されている。

化学スラスタ Chemical Thrusters – ほとんどのクルーカードには、液体燃料または固体燃料の化学スラスタが搭載されている。この液体燃料スラスタは、極低温燃料である水素と酸素を比推力 0.53ks (本ゲームの燃費 8 に相当) で燃焼させるものである。これにより生み出された水は、ドラバル・ノズルと呼ばれる収束発散管を通じて排気される。例として、スペースシャトルのメインエンジン(SSME)は、比推力 0.46ks, ノズル面積比 180:1, 液体水素再生冷却、混合比 5.4, チャンバー圧力 2.8MPa, 熱効率 98%, フロウズンフロー効率 55%, 出力 2GWth, 推力 440kN (ゲーム上では推力 10)、初期



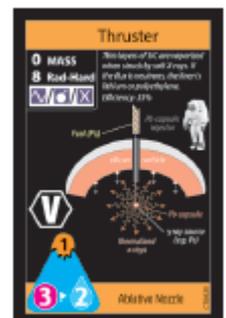
推力重量比 1G という諸元となる。ゲーム内ではダートスラスターとして扱われている固体燃料スラスターは、比推力ははるかに低い 0.1~0.3ks 程度の値である。 - *Space Transportation Systems*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, 1978.

22. スラスター・カード Thruster Cards

ロケット式のスラスターは、ある方向に質量を投射することで反対方向に加速するデバイスである。セイル式のスラスターもこの作用反作用の原理を利用して加速するが、こちらは内部質量ではなく周辺の質量を利用するものである。推力の値は kN (キロニュートン、約 100kg) で測定される。スラスターの燃費は比推力(Isp)、単位は ks (キロ秒) で測定される。比推力が何をあらわしているかについては、ここで繰り返すことはしないが、4 をこの値(ks)で割るとゲーム上の燃費値が求められる。さらにこの値(ks)に 10 を掛けると、その排気速度 (推進体がノズルから放出される速度) が求められる。ロケットの排気速度(V_e)と推進剤の流量(kg/sec)の積(km/秒)は、推力(kN)に等しい値となる。 V_e はまたロケット方程式でも使用される： Δv (km/sec) = $V_e \times \ln$ (湿質量/乾質量)。

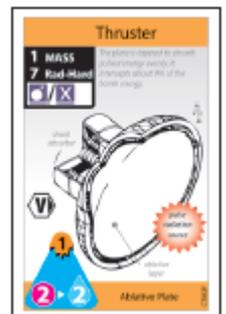
アブレイティブ・ノズル型スラスター Ablative Nozzle Thruster

犠牲物質のライナーが裏打ちされた半球形のノズルであり、このライナーは放射線パルスで気化することで反動物質となる。この反応は半球中心の外部で発生されるため、反応で生じたエネルギーの半分は宇宙空間に無為に放出される。この放射線が中性子である場合、ライナーにはリチウムかポリエチレンが用いられる (後者は 4cm の厚さで 98% の中性子を吸収する)。反物質反応などによる堅いガンマ線放射を使用する場合、まず燃料ペレットを鉛の層で囲み、放射線を (軟化) 熱化させなければならない。これにより熱化された X 線がアブレイティブ・ノズル内の炭化ケイ素 (SiC) の薄膜に衝突し、推力を得ることができる。



アブレイティブ・プレート型スラスター Ablative Plate Thruster

このノズルは板状の形状をとる。で外部からのエネルギーのパルスがこれで遮断され、プレート表面の薄膜が気化して噴出する。この蒸発材が一種の推進体として平行に放出されるのである。オリオン計画 Project Orion では、核エネルギーを均等に吸収するため、先細りとなった衝撃吸収プレートを使用している。アブレーション方式は、他のノズル以上に熱管理が求められる。



衝突ビーム型 H-B 核融合型スラスター Colliding Beam H-B Fusion Thruster

水素とホウ素 11 は、FRC (逆転磁場配位型 field-reversed configuration) プラズマ中で水素とホウ素 11 の接線方向のビームをエネルギー的に衝突させることにより、核融合を励起することができる。逆転磁場配位型の場合、この反応の生成物であるヘリウム 4 は推力として排出される。この Q 値は 2.63 となる。オープンサイクル冷却を用いることで、40ks の比推力を得ることができる。この 83% に達する効率は、何らかの方法で制動放射が制御可能となっていることを前提としている。



ラバール型ノズル・スラスター De Laval Nozzle Thruster

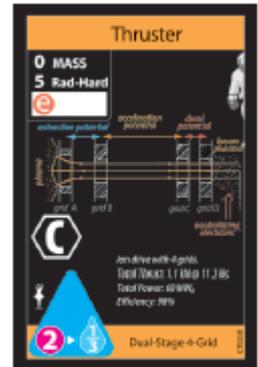
有名な集束-発散形状で知られるラバール型ノズルは、推進体の流れを超音速まで加速するようデザインされたものである。この作用は、ガス流の特性が亜音速と超音速では異なることを利用している。亜音速のガスの流れは、ノズルが絞られると流量を維持するために加速される。ラバール型ノズルを通過するガス流は、等エントロピー (ガスのエントロピーはほぼ一定) である。また亜音速のガス流は圧縮性である；こ



の中でそれ自体が圧力波である音も伝播される。最も狭まった地点でチョーク流⁴と呼ばれる条件に達したガスの流速は、局所的に音速（マッハ数=1.0）に達する。ノズルの断面積が大きくなるにつれてガスは膨張し、その流速は超音速まで加速されるが、こうした超音速流の中では、ノズル基準の座標系（マッハ数>1.0）で後方へは音波が伝播しなくなる。膨張比（出口面積に対する絞り面積の比）100:1の高圧チャンバーでは、十分な熱を取り込むことでノズル効率は90%にも達する。これはノズルの壁面を囲む水路に液体水素を冷却剤として流すことで再生冷却される。そして、ここで加熱された水素は、推進剤としてロケットに注入されるのである。

2 段式 4 格子型スラスタ Dual-Stage 4-Grid Thruster

この形式のイオンスラスタは、実験用核融合炉のイオン加速器から発展したものである。2枚または3枚の静電グリッドによりイオンの放出と加速を同時におこなう従来型のイオンスラスタとは異なり、このDS4Gはイオンの放出と加速を2組のグリッドに分割したものである。この分離により加速チャンバーの全長が伸び、排気速度も向上している(11-14ks)。また終端側のグリッドのペアの電位を高める(80kV)ことで、グリッドへの浸食とノズルからの発散（従来型イオンドライブの15度に対して半分以下）を抑えることができる。- C. Bramanti, R. Walker, et al., *The innovative dual-stage 4-grid ion thruster concept – Theory and experimental results*, 2006. (→)



ダンボ型スラスタ Dumbo Thruster

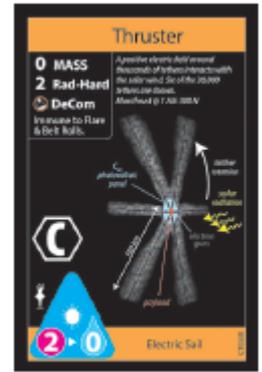
「厚皮類型（訳注：ゾウ）」NTR（熱核ロケット）は、熱交換器を流れるガス流路の最大化により様々な核反応から冷却材へのエネルギー伝達効率を高めるとともに、質量の低減をはかったものである。ダンボの推進体は、この原子炉の一端から反対側へと直線的なパイプを流れるのではなく、原子炉の炉心から（横方向に）放射状に流れたのち、原子炉の軸線沿いに方向を戻されてノズルから排出される。このような流路の変化は「折り返し流」**folded flow** と呼ばれ、同じ推力(7, 500MW/m³)でより体積と質量を小さくできる。燃料要素の最高温度を高めるため、発展型のダンボは水素化物減速材と、UC-ZrC 炭化物またはウラン、ジルコニウム、タンタルの三炭化物で作られた「溝付きワッシャー型」**grooved-washer** の燃料要素を使用する。- Bill Kirk, *Dumbo, a Pachydermal Rocket Motor*, Los Alamos National Laboratory 1992.(→); Brian Taylor and Bill Emrich, *Investigation of a Tricarbide Grooved Ring Fuel Element for a Nuclear Thermal Rocket*, 2017. (→)



⁴ チョーク流 **Choked Flow**. 気球で遊ぶ子供は皆ロケットにノズルが必要だと知っているが、いくつかのノズルの魔法は説明が難しいものである。この作用を擬人化し、推進体の流れを制御する「チャーリー」と、その推進体の流れの中の泡に乗って進むあなたの2人のチームを想像してほしい。あなたが狭い絞りの向かって進むにつれて圧力が高まるが、あなたはチャーリーに圧力を挙げて流速を一定に保つよう叫ぶ。狭まってゆく流れを進む一定量の液体は、ホースを掴んで妹に浴びせた時のように流れが速くなる。じきにあなたはマッハ1の速度に達するが、ここで突然ノズルは膨張し、圧力は急激に低下する。ここであなたがチャーリーを怒鳴りつけても、いまや超音速で遠ざかってゆくあなたの言葉は彼には届かない。流れが「チョーク」**choked**されているため、下流側の圧力が低下しても、その声はチャーリーには届かず、流出質量も増加しない。あなたの悲鳴は、低燃費を達成するために必要な超音速まで加速されてゆくのである。

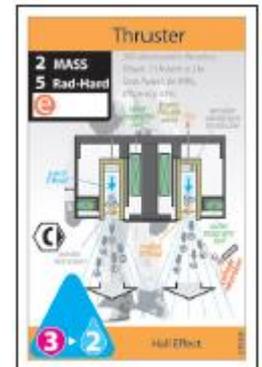
電気セイル型スラスター Electric Sail Thruster

太陽風の動圧は変動するが、1AU では平均して約 2nPa 程度である。電気セイルは磁界ではなく電界を使用することを除き、磁気セイルとよく似た方法でこの粒子の流れから推力を生み出す。電気セイルの形状は、何百本もの長く（ 100km 級）、細い（ 20 ミクロン級）、導電性のテザー（ワイヤー）で構成されている。このセイル全体は、ワイヤーを正の張力で安定させるため、 20 分周期で回転している。この宇宙機とワイヤーは、（数百ワット程度の）太陽電池式の電子銃により高い正電位（最大 20kV ）に保たれている。これによる電界が、周囲の太陽風プラズマの中で各ワイヤーの周囲数十メートルを取り囲んでいる。このため太陽風のイオンからは、このワイヤーが太い障害物に「見える」のである。太陽風を利用するセイルが、 $5,000$ 倍も強力な光子圧を使用するセイルより優れた性能を発揮するのは、この増効果による。正に帯電したテザーは太陽風の陽子と反発し、この進路を偏向させる。こうして 100km で質量 1kg のテザー1本あたり、 0.01N の推力が生み出される。同時に太陽風プラズマから引き寄せられた電子は、電子銃により中和される。各テザーと宇宙機間の電位計により、テザーの電位を細かく調整することで姿勢制御が行われる。さらに電子銃のスイッチを押すだけで、推力のオンオフを切り替えることもできる。流星に対する抗堪性を持たせるため、各テザーは複数のワイヤーが相互に冗長性を持ったリンクで構成されている。電気セイルのバリエーションには、双極子駆動型（ダイポールドライブ）も存在する。これは1枚の正電荷のスクリーンに代えて、正と負の2枚の平行なスクリーンを持つものである。このセイルが周囲の陽子または電子を加速することで、姿勢制御や磁界内の移動を可能とするもので、この形式のセイルは太陽風より速く移動することも可能である。こうした双極子セイルは、惑星間空間では 6mN/kwe 以上、（訳注：）地球、金星、火星、木星の軌道では 20mN/kwe 以上の性能を発揮する。- *Electric Sail*, AIAA Journal of Propulsion and Power, Electric Sail,2004; Janhunen, P. and A. Sandroos, *Simulation study of solar wind push on a charged wire: solar wind electric sail propulsion*, 2007 (→); Robert Zubrin, 2018. (→)



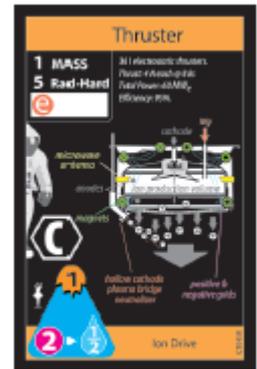
ホール効果型スラスター Hall Effect Thruster

この形式のイオンロケットは、円筒状のアノードと負に帯電したプラズマのカソードとの間の電位差によりイオンを加速する。この機関を始動するためには、スラスターの電源より上流側のアノードを高電位に帯電させる。これと同時に下流側のホロカソードから電子を発生させる。この電子がアノードに向けて上流に進むと、強力な電磁石による磁場に遭遇する。この磁界が（訳注：ホール効果により）電子を封じ込め、スラスター流路の下流側で電子が環状となる。ホールスラスターの名前はこのホール電流と呼ばれる電子の流れに由来している。この回転する電流がマグネシウムからなる推進体の流れに衝突し、イオンが生成される。こうして生み出された推進体のイオンは、アノード（正）と電子（負）のリングの間に生じる電界により、加速されたイオンビームとして放出される。ホール効果スラスターの動作に必要なエネルギーの大部分は推進体をイオン化するために費やされ、凍結フローロスが生じる。またこの形式では、放電室の浸食も問題となる。長所としては、ホール電流の電子がプラズマを中性に保つため、イオンドライブよりはるかに大きな推力密度を達成することができる。



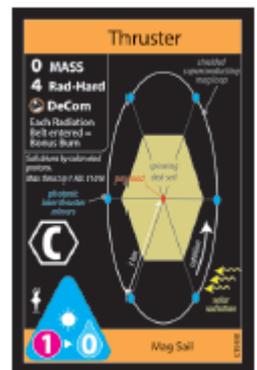
イオンドライブ型スラスタ Ion Drive Thruster

宇宙に置かれた静電粒子加速器は、効率的な電気ロケットとなる。掲載されている形式は、推進体のイオン化にマイクロ波と回転する磁石の組み合わせを使用することで、イオン流の中で浸食されやすい電極を不要としている。この推進体は、容易にイオン化して電荷を分離できる金属であれば何でも良い。有望な選択肢であるマグネシウムは、砕け散った母天体のマントルの一部だった小惑星に普遍的に存在しており、比較的低温の 1,800K 程度でレゴリスから揮発する。イオンドライブではマイナスに帯電したグリッドを使用してマグネシウムのイオンを加速し、これを排出時に中性化する。グリッドの浸食を抑えるため、C-C グリッドが使用される。このイオン流は相互に反発するイオンが含まれているため、推進体流は加速領域の断面積と電圧勾配の平方根に比例した比較的低い値に制限される。イオンの抽出と加速を分離した 2 段式システムとすることで、真空アーク放電なしで電圧勾配を 30kV まで達することができ、80-210km/sec の排出速度を達成できる。60MWe で推力 1.5kN を生み出すシステムでは、361 基の加速器で幅 25m の六角形のアレイを構成する想定となる。凍結流の効率は良好(96%)である。加速をブーストする際には（ゲーム上の「オープンサイクル冷却」 open-cycle cooling のルールに相当）、イオンに代えてコロイドを加速している。コロイド（導電性の非金属流体のサブミクロンサイズの液滴）はイオンより大きな質量を持つため、このコロイド・スラスタは燃費を犠牲にして推力を向上できるのである。



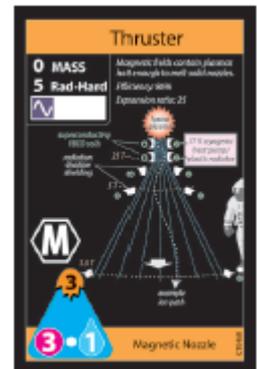
磁気セイル型スラスタ Mag Sail Thruster

磁気セイルは太陽風の陽子と反応して機動する。1AU の位置では、この風は 400-600km/sec (256 μ watt/m²) で太陽から螺旋状に広がり、1AU の位置では立方メートルあたり数百万の粒子を含んでいる。こうした荷電粒子は、磁気セイルの 2km にも及ぶワイヤーの輪により形成された磁場を通過する際に偏向される。この規模の磁気セイルは質量 20 トンほどの空荷状態で（1AU では）100 ニュートンの推力を発揮する。このワイヤーは超電導素材の 10kg/km の極細線で、シュラウド・ラインにより中心の貨物に接続されている。このワイヤーの輪には、超電導温度である 77K を保つために絶縁層と反射コーティングを施す必要がある。磁気セイルは質量を持たない磁場がセイル面となるため、光子セイルより優れた推力重量比を達成できる。また光子セイル同様、セイルを推力媒体に対して斜めに配することで、横方向への機動も可能となる。また磁気セイルは、その発生源から距離の 4 乗で減少する惑星と太陽の磁気圏から推力を得ることができる。この磁界強度は（地球磁気圏で）10 μ T 程度、太陽磁気圏ではそれ以下となる。図に描かれた磁気セイルは、推力増強のため張線に円盤状の光子セイルが取り付けられている。この形式のセイルは、光学レーザー推進（レーザー光を利用した推進体不要の推進方法）でも機動できる。



磁気ノズル型スラスタ Magnetic Nozzle Thruster

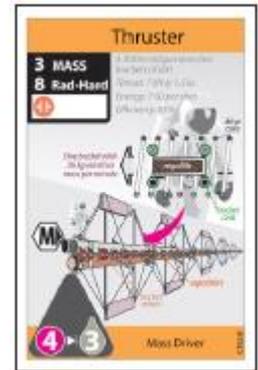
高比推力の熱力学ロケットは、素材の融点による温度制限のないノズルがあればより効果的である。磁気ノズルは固体材質の壁面に代えて磁場を使用し、イオンや導電性プラズマの排気流を誘導するものである。図は絞りの磁界強度 25T で、86% のノズル効率で動作することを想定した設計である。このコイルは YBCO のような高温超電導体で作られている。ここに（訳注：コイルを保護するために）ノズル面積の 2% を覆うタングステン製のブレードを配置し、核融合放射線の 2% を遮断する。このタングステン製のブレード自体は（自ら熱を放射するため）冷却を必要としないが、コイルへの熱伝導を防ぐために層状のマイラー（訳注：ポリエステルフィルム断熱材の通称）/真空シールドを使用する。より安価なシールド素材はカーボンで、1,500K で 287kW/m² を放射できる。厚さ 12cm のカーボンにより、14MeV の中性子の透過率を 0.001 未満に抑えることができる。また YBCO を液体窒素の温度(77K)で動作させるため、プラスチック製のラジ



エターが設置されている。図は絞り部の磁界強度 25T で、86%のノズル効率で動作することを想定した設計である。

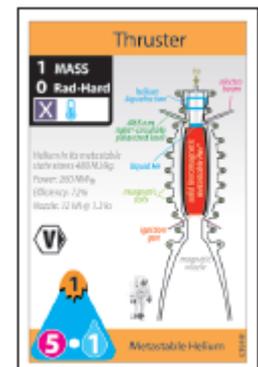
マスドライバー型スラスタ Mass Driver Thruster

電磁進行波加速器は、スラスタや重量物打上げ器として利用できる。いずれのシステムでもレゴリス（およびその他の貨物）を軽量のバケットに搭載し、これをリニア式電磁加速器の電機子として働く一対の超電導体のループで挟む形式となる。図示されているスラスタでは、超電導コイルに蓄積された 3.8GJ の電磁エネルギーにより、ペイロードを 50,000G まで加速する。この軌道の全長は 390m を想定している。これにより減速したバケットを回収しつつ、30 秒毎に 36kg のペイロードを 11km/sec で射出する。効率は 85% におよぶが、超伝導体を 77K に冷却しておくためのラジエーターが必要となる。推進用ではなく物資輸送用に最適化されたマスドライバーでは、バケット質量に対するペイロード質量の比率が高く設定される。このシステムは使用率 54% の想定で、年間 10kt の工業製品や岩石を打ち上げることができる。このシステムは数十マイクロラジアン級の照準精度を持つため、ペイロードを射出するだけでなく、数百万キロ彼方の敵基地に脅威をおよぼすことが可能である。この質量打ち上げの速度は地球の脱出速度(11km/sec)に等しく、赤道直下の適当な山の斜面を利用してペイロードを打ち上げることも可能となる。76GJ の打上げエネルギーを与えられた炭素被膜付きの電柱型の 1 トンのペイロードは、その質量の 3% しか燃焼させず、太陽軌道や地球軌道に到達するまでのエネルギー損失も 20% 程度に抑えられる。 - Gerard K. O'Neill, *The High Frontier: Human Colonies in Space*, 1977.



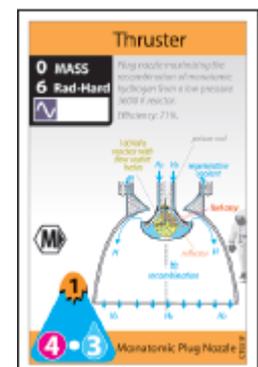
準安定状態ヘリウム型 Metastable Helium Thruster

準安定状態ヘリウムは、ヘリウム原子の電子が励起された状態であり、液体ヘリウムに 24keV の電子ビームを与えることで容易に形成される。スピン軌道崩壊をコヒーレントなレーザーポンプで抑えることができれば、理論上は 8 年の寿命を持つ（融点 600K の強磁性固体 He*2 の形で）。スピン整列された固体の準安定ヘリウムは、使い勝手は悪いものの理論上は比推力 3.2ks に達する高推力の化学燃料として有用である。 - J.S. Zmuidzinas, *Stabilization of He[□] (a 3Sigma⁺) in Liquid Helium by Optical Pumping*, unpublished (1976).



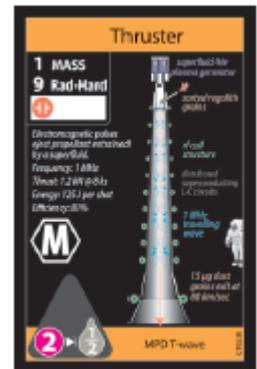
単原子プラグノズル型スラスタ Monatomic Plug Nozzle Thruster

単原子水素の分子量は水素分子の半分となるため、これを使用した熱力学ロケットは極めて高い性能を発揮する（比推力 > 1.32ks）。しかし水素を分離するに足る高温では、原子炉の炉心が破壊されない程度に圧力を下げる必要があり、この場合は実際に供給される熱量は低下してしまう。ほとんどの NTR（記注：熱核ロケット）は 31 気圧程度で運用されるが、単原子炉はわずか 1 気圧で運用されるため、熱流束は 50 分の 1 程度となり、ターボポンプも不要となる。この炉心は球形で、推進体は炉心の中心部に流れ込んだのち、表面出口から 3,600K の高温で排出される。この核分裂燃料の形状は問われない：小石、ワッシャー、ねじれたリボン状など、どんな形状でも使用できる。圧力と熱流束のいずれも低いため、このプラグ型ノズルは標準的な NTR よりはるかに短い。プラグの形状は再結合の効率を高めることが主眼であり、その効率は 71% ほどになる。また水素により核反応を制御するため、制御ドラムも不要となる。 - J.H. Ramsthaler, *Low Pressure Nuclear Thermal Rocket Concept (LPNTR)*, 1991. (→)



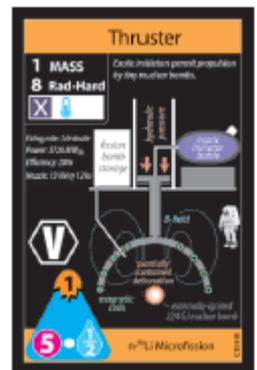
MPD 進行波型スラスタ MPD T-wave Thruster

インパルス式の電気ロケットでは、磁気プラズマダイナミック進行波（MPD T 波）により推進体を加速することができる。図示されている例では、数百キロアンペアの電流により瞬間的に強力な電磁力を発生させるメガヘルツ級のパルス発信器により、超流動磁性体のヘリウム 3 を加速する。加速器は分散配置された超電導 L-C 回路の列を順番に起動させ、この磁気ピストンにより流体を押し出す。この推進体は、超流動ヘリウムに含まれたマイクログラム級のレゴリス塵である。ダストとヘリウムはローレンツ力により内壁から隔離され、その効率は 81%にも達する。それぞれ 125J のパルスを発生させるためには、数百ボルトの電圧でミリファラド級のキャパシタが必要となる。MPD はイオンドライブに比べて推力密度が高く、電荷を中和する必要もない。しかし MPD は発熱を伴い、電極が劣化するという問題を抱えている。また少量とはいえ高価な超流動媒体を継続的に必要とする。



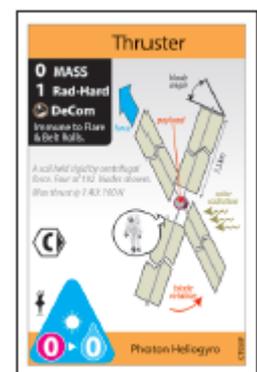
n-6Li マイクロ核分裂型スラスタ n-6Li Microfission Thruster

オリオン計画 Project Orion のように原子爆弾を利用して飛行するロケットは、核分裂爆弾の最小爆発規模が 1/4 キロトンにも及ぶため、巨大なショックアブソーバを必要とする。しかしエキゾチック粒子を使用することで、このパルスの規模をマイクロ核分裂のレベルにまで小型化することができる。リチウム同位体の ${}^6\text{Li}$ は、超低温中性子のような非常に大きな反応断面積を持つ粒子との相互作用により、自発的な核反応（これが核分裂なのか核融合なのかは不明）を引き起こすことができる。「臨界量」は不要である。これはクリーンな反応であり、生成物として荷電粒子（T と He）がそれぞれ約 2MeV で生成される。図示されたシステムでは、5 メートルの磁気ノズルによりマイクロ爆発のエネルギーを機体に伝達している。これは MagOrion（オリオンと磁気セイルの複合方式）のコンセプトである磁気によるインパルス伝達の利点と同じものである。燃料の反応速度 30mg/sec で 2,000MWth の出力が生み出される。この 224GJ の爆発を 2 分ごとに継続した場合、16ksec の比推力で 5kN の推力が得られる。これに対して油圧固定装置が調整された周波数で振動することで、宇宙船には一定の加速度が与えられる。凍結流とノズルを合わせた効率は 25%、熱効率は 80%となる。 - Ralph Ewig, *Mini-mag Orion Concept, modified for n-Li6 fission*.



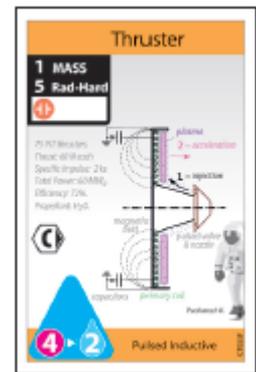
ヘリオジャイロ型光子セイル Photon Heliogyro Sail

回転する複数のブレードで構成されている光子セイルはヘリオジャイロと呼ばれる。これはヘリコプターのように遠心力でブレードを安定させ、これにピッチを掛けることで姿勢を制御する。この回転式のデザインにはカイトセイルのような支柱は不要だが、発生した遠心力をブレードの末端部で支える必要がある。またセイルの姿勢を変えた際に発生する振動を抑えるため、横方向の補強材を設ける必要がある。セイルの各パネルを小型化することで、補強材間のセイルの湾曲による皺を防ぐことができる。こうした理由から、ヘリオジャイロはカイトセイルと比べて質量面での優位性はないが、宇宙での展開が容易であるという利点を持つ。参考例では 4 セットに分けられた 48 枚のブレードにより、1AU で（最大）100 ニュートンの力を生み出す。各ブレードの大きさは 8x7500m となる。セイルは厚さ 1 μm のフィルムで、反射膜と放射膜で覆われている。ブレードはセット毎にハブに固定されており、このセットが丸丸となって回転する。このセイル用フィルム単体で 7 トン、張線のケーブルを含めると 20 トンの質量となる。 - Jerome Wright, *Space Sailing*, pp. 82-88, 1992 (scaled up).



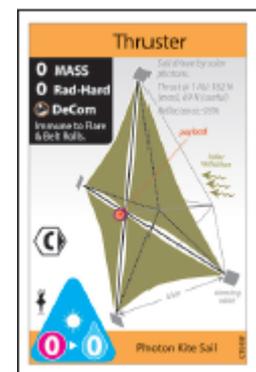
パルス誘導型スラスター Pulsed Inductive Thruster

PIT は他の電気式スラスターに比べて多くの利点を持つ MPD (磁気プラズマダイナミック Magnetoplasmadynamic) 式スラスターの一種である。これは水、アンモニア、ヒドラジンなど多種多様な推進体を扱えるため、ISRU による「現地で自活する」live off the land 方式の太陽系探査に向いている。また PIT スラスターには通常の電気式スラスターでは浸食に侵される電極を持たない。さらには幅広い出力レベルで所定のインパルスを維持することができる。このパルスは 2 段階で実施される。まず気体の推進体を平らな誘導コイルに瞬間的に噴射し、続いてコンデンサからの瞬間的な放電 (通常はナノ秒単位) によりこの気体をイオン化させ、ローレンツ力で加速させる。このパルスの周期、そしてこれによる推力は、コンデンサの充電容量に依存する。- Frisbee, 2005. (訳注: *The nuclear-electric pulsed inductive thruster (NuPIT): mission analysis for Prometheus*, AIAA Joint Propulsion Conference (→))



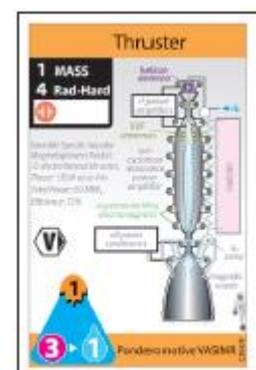
光子カイトセイル Photon Kite Sail

太陽光を受けるセイルを展開するには、凧のような剛体構造を用いるのが最もシンプルな手法である。ブームとステーからなる三次元の剛体で支えられていることから、こうした構造は三軸安定構造と呼ばれる。カイトセイルは、回転安定式のセイルに比べて操縦しやすいという利点がある。太陽公転軌道上でこのカイトセイルを傾け、光圧を減らして減速させると、太陽に向かう内側への螺旋軌道に入る。逆に傾けた場合、外側への螺旋軌道へと移行する。図示されているカイトセイルは、4本のブームとステーで 1 辺 4km の四角帆を支えている。これが 93% の反射率を持つものとして、1AU で最大 100 ニュートンの推力を発揮する。この操縦は、各ブームの先端に設置された面積 20,000m² のステアリングペーンにより操られる。この空虚質量は 16,000kg, この状態でのセイルの質量は 1g/m² となる。これほど軽量なセイルは極めて薄く (厚さ 300nm のアルミフィルム)、可視光線の波長と同じ大きさの穴が開けられている (光を反射するためには一枚板である必要はない)。この穴開き微細構造は DNA を足場として構築され、アルミニウムをコーティングしたのちに DNA を焼き切って製造される。カイトセイルの温度は 600K までに制限されており、また 1,000km 未満の地球軌道では空気抵抗のため動作しない。また本ゲームで標準的な 60MW のレーザービームを照射することで、この推力は 10 倍にも達する。50Hz で動作されるこのビームは、穴開きフィルムに毛細管現象で補充される冷却水を沸騰させる。さらに圧電ロボットのセイル補修機が、セイルの欠損部分をアルミ蒸着で修復してゆくのである。- J. M. Garvey, *Space station options for constructing advanced solar sails capable of multiple mars missions*, AIAA Paper 87-1902, AIAA/SAE/ASME 23rd Joint Propulsion Conference, San Diego, California, 1987. (これは Garvey による Large Square Rigged Clipper Sail の 2 倍の大きさに相当する)



動重力型比推力可変型プラズマ式スラスター Ponderomotive VASIMR Thruster

VASIMR とは、比推力可変磁化プラズマ式ロケット (VARIABLE-SPECIFIC-IMPULSE Magnetoplasma Rocket) の略称である。この形式の電気ロケットには、アノードとカソードの両電極を使用せず (これにより他の電気ロケットと比較して寿命が大幅に伸びる)、機関をスロットルとして推力と比推力とを変換できるという二つの特徴がある。VASIMR 型の宇宙機は、低速ギアで惑星軌道から上昇し、高速ギアで惑星間巡航をおこなえるのである。その他の利点としては、共鳴加熱の効率 (80%) や、出力調整が比較的低電流・高電圧であることによる質量削減効果が挙げられる。推進体 (通常は水素だが、他の多くの揮発性物質も使用できる) は、まずヘリコン波によりイオン化され、次に 2 番目の磁気チャンバーで電場と磁場の振動による 1,000 万 K の加熱で、動重力 (ポンデロモーティブ力) により加速される。さらにハイブリッド 2 段階式磁気ノズ

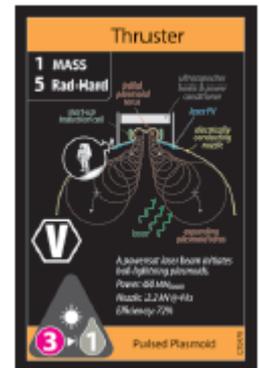


ルにより、97%の効率で螺旋状の排気が軸方向推力に変換される。 - Franklin Chang-Diaz, et al., *The Physics and Engineering of the VASIMR Engine*, 2000. (→)

パルス式プラズモイド型スラスター Pulsed Plasmod Thruster

プラズモイドとは、磁場とプラズマのコヒーレントなトーラス構造（円環）である。

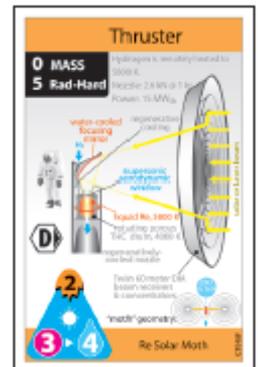
「クーゲルブリッツ」Kugelblitz（球電現象）は、地球上におけるプラズモイドの一例である（筆者の師のひとりであるアリゾナ大学の Roger C. Jones 博士が、この物理的現象の実証をおこなった）。プラズモイド式ロケットは、推進体にメガアンペア級の電流を流すことにより、球電のトーラス構造を生み出すものである。この推進体の種類は問われない。この生成されたプラズモイドは、放射状に広がる導電性のノズルへと拡大してゆく。この磁気と熱のエネルギーは、プラズモイドがノズル内に生み出すイメージ電流との相互作用により、指向性の運動エネルギーへと変換される。このイオン化損失はエネルギー全体からすると僅かで、その凍結流効率は 90%となる。他の形式の電気ロケットとは異なり、プラズモイド式スラスターには（浸食を被りやすい）電極が不要で、またパルスの周期を上げるだけで出力を増大させることが可能である。例図のデザインでは、直径 50m の構造体全体でノズル、レーザー収束器、高利得アンテナ、ラジエーターの 4 役を果たしている。ここで受信されたレーザー出力(60MW)は、駆動用パルスを生み出すキャパシタを充電するため、直接ギャップ光起電発電機へと送られる。 - R. Bourque, General Atomics, 1990. (→)



ソーラーモス型スラスター Re Solar Moth Thruster

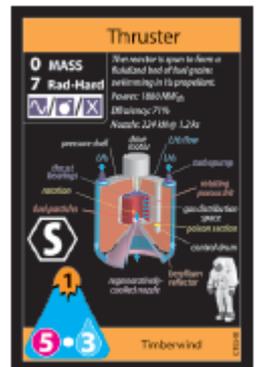
太陽熱ロケットは、太陽光を集めてノズルに向かう推進体に集束させるものである。

この「蛾」moth は 2 枚の直径 60m の鏡面仕上げのマイラー製の「翼」(7g/m²)を使用して光を集める構造である。残念ながら水素推進体は太陽光に対して透明であるため、高温の熱交換器が必要となる。この熱交換器は炭化タンタルハフニウム (THC)製の多孔質ドラムを回転させることで、再生冷却により 4,000K の固体状態を保つものである。推進体と冷却剤は、ドラムの孔から高圧で送り出され、プラズマの泡となって次の熱交換ステージである液体レニウムのベッドに入る。レニウム (Re)は 3,459K で融解するが、5,903K までは液体の状態を保つ。回転するドラムにより人工重力が発生し、密度の高いレニウムの中を水素の泡が上に向かい、中央からラバール型ノズルに排出される。この推進体の温度は太陽表面に匹敵する 5,800K に達し、比推力は 1.2ks（水素推進体）または 0.5ks（水推進体）となる。 - F.G. Etheridge, *Solar Rocket System Concept Analysis*, Rockwell Space Systems Group (resized for 3 kN thrust), Malik K. (Matterbeam), 2017. (→)



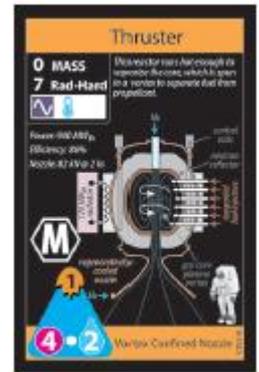
ティンバーウィンド型スラスター Timberwind Thruster

この形式の NTR 原子炉は、固体燃料ペレットの流動層に液体の推進体/冷却剤を高速で流し込み、ペレット自体を浮遊させ流体のように扱うものである。この原子炉は、水素推進体が燃料ペレットを通過する際に、燃料ペレットの位置を保つ向心力を生み出すために 3,000rpm で回転している。このペレットは棒状に固定されているわけではないため、加熱や冷却のために原子炉内を移動することでできる。これにより燃料の強度が抑えられ、固体炉型の NTR より高い温度と比推力(1.2ks)を生み出すことができる。 - El-Genk et al., 1990; Ludewig, 1990; Horman et al., 1991; ISNPS, 2003.



渦流封じ込めノズル型スラスタ Vortex Confined Nozzle Thruster

熱力学ロケットは、その炉心が高温になればなるほど燃費が良くなる。しかし過剰な高温では固体のコアが蒸発してしまう。蒸気炉式ロケットは気化した推進体と燃料を混合させ、その後に推進体のみを分離排出して推力を得ることができる。ここで分子の直接衝突、輻射熱、直接の核分裂断片などにより、エネルギーは燃料から推進体へと効率的に伝達される。例図のオープンサイクル方式では、これを予熱された推進体をリアクターの壁面から接線方向に噴射することで維持される渦の中で、プラズマの混合物を回転させることでこれを実現している。この方式では、遠心力により密度の高い物質が円筒形の反応容器の外側に留まることになる。そして燃料は熱交換器により冷却された後に再循環されてリアクターの前端から再投入されるが、推進体は高速で排出される。核分裂反応を用いる場合、この渦の外周には高密度の液体ウラン燃料が流れ、中心部には低密度の推進体が 18,500K もの高温で泡状に漂うことになる。BeO（酸化ベリウム）の減速材は、反応中性子の大半を渦の中に回収する。水や水素の乱流の中で臨界燃料量を維持するためには、高度な即応型のフィードバックアクチュエータが必要となる。この形式では炉心がメルトダウン状態にあるため、反応速度を維持するためには制御棒やドラムではなく、燃料密度を変化させる必要がある。反物質反応を用いる場合には、ウランに代えて（厚さ約 4cm の）液体タングステンを回転させ、硬 X 線を吸収させることになる。核融合反応を用いる場合、推進体の方が低温で高密度であるため、渦の中心には反応中の燃料球が位置することになる。

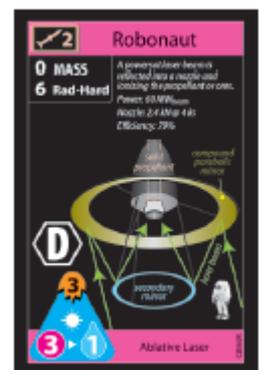


23. ロボノーツ・カード Robonaut Cards

「ロボノーツ」はプログラムされた知能で意思決定するロボットではなく、人間が遠隔操作で操縦する機械的なアバターである。これは本ゲーム上の造語である。この必要性は単純である：宇宙服は高価で、危険で、快適とは言い難い。ならばロボノーツたちが探査、ラジエーターのメンテナンス、重量物の輸送、採掘、リファイナリー施設の建設や操業を行う間、人間は近傍の宇宙ステーション内のピザ休憩やリクリエーションのセックスが楽しめる普段着環境で過ごすことができる。高速の信号でも 1AU 毎に往復 16 分以上のタイムラグが生じるため、こうしたバナール型宇宙ステーションは比較的 近傍に位置している必要がある。

レーザー蒸発型ロボノーツ Ablative Laser Robonaut

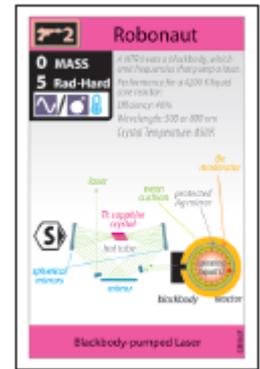
固体の推進体に、高エネルギー、短時間 (10^{-10} 秒未満) のレーザーパルス照射することで起動されるロケット。ひとつ目のレーザーパルスで対象を蒸発させ、ふたつ目のレーザーパルスで発生したガスをさらに過熱するというダブル・パルス方式を使用している。これは黒鉛のような Z 値の低い推進体を使用することで、高い燃料経済性(4ks)を得ることができる。(残念ながら氷は融解と「滴り」による損失が大きいく、この方式には向かない) 一次および二次のミラーにより、レーザーパルスは $3 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ の照射量まで集光される。レーザーパルス 1 回あたりの質量除去率は $3.0 \mu\text{g}$ 程度となる。60MW のレーザービームを使用した場合のレーザー蒸発型スラスタの推力は 2.4kN 程度、この照射シーケンスに合わせて成形された燃料と、効率的なダブル・パルス方式を用いることにより、総合的な効率は 79% に達する。- Dr. Andrew V. Pakhomov, UAH, *Specific Impulse and other Characteristics of Elementary Propellants for Ablative Laser Propulsion*, 2002. (→)



黒体励起レーザー型ロボノーツ Blackbody-pumped Laser Robonaut

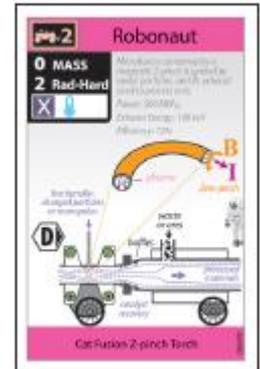
これは特定の波長を強く放射するという特性のある黒体放射体を原子炉の熱源を利用して加熱することで、レーザー励起用の光源に使用するものである。2,000-3,000K の黒体放射の帯域に含まれる発振素材としては、Nd:YAG (1,060nm) などの結晶、ヨウ素などの気体、エルビウムを添加したフッ化リ

チウムーランタノイド (1,530nm)の繊維などが存在する。これらの素材は熱回収のための「ホットチューブ」の中に収められている。また黒体のスペクトルから回折格子を用いて目的の波長を取り出す方式も存在する。熔融ウランを使用した融解炉では、この黒体温度を 4,200K まで引き上げることが可能である。このスペクトルに適合するのはチタン・サファイア・レーザーで、450K で 40%の効率を発揮する。ガス炉では黒体温度は 19,000K にも達し、800K で 40%の効率を発揮するフッ化キセノン・ガスレーザー(350nm)がこれに適合する。黒体レーザーは比較的波長が長いので、宇宙機に巨大な光学系を搭載することを避けるため周波数を 2 倍にして運用する必要があるだろう。- Malik K. (Matterbeam), *Nuclear Reactor Lasers: from Fission to Photon*, 2019. (→)



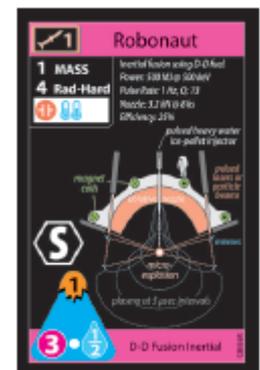
Z ピンチ触媒核融合トーチ型ロボノーツ Cat Fusion Z-pinch Torch Robonaut

触媒核融合を利用したプラズマトーチは、鉱石の精錬や廃棄物のリサイクルに利用できる可能性がある。この核融合は、バナジウム-ガリウム(V3Ga)の超伝導体とアルミニウムの安定剤を用いた高密度の高速パルス状プラズマの集束装置となるゼータ・ピンチの内部で発生する。このゼータ・ピンチの閉じ込め力は、このプラズマ自体に電流が流れることにより発生する磁場である「自己生成磁場」により発生する。メガアンペア級の電流である(I)はゼータ方向に、これによる磁場(B)はシータ方向に生み出される(訳注:図参照)。この D-T や D-D 核融合の触媒となるのは、さまざまな仮想のエキゾチック粒子である。触媒の流出は Z ピンチの機構により最小限に抑えられているが、それ自体が破壊と再生を繰り返すナノレベルのロータで調整された段階的な高温排気流により、流出口へと導かれる。



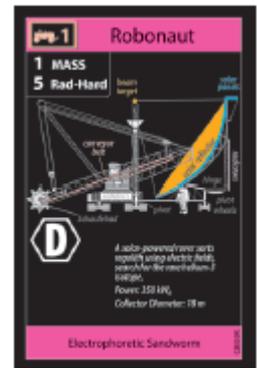
D-D 慣性核融合型ロボノーツ D-D Inertial Fusion Robonaut

核融合燃料の「ターゲット」は、「慣性閉じ込め」inertial confinement により点火することができる:これは全方位から照射されたエネルギーにより燃料を圧縮、加熱する手法である。水素の「重い」同位体である重水素の雪片は、重水素の粒子ビームとレーザーを併用することで点火と融合を引き起こすことができる。図示された構成では、射出された氷玉状のターゲットを囲むようにリング状に配置された合計 38 メガジュールのエネルギーのビームが投入される。このエネルギーの投入は 1Hz で動作し、毎秒投入される 2 グラムの氷状のペレットを爆破させる。このペレット外側の 99%は 10ns 以内に破壊され、中心核の重水素燃料は 1 立方センチメートルあたり 1 キログラムの密度に達するまで圧縮される。生成された T と 3He は、触媒により更なる核融合を引き起こし、水素、ヘリウム、そして若干の中性子だけが残される。(この反応エネルギーの 36%が中性子となる)この燃料の燃焼効率(30%)は、磁場閉じ込め方式の 2 倍に達し、燃費も 40%向上する。これによるエネルギー増倍率(Q 値)は 13 に達する。500MWth の融合炉を想定した場合、そのまま推力や金属精錬に利用できる 320MW の荷電粒子が生成される。また残る 105MW の高速中性子が宇宙に放たれるほか、75MW が遮蔽物に遮られることになる。この反応で生じたエネルギーの約 2/3 は排熱となるが、残るエネルギーは発電のための熱や、D-D ペレットの着火を助ける触媒となるトリチウムを生み出すことになる。これをロケットに使用する場合、その質量自体が推進体と遮蔽壁となる黒鉛ウイスキーを重ねたアブレイティブ・ノズルの構成をとる。- R. Hyde, *A Laser Fusion Rocket for Interplanetary Propulsion*, 34th International Astronautical Conf., AIF Paper 83-396, Budapest, Hungary, 1983. (→) (ラジエターの重量を抑えるため、推進体の射出間隔を 100Hz から 1Hz に低下させた構成としている)



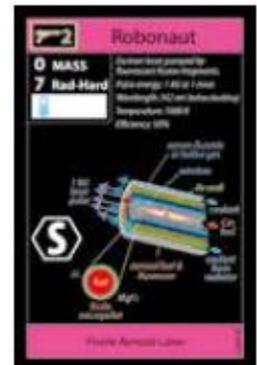
電気泳動式サンドワーム型ロボノーツ **Electrophoretic Sandworm Robonaut**

サンドワームと呼ばれるこの採掘機は、レゴリスの分解揮発処理用に設計されている。これはシャウフェルラット *Schaufelrad* (バケットホイール) で採掘された原料を中央のホッパーに運び込むベルトコンベア、これに備え付けられた土壌加圧器、粉砕機と加熱器、固体-蒸気分離器、揮発物質貯蔵バッグ、尾鉱処理器、気体洗浄・再加熱・再加圧器により構成されている。また旋回する太陽光集光器により、熱機関に太陽光を熱機関に収束させる。この「サンドワーム」という名前は、Frank Herbert の小説に登場する大量の砂をろ過することで希少で貴重な「スパイス」を生み出す巨大な環形動物にインスパイアされたものである。そしてここで「スパイス」となるのは、地球上には存在しないが小惑星や月のレゴリスには微量に含まれているヘリウム3である。ヘリウム3はクリーンな 3He-D 核融合に不可欠な物質であり、将来的には石油より貴重な物質となる可能性がある。ここでは磁氣的に鉄を除去したのちに、残されたレゴリスは高電圧帯電気泳動槽で処理されるのである。(電気泳動とは、電界中の荷電粒子を電気泳動速度と電荷に応じて選鉱する手法である) 図に描かれた30トン級のサンドワームは、ビーム伝送(12MWのビームを想定)による350kWeの出力で稼働する想定である。これは年間900万トンのレゴリスを処理することで、110トンの水(推進体となる)、200トンの水素(推進体)、33kgのヘリウム3(燃料となる)を生み出すことができる。- NASA Academy の Gajda によるモデル Mk2/3 サンドワームを基にした試算。(訳注: Matthew E. Gajda, *A Lunar Miner Design: With Emphasis on the Volatile Storage System*, 2006. (→)等に関連情報あり。)



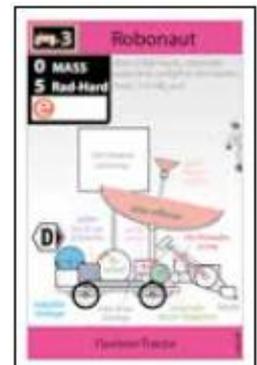
核分裂式エアロゾル・レーザー型ロボノーツ **Fissile Aerosol Laser Robonaut**

これは電子ビームの代わりに核分裂により励起するエキシマレーザーである。このマイクロメートルサイズの核分裂粒子は、減速材に囲まれて高温で保持されている。この出力がヨウ素混合気体に衝突することで、 12^* のエキシマが発生する。これらは特定波長の光子を放出して蛍光を発したのちに、安定状態へと戻る。これにより波長342nmで1MJのエネルギーを持つ1ミリ秒のパルスが生み出される。この変換効率は50%に達する。またUVミラーとしてアルミニウム鏡面を用いることで、排熱を削減することができる。また全体を高温で機能させることができるため、1,000Kでの排熱も可能となっている。- Prelas, Boody, Zediker, *An Aerosol Core Nuclear Reactor for Space-Based High Energy/Power Nuclear-pumped Lasers*, 1985. (→)



フライホイール式トラクター型ロボノーツ **Flywheel Tractor Robonaut**

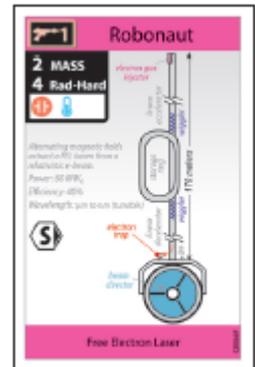
車輪式の採掘運搬車6台からなる採掘部隊。各車両は6MW(8,500馬力)のフライホイールを使用したモータを搭載し、それぞれが荒野で年間120トンの鉄鉱石や揮発性物質を掘り取って運搬することができる。このフライホイールへの充電は、マイクロ波レクテナを介しておこなわれる。これは氷の堆積物や結晶の水素信号を検出する中性子分光器を搭載した長距離ローバーとしても運用される。レゴリスの採掘にはオーガーを用い、衝撃粉砕機とスクリーンを用いて凝集物を粉砕する。これにより毎時7トンのレゴリスを処理し、1テスラの磁気選鉱機により毎時11kgの有利鉄、チタン鉄鉱、鉄・コバルト・ニッケルなどの磁性酸化物を選別することができる。また揮発性物質を採取する場合には、レゴリス中の氷の結晶を蒸発させるために大型の太陽光集光器を使用する。- Dave Dietzler, www.moonminer.com. (訳注: URLはリンク切れ)



自由電子レーザー型ロボノーツ **Free Electron Laser Robonaut**

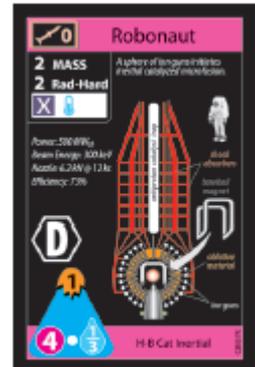
高周波で強力な静磁場を発生させる「ウィグラー」wigglerと呼ばれる機器を用いることで、相対論的な電子ビームのエネルギーを効率的にコヒーレントな光子に変換することができる。これが自由電子

レーザー(FEL)の原理である。例図は全長 80m の電子加速器を備えた 125MWw の FEL である。この電子ビームの加速には、高周波電力による空洞共振器を用いた持続的なものや、この電子ビームを二次巻線として使用するマイクロ波の「変圧器」を使用するパルス状なものが使用される。この波長は、300nm のパルス繰り返し周波数の範囲で変更することができる。使用された電子は減速され、再循環される。FEL は、非常に高い電気エネルギーから光エネルギーへの変換効率を得ることができる（機器全体で 40%）。



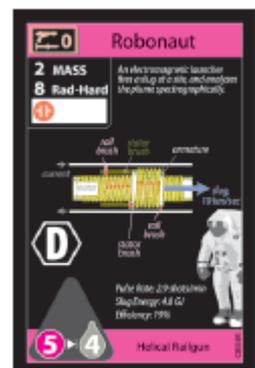
水素-ホウ素触媒慣性核融合型ロボノーツ H-B Cat Inertial Robonaut

水素とホウ素 11 の核融合は、磁氣的に誘導可能かつ 300keV のアルファ粒子を放出するだけのクリーンな反応である。しかし H-11B 核融合は、300keV 以下の温度では触媒としてエキゾチック粒子を用いなければ進行しない。可能性のひとつは、H-11B 原子の電子を、磁気単極子や分数荷電粒子のような（いまのところ概念上の）大質量レプトンに置き換えることである。こうして生み出されたエキゾチック原子は、比較的「低温」で融合可能であり、またこのエキゾチック触媒を回収することもできる。もうひとつの可能性は、反陽子を触媒としたマイクロ核分裂により、H-11B 核融合を励起する方法である。H-11B と 235U を 9 対 1 のモル比で含む 3g のターゲットに対し、1,000 億個の反陽子を 2nsec の 1.2MeV のパルスで射出すると、これによるウランのマイクロ核分裂により H-11B 核融合が励起され、20GJ のエネルギーが放出される。これを 5 ヘルツで稼働させることで、射出あたり 145mg の水素とホウ素 11 が反応して 2,000MWth を生み出すのである。このターゲットは 200g の鉛で覆われており、発生した放射線を磁気ノズルやアブレーションノズルで 80% の効率で推力に変換できるよう、プラズマは 35keV 程度から 1keV まで熱せられる。この射出による放出質量は 1 回あたり 2.4kg である。またエキゾチック触媒はリサイクルされる。触媒式核融合は優れた熱効率(86%)と推力質量比(34mg)を有しており、本ゲームに登場する機関の中でも優れた機関のひとつとなっている。また比推力は、使用する水素燃料中のスピン偏極されたフリーラジカルの濃度により 8-16ksec の値となる。- G. Gaidos, et al., *Antiproton-Catalyzed Microfission/Fusion Propulsion Systems for Exploration of the Outer Solar System and Beyond*, Pennsylvania State University, 1998. (→) (私は ICAN-II 型宇宙船の設計をもとに、燃料を触媒式 D-T から触媒式 H-B に変更し、(訳注：射出周期と出力を) 1Hz から 0.2Hz へ、302GW から 2GW へと大幅に下方修正した)



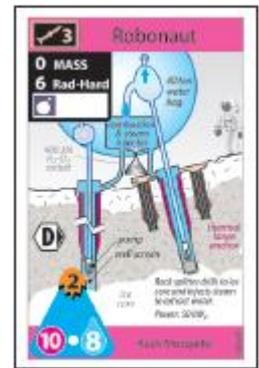
ヘリカルレールガン型ロボノーツ Helical Railgun Robonaut

旧来のレールガンは、レールとのインダクタンスを用いた一通過の接触式のリニアモーターという限界があった。高加速化した場合、ブラシの接触と大電流によりレールが過熱され、寿命が短くなるという問題を抱えている。このレールを（電機子と発射体の回転を螺子状に一致させるように）螺旋状に配置することで、わずかな電流で高加速を生み出すことができる。このヘリカルレールガンの試掘モードでは、鉋床の候補地に対して 1 トンの金属弾を投射する。わずかな発射速度で楕円軌道に乗せられたこの砲弾は、秒速 10~70km で目標に衝突することになる。この衝突により生み出された噴煙を分析することで、その成分を特定するのである。またこの衝突によるクレーターは、露天掘りの採掘地としても利用できる。スラスターとして使用する場合は、コンデンサを何日もかけて充電し、使い捨ての電機子とともにダート弾を高速で一発ずつ打ち出すのである。- Engel, Nunnally, & Neri, *Research Progress in the Development of a High-Efficiency, Medium-Caliber Helical Coil Electromagnetic Launcher*, 2004. (→) また LCROSS のミッションにも着想を得た。



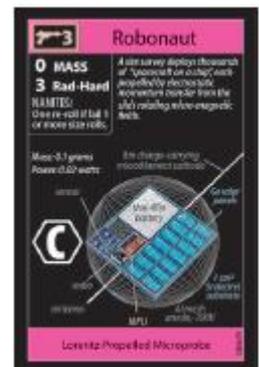
クック・モスキート型ロボノーツ Kuck Mosquito Robonaut

凍結した休眠彗星やD型小惑星が太陽により温められると、その表面に無水層が形成される。クック・モスキートと呼ばれるこの現地資源採掘用ロボノーツは、この無水層を掘削して蒸気を注入し、コア部分の水を吸い出すよう設計されている。この水の一部は電気分解され、 H_2-O_2 化学機関の燃料となる。サーマル・ランスは地盤を溶かし、足場を固定するために用いられる。この目標となる天体には、母岩に30%以上の水を含有している必要がある。その地下のマントル層が採掘の加圧による引張りに耐えられない場合、壊滅的な崩壊が発生する可能性がある。- Dave Kuck, *The Exploitation of Space Oases*, Princeton Conference on Space Manufacturing, Space Studies Institute, 1995.



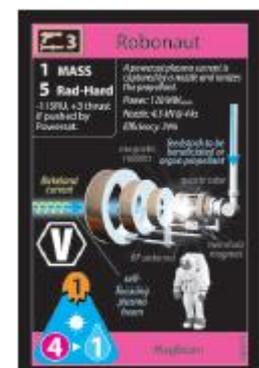
ローレンツ力推進マイクロプローブ型ロボノーツ Lorenz-Propelled Microprobe Robonaut

磁界中（ここでは地球の磁場を想定している）を動く荷電粒子が磁力線に対して垂直方向に受ける力を利用することで、極小プローブの群れを遠方に送り出すことができる。個々のプローブは荷電(+10V)した（半径 $10\mu m$ 程度の）マイクロフィラメントに包まれており、それぞれが磁気セイル一部として機能することで目的地の天体に向けて数年がかりでゆっくりと加速する。コース修正には2基の簡易で低出力な静電マイクロスラスタが用いられる。この陽極側には、プローブの電子機器を保護するため-190Vに荷電されたファラデーゲージが取り付けられている。このゲージは目標到着時には破棄される。このプローブのチップには、ソーラーパネル、センサー、マイクロプロセッサが組み込まれている。プローブは目標の天体に直撃しても大丈夫な程度に頑丈に作られており、これで表面のサンプリング調査を実施する。仮に90%のプローブが故障やロストした場合でも、天体の詳細な分析をするために十分なプローブが残されているだろう。- Atchison & Peck, *A millimeter-Scale Lorentz-Propelled Spacecraft*, 2007 (→)



マグビーム型ロボノーツ MagBeam Robonaut

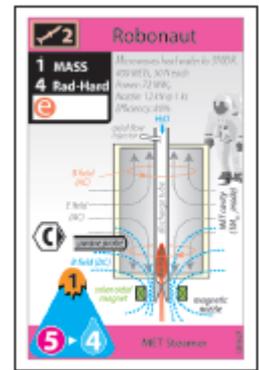
電流はBirkelandが「マグビーム」電流と呼んだ自己集束するプラズマビームの形態で空間を伝播できる。このマグビーム中のイオンと電子との差動運動により電流と磁場が形成され、またプラズマが生まれ出された際の磁場がそのプラズマのもとに留まり、それ自身で送電線を形成するのである。この磁界は継続的に拡大し、イオン流を収束させ続ける。これを発電所からヘリコンプラズマとして生成できれば、鉱物処理のほか、宇宙機にこのプラズマを受け取る小型の磁気セイルを生み出す電磁石を搭載し、推進体としてアルゴンやキセノンなどの少量のガスを搭載することで推力としても利用できる。セイルに捕らえられたビームがセイル内のアルゴンをイオン化し、この加速が推力を生み出すのである。これにより 20km/sec のデルタ v を生み出すために必要な試算は、ビーム密度が $2 \times 10^{13}\text{cm}^3$ 、速度が 30km/sec で、宇宙飛行士の質量10トン、推進体質量7トン、 300mW のスラスタで比推力 4ks の持続時間が4時間となる。このシステムをスラスタとして使用する場合、発電所には必要なエネルギーを蓄えるために数キロトンの蓄電器が必要となること、加速時間がビームの有効射程に依存すること、減速のためには目的地にも（訳注：減速用のビームを照射する）発電所が必要であることが挙げられる。- G. A. Landis, *Interstellar Flight by Particle Beam*, 2004. (→)



MET 蒸気式ロボノーツ MET Steamer Robonaut

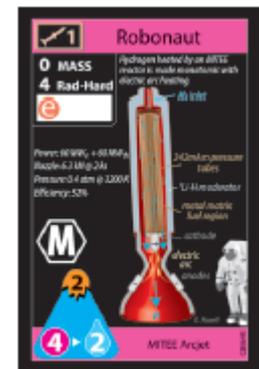
この装置は、推進体が充填された円筒状の共振空洞にマイクロ波を発生させ、この電磁結合によりプラズマ放電を誘発することで動作する。この放電は、採掘や推進に利用される。採掘に使用する場合、この先端にエネルギー供給を集中し、マイクロ波ガイドにより特定の鉱物や氷を共振粉砕するような様々な周波数に設定される。電熱スラスタ(MET)として使用する場合、このマイクロ波により維持さ

れたプラズマが水を加熱し、これにより熱力学的に膨張した水が磁気ノズルから噴射される。METはマイクロ波を発生させるために電極を必要としないため、水を推進体として使用できる（蒸気放電中の酸素原子は電極を溶かしてしまうという問題がある）。MET蒸気船はノズル内で発生する水素と酸素の急速な再結合により、放電源の温度が高くなるため(8,000K)、比推力は0.9ksに達する。安定化した渦により、軸対象の良好な流れを生み出される。しかし比推力は、スラスターの壁面が維持できる最大温度(~2,000K)に束縛される。例図はTM₀₁₁モードでインピーダンス整合させたマイクロ波プラズマ放電を描いている。最も強力な電界が空洞の軸沿いに集まり、これによりエネルギーの95%が推進体に集中し、放電管の壁面での損失は5%以下に抑えられる。冷却には回生水冷方式を使用する。圧力を45気圧とした場合、この各ユニットは30ニュートンの推力を発生させることはできる。アレイ化されたスラスターには、1基50kgのこのユニットが400個搭載される想定である。- John L. Power and Randall A. Chapman, *Development of a High Power Microwave Thruster, with a Magnetic Nozzle, for Space Applications*, Lewis Research Center, 1989. (→)



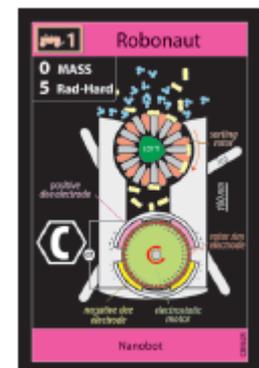
MITEE アークジェット式ロボノーツ MITEE Arcjet Robonaut

水素のような作動流体は、電気アークにより12,000Kまで加熱できる。レジストジェットのように固体コアを持つ電熱機関に収められているため、このアークジェットにはタングステンの融点を4倍に達する高温を与えて燃焼することができる。しかしこのトリウム=タングステン電極は定期的に交換する必要がある。これを電熱式スラスターとして使用する場合、低圧で作動させたアークジェットにより推進体を単原子水素に解離させることで、比推力は2ksに達しその凍結流効率率は52%となる。またこの推力は、7Li水素化合物の減速材に囲まれた内部に242Amのコアを取めた37本のベリリウム圧力管により構成されたMITEE炉とのハイブリッド化により、さらに増大させることができる。低温の水素推進体は幅1cmの燃料領域からこの炉心の中心軸に流れ込み、アークジェットに到達する前に3,200K以上に予熱されるのである。これを鉍石の選鉱に使用する場合、レゴリスや鉍石はMITEEアークジェットに流し込んで蒸発やアーク溶接処理される前に、1Tの磁気分離器と(3.5トンの)衝撃粉砕機により処理される。J. Powell & J. Paniagua, *Lightweight, High Specific Impulse (1000 Sec) Space Propulsion System, The MITEE Family of Compact Ultra Lightweight Nuclear Thermal Propulsion Engines for Planetary Space Exploration*, 1999.



ナノボット式ロボノーツ Nanobot Robonaut

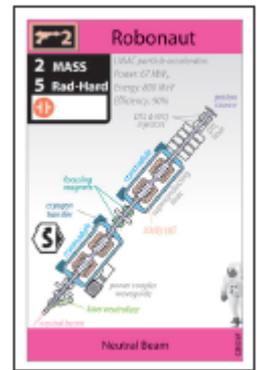
ナノサイズのレゴリスと鉍石収集機械により、選鉱をおこなうことが可能である。分子アSEMBラーが酵素のようなナノ構造を利用して反応性分子を操作するのである。生体模倣型技術に基づく機械的なナノボットは、生物学的なタンパク質分子（酵素とリボゾーム）を組み込むことで、こうした作業を実施できる可能性がある。例図のナノボットは、高周波駆動により稼働する脚を使用する。調和励振には、一对のナノチューブの内面に沿って刺が上下する構造の波形発生装置を用いた転位装置が使用される。波形発生装置により、周囲のドリルスプラインに対してこの振動刺が2本分だけ回転する。これにより選別ロータが、ヘリウム3のような指定された原子を選択するのである。これらの機構は、ヴァン・ダー・グラフ発電機の原理で作動するナノ静電モータにより駆動される。- K. Eric Drexler, *Nanosystems*, 1992.



中性子ビーム式ロボノーツ Neutral Beam Robonaut

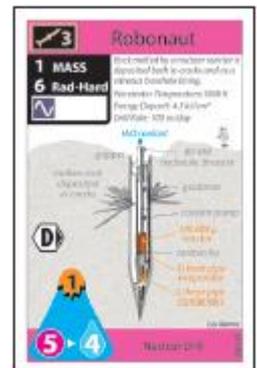
イオンビームは容易に加速することができるが、中性化しなければイオン同士の電氣的反発力により、宇宙空間でビームが急激に拡散してしまう。（またそのアーク放電がロボノーツ自体を損傷してしまうという問題もある）加速されるイオンは、正のイオンより高い中和効率を持つ負に帯電している。

この水素または重水素の中性子ビームは、800MeV までのパルスモードで作動し、レーザーよりも強力で採掘にも戦闘にも有効である。また燃焼した燃料を補充するため、プラズマを加熱して核融合炉に注入するためにも利用できる。プラズマ渦を生み出す場合には、チャンバー内の軸から外れた位置に中性子ビームを照射する。例図のデザインでは、高周波4重極(RFQ)のインジェクタを備えたデュドニコフ式高照度源を使用している。まずビームはアルバレー式ドリフトチューブ型ライナック(DTL)の共振部で85MeVまでブーストされる。次の超伝導ライナックでは、ビームのエミッタンス(10-8mrad)を抑えたままで、イオンのエネルギーを600MeVまで引き上げる。このビームは磁気式ビームステアリングにより精密に目標に集束され、最後にレーザー光脱離中和セルを通過することで余分な電子が除去される。 - Martin Reiser, *Theory and Design of Charged Particle Beams*, 1994. (→)



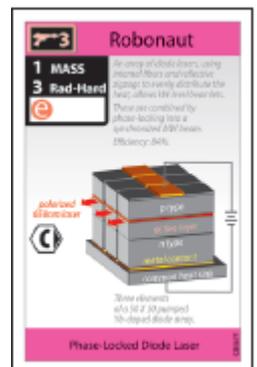
原子力ドリル型ロボノーツ Nuclear Drill Robonaut

立坑と試錐孔は、ISRUの効率化には極めて重要である。しかし鉱山が深い場所や硬い岩盤まで広がるにつれて、必要な電力と質量は急速に増加する。玄武岩の融点が1,500K程度であれば、4.3kJ/cm³のエネルギーを投入すれば岩盤を融解できる(対して回転式掘削機に必要なエネルギーは2-3kJ/cm³程度である)。原子炉の熱エネルギーはヒートパイプによりドリルの先端まで伝達され、岩石の融解温度以上に保たれる。ヒートパイプの内部は冷却端から熱源端まで作動流体を連続的に輸送する毛細管構造で裏打ちされている。閉鎖系の蒸発・凝縮サイクルであれば、高温側と低温側の温度差がほとんどない場合でも、かなりの効率で熱を伝達することができる。この高温の廃液を排出すれば、ドリルをスラスタとして使用することもできる。熱応力下では岩盤の壁面に亀裂が発生するが、このトンネルに機械的な圧力を加えることで、ドリルの先端で溶融した岩盤がこの亀裂に押し込まれ(この横押し出しにより)トンネル壁は補強されてゆく。この80,000kNの圧力は6本の油圧プッシャーパイプにより供給される。 - D.Armstrong, B.McInteer, et al. *Method and Apparatus for Tunneling by Melting*, United States Patent, 1972. (→)



位相同期ダイオードレーザー型ロボノーツ Phase-Locked Diode Laser Robonaut

ソリッド・ステートの基盤を使用し、熱放射スペクトルをダイオードの吸収線と一致させることで、出力電力の1/3に相当する熱を生み出す。しかし通常のダイオードレーザーは、出力が100mW程度に制限されることや、その開口の大きさからビームが発散(>10°)してしまうという問題を抱えている。これを埋め込み式のファイバーと反射性ジグザグスラブを使用することで、基盤全体に熱を分散しながらビームレットあたりの出力(10秒間でkW級)を向上させることができる。これをメガワット級まで引き上げるためには、複数のビームレットを組み合わせる必要がある。能動位同期コヒーレントビーム結合には、多数の偏光ビームレット素子の建設的干渉を利用する。それぞれの素子シードを高出力にポンピングする際に注意深く同期化することで、素子が数百個の単位まで増加してもビームの品質を一定に保つことができるのである。またこの種のレーザーは、機械的部品を必要とせずに電子的に操作することができる。 - G.Goodno, C.Asman, et al., *Brightness-Scaling Potential of Actively Phase-Locked Solid-State Laser Arrays*, 2007.(→)



や、（月の極地のレゴリスから焙焼された CaAl_2O_4 を使用した）ケイ素と硫黄不純物の除去などに使用される。

ウェイク場電子ビーム型ロボノーツ Wakefield e-beam Robonaut

電子ビームはさまざまな用途が存在する。岩塊に穴を穿ったり（採掘）、反動物質を加速して推進に用いたり（ロケット運用）、コンピュータ制御のカッターで材料を切削したり（製品製造）、レーザーの起動に使用したり（自由電子レーザー）、といった具合である。ウェイク場加速器は（フェムト秒単位の）短いレーザーパルスにより気体原子から電子をはぎ取り、これを押し出して加速する。残る原子は、電子欠乏領域に入って反発性の静電気力を発生させる。この最初にグループ化された電子により、効率的に連続する静電波が形成される。全長数メートルのウェイク場加速器は、全長数 km の一般的な rf 加速器に匹敵する加速を生み出すことができる。

100 万ボルト以上の電子ビームは、電子が光速を引き上げることから相対論的電子ビームと呼ばれる。これを電熱ロケットとして使用する場合、原理的にはアークジェットに近いものであるが、はるかに柔軟な推進体を使用できる。（恒星間ラムジェットで有名な）Bussard 博士は、相対論的電子ビーム加熱システム(QED: Quiet Electric Discharge) と呼ばれる機関を考案した。



24. リファイナリー・カード Refinery Cards ※未訳

ロケット方程式の暴力性から、ペイロードの 1 キログラムたりとも無駄にできないことは自明である。従って採掘ミッションで集められた原料は、無用な廃棄物を残して高純度に精製する必要がある。つまりほとんどの鉱石の選鉱は、地球近傍の中核的な精錬所ではなく、採掘地点の精錬所（訳注：リファイナリー）で実施しておく必要があるのである。一例として、LEO からバーンスペース 4 個分（デルタ $v = 10\text{km/sec}$ ）に位置する小惑星を採掘した場合を考えてみる。あなたのスラスターは MET であり、基本構造は水を電子レンジで蒸気に変え、これをノズルから 10km/sec で排出して推力を得るものである。鉱石を持ち帰るために必要な水の量はどれくらいになるだろうか？ロケット方程式によれば以下の通り：湿質量 = 乾質量 $\times e^{\Delta v / \text{排気速度}} = 2.71$ 乾質量となる。従って持ち帰ってくる原料 1 キログラム毎に、2.7 キログラムの水を消費することになる。例えば純度 1% のプラチナ鉱石が存在するなど、信じられないほど有望な鉱脈が存在する天体である場合でも、精錬せずに鉱石を回収してきた場合は持ち帰った鉱石の 99% が廃鉱滓となってしまう。そして持ち帰ってきた鉱石 1 キログラム毎に、271 キログラムの水を消費する必要があるのである。

（以下未訳）

25. ジェネレーター・カード Generator Cards ※未訳

本ゲームのスラスターの多くは、電力により推進体の水を加速している。このためには太陽光または原子力のいずれいれかを用いた発電機（訳注：ジェネレーター）が必要となる。各ジェネレーターはモジュール化のため 60MWe（メガワット電力）で標準化されている。もちろん生命維持装置や採掘用ロボノーツ、精錬所なども電気を必要とするが、本ゲームの電気ロケットが 60MWe もの電力を必要とするのに対し、これらの必要電力がメガワットに達することはほとんどない。GW 級ロケットも同様にジェネレーターを必要とするが、こちらは推進用ではなく核反応の起動用に用いられる。このイニシエーターとして投入される 60 メガワットの電力は、核分裂や核融合によるギガワット級の電力に比べれば取るに足りない規模である。一部のジェネレーターはパルス型 **pulsed** に設定されているが、これらはコンデンサやフライホイールに電気を蓄え、一気に放出する機能を持つ。

（以下未訳）

26. リアクター・カード Reactor Cards ※未訳

原子炉（訳注：リアクター）は、通常は核分裂か核融合により核燃料から熱エネルギーを生み出すものである。このエネルギーは推進、精錬、さらに発電などに利用することができる。リアクターの設計は、多くの場合いかに排熱を抑えるかという問題に支配されている。これには3種類の戦略が存在する：**定常型 stationary**, **爆発型 bomb**, **エキゾチック型 exotic**. 定常型リアクターは、基本的には最もクリーンである定常状態の反応を格納容器内で維持するもので、生成物を磁場チャンネル内に封じ込めた中性子核融合か、より汚染された生成物をオープンサイクル冷却で抑え込む核分裂のいずれかとなる。爆発型リアクターは、ロケットの外部で燃料に点火し、この荷電した反応生成物を磁気ノズルやアブレイティブ・ノズルにより受け流すことでエネルギーや推力を得るものである。この方式では、外部で反応させることでロケット本体に悪影響や廃熱を与えることなく、すべての厄介な中性子やガンマ線を宇宙空間に放出することができる。エキゾチック型リアクターは、核分裂や核融合のための起動装置として用いられる触媒を搭載したものである。

(以下未訳)

27. ラジエーター・カード Radiator Cards ※未訳

すべての宇宙機や宇宙ステーションには、太陽光、居住区、原子炉、そして機関からの排熱が蓄積されてゆく。都合の良い惑星や大気がなければ、輻射以外にこれらの熱を取り除く方法は存在しない。もしラジエーターが機能しなくなれば、宇宙機はいずれ溶解してしまうだろう。取り除ける排熱 = (放射率) × (ラジエーターの面積) × (ステファン・ボルツマン定数) × (温度)⁴となる。ラジエーターの大きさは放射温度の4乗に比例して小さくなるため、機関の温度を（例えば1,000Kから2,000Kに）2倍にすれば、ラジエーターの面積は1/8となる。またラジエーターの面積を変えずに2倍の高温で動作させれば、放射する排熱を8倍にすることができる。排熱の温度が低すぎる場合、本ゲームのラジエーターの基準動作温度である1,200Kまで加熱するための電気的なヒートポンプが必要となる。現用技術のヒートポンプで処理できるのは0.5MW/トン程度である。これがなければ、暑い排熱を放射するために数エーカーのラジエーターが必要となってしまう。本ゲームのGW級ロケットは、MW級ロケットの1,200Kではなく、先進的なより高温の1,427K付近で動作する想定となっている。これによりGW級ロケットではラジエーターの「熱量」1点分がMW級の120MWthではなく、240MWthと2倍の出力を放射していることになる。さらにTW級ロケットではより高温となり、熱量1点が2,000Kまたは960MWthに相当する設定となる。この領域では、断熱されたペイロード以外のロケット全体が白熱して輝くような状態となる。

(以下未訳)