

# 宇宙技術文明へのキーテクノロジー

## 「核融合ロケット」を設計する

中島秀紀

(Hideo Nakajima) 九州大学総合理工学研究所助教

### 「核融合ロケット」の 人類を宇宙に送り出す

「2019年の月面着陸50周年までに、火星に人類を送る」――1990年5月、アメリカのアリソン大統領はこう宣言した。現在、クエール副大統領を中心として、国家宇宙評議会(NSSC)やアメリカ航空宇宙局(NASA)等がその具体的な計画作りを進めている。

他方、ソ連でも、2010年頃までに有人火星探査を実施する長期構想がある。わが国においても、有人火星探査のための第一歩として、月面基地に関する検討が行われている。これは、宇宙開発時代の本格的な到来を告げるものであり、人間が地球から宇宙へとその活動領域を拡げていこうとする具体的な第一歩を指したものである。

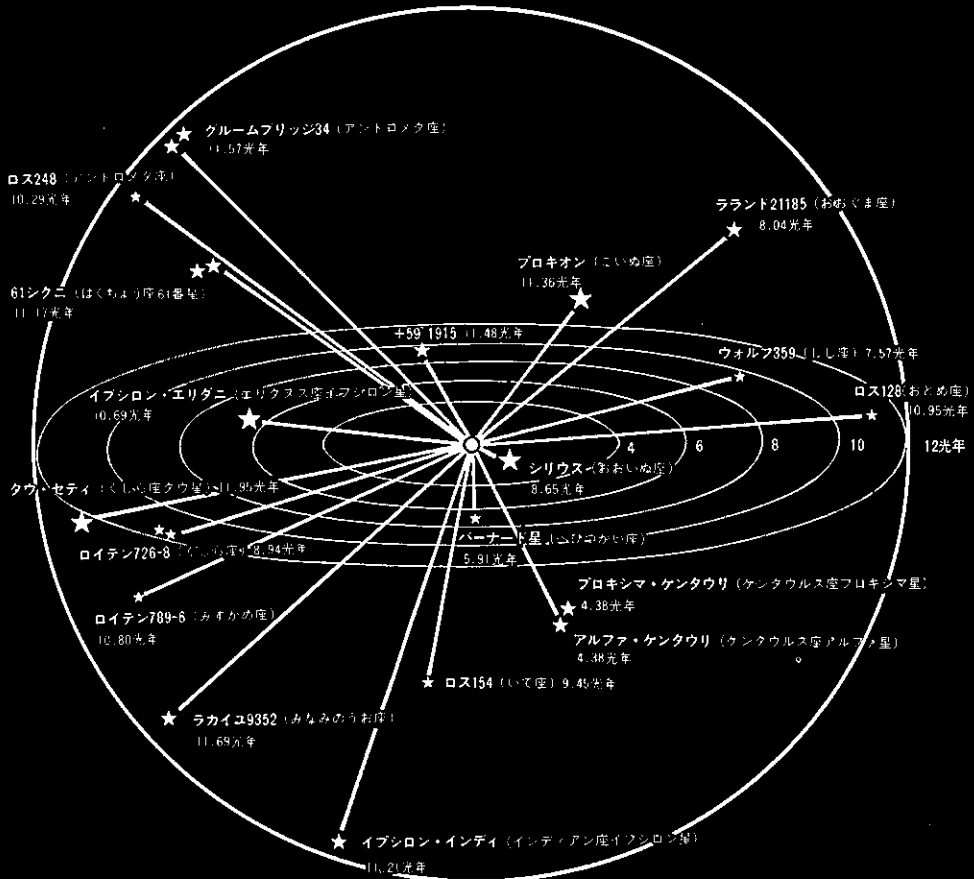
火星は、人類が地球圏外へ進出するとき、

比較的早い段階に定住できると考えられる唯一の天体である。火星の大气には二酸化炭素が豊富に存在し、地下には水が凍結した状態で眠っている。また、火星は地球人にとって次の居住地となるばかりではない。ここでの経緯は、他の惑星の探査・開発に重要なものとなるだろうし、前哨基地の役目も担うであろう。

しかしながら、近い将来、火星に恒久的な基地や居住施設を建設することを考えると、従来の化学ロケットで必要は何百トンもの資材を運搬することは容易ではない。そこで考えられているのが、「慣性核融合ロケット」である。

ロケットを高性能にするには高い「比推力」と大きい「比出力」を同時に満足させることが要求される。比推力というのは、燃料の燃焼によって生み出される推力(注1)を燃料の流量比で割ったものであり、それは燃料の排出速度に比例する。したがって比推力が高ければ、それだけ燃料が有効に使われることになる。一方、比出力は、ロケットの出力を機体の総質量(重量)で割ったものと定義される。機体の単位質量あたりの推力は比出力に比例するので、この値が大きいことは強い強力なエンジンを意味する。

図1(1ページ)に各種ロケットの比推力と比出力を示した。図の右上に位置するロケットほど性能がすぐれていることになる。化学ロケットは大量の推進剤を低い速度で排出するために推力、すなわち比出力は大きい。比出力は小さい。電気推進ロケット(イオン・ロケット)は、太陽や原子炉を利用して発電し、イオン等を高速に加速するために、排出速度、すなわち比推力は大きく、比出力自体はきわめて小さい。したがって、この推進システムだけでは加速段階に非常に時間がかかり、目的地に到着するまでに長い航行時間が必要になる。核分裂ロケットは比出力は高いが、冷却剤

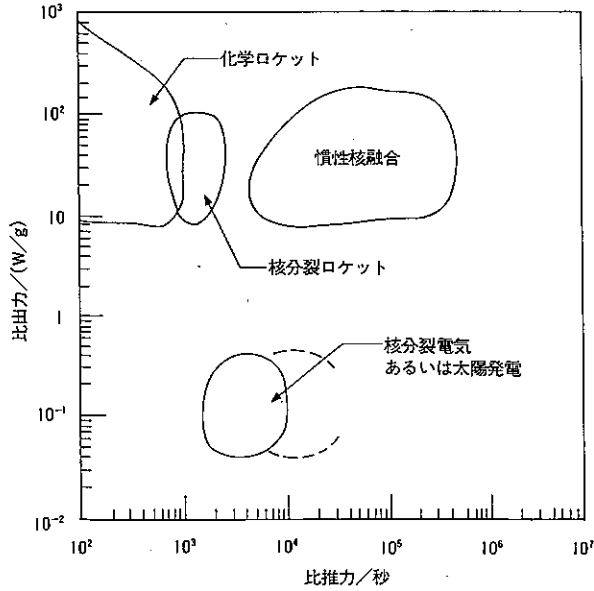


この図は、1～2世紀以内に入類文明が宇宙船を送り出す可能性のある太陽系近傍、12光年以内の恒星のすべて(観測可能なもの)を、そこまでの距離と方向によって示している。とはいえず、これらの星々までの距離は、太陽系内の惑星間の距離とは比べものにならない。地球から太陽系のもっとも外側の惑星、冥王星までを1メートルとしたら、もっとも近い恒星ケンタウルス座アルファとその伴星プロキシマまでは7200メートル、光速で4.3年かかる。図中、惑星系をもっている可能性のある星は、ケンタウルス座アルファ星、パーナード星、ラランテ(LAL)21185、はくちょう座61番星などである。これらの恒星に到達するには、化学ロケットや原子力ロケットでは何万年もかかってしまう。唯一、核融合ロケットが、現時点で実現性をそなえた推進システムである。

注1/推力  
98ページ1式 2式参照。

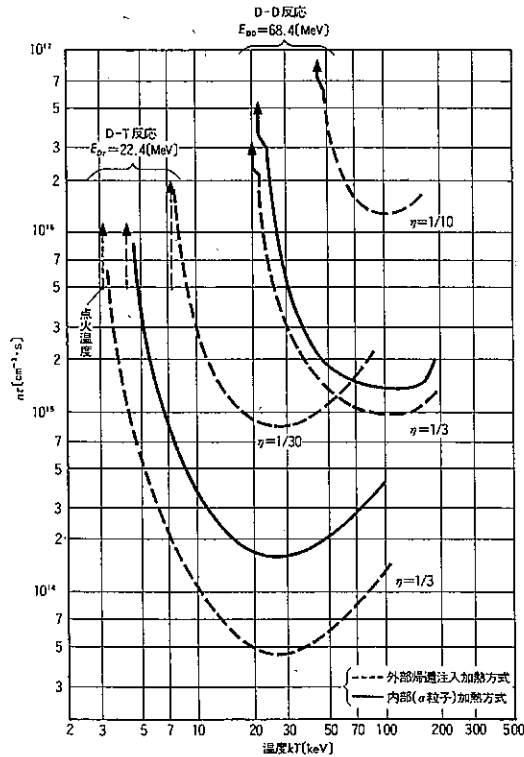
人間が自ら「宇宙人」となる未来を想像してから、まだ数十年しかたっていない。だが、技術文明の先頭を走る科学者たちが、月や火星はいうまでもなく、太陽系全域を、さらにはほかの恒星系をも目指す「核融合推進システム」を設計するに至った。

図1/各種ロケットの能力比較



恒星間を飛行したり、あるいは火星や他の惑星に基地を作るために大量の機材を運ぶようなロケットは、高い比推力と大きい比出力を同時に満たさなくてはならない。比推力が大きければ効率よく燃料を使うことができ、比出力が大きければ大きな推力を得られる。従来の化学ロケットや核分裂ロケットは比出力は高いが、比推力は小さい。また、太陽発電や核分裂炉を利用した電気推進ロケットは比推力は高いが、比出力が小さく加速に時間がかかる。しかし、核融合ロケットならこの2つを同時に満たし、少量の燃料で遠距離を高速で飛行できる。

図2/ローソン図



核融合炉開発の最大の指標であるローソン条件の図。図中、 $\eta$ はエネルギー変換効率、横軸はプラズマ温度、縦軸はプラズマの密度と閉じ込め時間の積で、図の右上にいくほど達成が難しい。核融合炉は放射線の上の領域に達したときにはじめて実現する。重水素-トリチウム(D-T)燃料は重水素-重水素(D-D)燃料に比べて点火しやすことがわかる。

を兼ねる推進剤の排出速度は、原子炉容器の融点などの制約のためあまり高くできません。比推力は大きくならない。これらと比較したとき、核融合ロケットでは、核融合反応で生じた高速のプラズマ粒子を磁場を介して直接推力へ変換するので、推進材料が高温で融けてしまおうといった融点の制約がなく、高い排出速度、すなわち大きな比推力が得られる。結局、近未来の技術を考えれば、高い比推力と大きな比出力を同時に満足させるものは核融合ロケットしかない。

取することも考えられている。しかし、いずれにしても、核融合反応は燃料の発生するエネルギーが1ミリグラムあたり340メガジュールと非常に大きいために、高温・高速のプラズマが容易に得られる。表1には、比較のため、化学反応と核分裂反応のエネルギー発生量を示した。ここでは、核融合反応はどのようにしてロケット推進に用いられるのかを、以下に見ていこう。

**核融合プラズマの噴出でロケットを推進させる**

人工的に核融合反応を生じさせるには、基本的に「慣性閉じ込め」と「磁場閉じ込め」の2つの方法がある。

慣性核融合ロケットでは、数メガジュールのレーザーまたは粒子ビームが燃料ペレットを圧縮・加熱し、核融合反応を生じさせる。個々のペレットの大きさは直径1センチメートル程度であるが、爆発すると1NT(トリニトトルエン)火薬数トン分に相当するエネルギーが発生する。このミニ爆発を連続して(たとえば毎秒30回)起こし、爆発で生じた高速のプラズマを磁場によって反射・放出してやれば、宇宙船を押し出す推力が生み出される。

磁場閉じ込めにもとづく核融合ロケットに関しては、1960年代後半、核融合炉の実用化への非常な楽観論が支配していた時期に、ミラー型にもとづく多くの概念設計

が提案されていた。ミラー型核融合は、2個の強力なソレノイド・コイルによってプラズマをコイルの中心に閉じ込める。このとき一方のコイルを弱くしてやると、そのコイルからプラズマが選択的に流れ出すようになる。このプラズマの流れを利用して推力を得ることができ(図3)。しかし現在では、ロケットを含めミラー型核融合に関する研究計画は世界を見回しても存在しない。

磁場閉じ込め方式では、トカマク型が核融合開発競争に一番先んじている。このため最近ではトカマク型にもとづく核融合ロケットが設計されている。トカマク装置は、ドーナツ型の磁力線の、容器の中に高温プラズマを閉じ込めて核融合を起こさせる。この磁力線の容器の一部を整形して磁気的なノズルを作り、そこにプラズマの流れを生じさせて推力を得る(図4)。核融合プラズマの閉じ込め性能を劣化させることなく、このような推力発生用の磁場配位を設計することが、この方法を成功させるためのポイントの1つとなる。

この方式の問題点は、プラズマを強力な磁場でおおおうように閉じ込めるため、磁場発生用のコイルが核融合反応で発生する中性子の照射を受けることである。そのため、前述したように、重い遮蔽体と、遮蔽体に落ちた中性子のエネルギーを捨てるための重い排熱装置が必要になる。したがって、ロケットへの応用を考えると、中性子発生量の多い重水素-トリチウム核融合反応は候補となり得ず、重水素-重水素反応、あるいは重水素-ヘリ

表1/各種燃料のエネルギー発生量

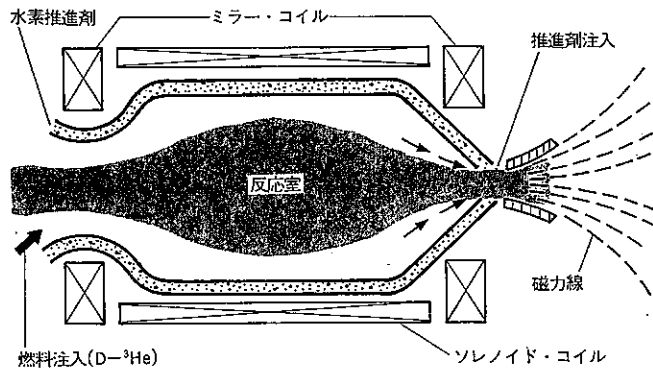
| 燃料    | 反応生成物                   | エネルギー発生量(kJ/g)       | 質量変換効率                |                       |
|-------|-------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 化学推進  | 液体水素/液体酸素               | 水、水素                 | $1.35 \times 10^7$    | $1.5 \times 10^{-10}$ |
| 核分裂推進 | ウラン233,ウラン235,プルトニウム239 | 中性子、核分裂片、 $\gamma$ 線 | $8.2 \times 10^{13}$  | $9.1 \times 10^{-4}$  |
| 核融合推進 | 重水素-トリチウム(D-T)          | ヘリウム、中性子             | $3.38 \times 10^{14}$ | $3.75 \times 10^{-3}$ |
|       | 触媒式重水素-重水素(D-D)         | 水素、ヘリウム、中性子          | $3.45 \times 10^{14}$ | $3.84 \times 10^{-3}$ |
|       | 重水素-ヘリウム3(D- $^3$ He)   | 水素、ヘリウム              | $3.52 \times 10^{14}$ | $3.9 \times 10^{-3}$  |
|       | 水素-ホウ素II(P- $^{11}$ B)  | ヘリウム                 | $7.32 \times 10^{13}$ | $8.1 \times 10^{-4}$  |

1) D-D反応で生ずるトリチウム、ヘリウム3をその場で燃焼させる方式。

この表は、各種の燃料が「燃焼」した結果発生する1キログラムあたりのエネルギーと、質量エネルギー等価法則から求められた質量のエネルギー変換効率を比較している。核融合反応はいずれも単位質量あたりのエネルギー変換効率が非常に高い。

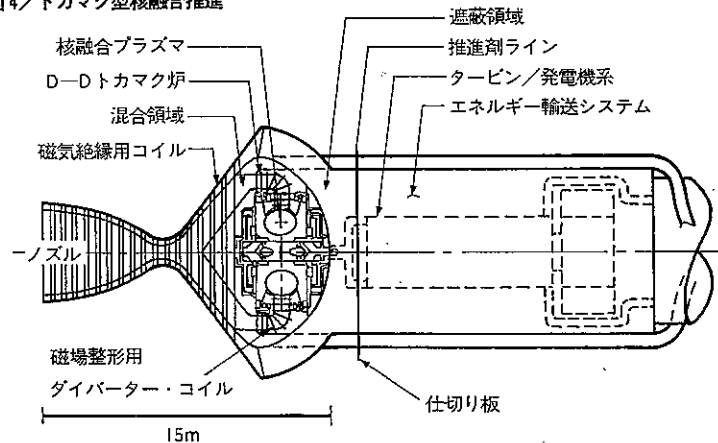
$8.2 \times 10^{13}$   
 $1.35 \times 10^7$   
 $1.35 \times 10^7 / 8.2 \times 10^{13} = 1.646 \times 10^{-6}$

図3/ミラー型核融合推進



磁場閉じ込め核融合の1つ、ミラー方式を応用したロケット推進システムの概念図。強力なコイルが作り出す磁場によってプラズマが反応室に閉じ込められているが、右側のコイルがやや弱いため選択的にプラズマがもれる。ここにノズルをつけるとプラズマが推進剤とともに噴出し、推力が得られる。

図4/トカマク型核融合推進



磁場閉じ込め核融合の中で研究がもっとも進んでいるトカマク方式を用いたロケット推進システム。ドーナツ型の磁力線の「容器」の一部をダイバーター・コイルによって整形して磁気的なノズルを作り、プラズマを噴出させる。  
資料/R.Bussard(1990)

に利用はできない。そこで実際にどの程度の推進剤がイオン化するかを状態方程式(EOS)や原子過程を組み込んだコードでシミュレーションを行って確認しておく必要がある。先に述べたように、核融合燃料のまわりに推進剤を配置することになれば、燃料ベレッ

トに直接ビームを照射する直接照射型(注2)よりもむしろ、ビーム・エネルギーを金属によって軟X線に変換してから照射するキヤノンボール(間接照射)型のターゲットのほうが有望だろう(図5)。推進剤にキヤビテ

を配置して、レーザー光は推進剤中にあけられた孔を通してキヤビティに導入される。このターゲットの欠点は、ターゲット構造が複雑になり、直接照射ターゲットに比較してより高度のターゲット製造技術が要求されること、またX線を放出させるために金など

### すぐれた核融合ロケットの条件は何か?

核融合ロケットは、推力を得るためにプラズマと磁場の相互作用を利用する。とくに慣性核融合ロケットの場合は、レーザー・ビームや粒子ビームの照射により核融合を引き起こしてプラズマを噴出し、これを何度もくり返すことにより推進する。くり返しをするためには最初に起こした核融合によって次のターゲットを照射するのに必要な電力を得なくてはならないが、これにやや足りないプラズマと磁場の相互作用(電磁誘導)を利用する。したがって、この方法が成功するには、高エネルギーの荷電粒子(プラズマ)が得られる燃料、高いエネルギー効率のドライバ(レーザー・ビーム、粒子ビーム)、ドライバが必要とする電力を生み出すコイルなどを開発しなければならない。

まず燃料ベレットには、核融合エネルギー、とりわけプラズマとなる荷電粒子のエネルギーが大きくても要求される。先に述べたように、重水素-ヘリウム3燃料、あるいは重水素-重水素燃料をベレットに利用すれば、核融合エネルギーのうち荷電粒子の割合が大きくなる。しかし、燃料を点火・燃焼させるための「爆縮」に大きなエネルギーが要求されることが予想され、現在考えられている5メガジュール(5000キログジュール)程度のドライバ・エネルギーでは、点火・燃焼は困難である。

次にベレットの構造を考えてみよう。核融合ロケットでは、推力を増大させる目的で核融合燃料の周囲に推進剤をおき、核融合エネルギーでこの推進剤をもプラズマ化する。核融合エネルギーを一定とすれば、推力 $F$ は、 $F = mV \sqrt{2m}$ と表せる。ここで $m$ は燃料+推進剤の質量である。核融合燃料のみでは数十ミigramだが、推進剤もプラズマ化するなら質量 $m$ は増大し、したがって推力も増加する。

一方、重水素-トリチウム燃料では、表2に示すように、核融合エネルギーの中で荷電粒子の占める割合は、ベレット中での中性子加熱の効果を考慮しても、せいぜい25パーセント程度であり、重水素-ヘリウム3の90パーセント、重水素-重水素の60パーセントなどと比較するときわめて小さい。しかし点火は容易であり、また最終的に利用できる荷電粒子のエネルギーも大きいものが期待される。

ただ、推進剤を大きくすると、それをプラズマ化するために余分のエネルギーが必要になる。たとえば水を推進剤として用いると、それをイオン化するには原子1個あたり13.6電子ボルトが必要である。したがって、固体水素1グラムの場合、1.31メガジュール(1310キログジュール)が必要となる。

推進剤をイオン化、すなわちプラズマ化しなければ、磁場との相互作用は起こらず、推力

すなわち、ここでゲイン、つまりドライバが消費するエネルギーとその結果起こる核融合反応で生じるエネルギーの比を $G$ 、荷電粒子の核融合エネルギー $E_f$ の割合を $\eta$ とすれば、 $G \times \eta$ は、外から与えられたエネルギーに対して荷電粒子がもつと考えられるエネルギーの大きさを表す。この値が大きいものは望ましく、この数値が燃料選択の際のメリットの指標となる。重水素-トリチウム燃料はゲインが高いため、候補になっている燃料の中でこの値がいちばん大きいと期待されているのである。

注2/直接照射型と間接照射型(直接ドライバと間接ドライバ)を138ページ注5。

注2/直接照射型と間接照射型(直接ドライバと間接ドライバ)を138ページ注5。

表2/核融合燃料の性能

| 燃料                 | ゲイン <sup>1)</sup> | 荷電粒子割合 | 荷電粒子エネルギー <sup>2)</sup> |
|--------------------|-------------------|--------|-------------------------|
| D-T                | 1500              | 0.25   | 1875                    |
| D-D                | 250               | 0.60   | 750                     |
| D- <sup>3</sup> He | 250               | 0.90   | 1125                    |

1) 「ヴィスタ」宇宙船(後出)で仮定されているベレット・ゲイン  
2) ドライバー・エネルギー5MJ、推進剤質量50gを仮定

図5/キャノンボール型ターゲットの爆縮過程

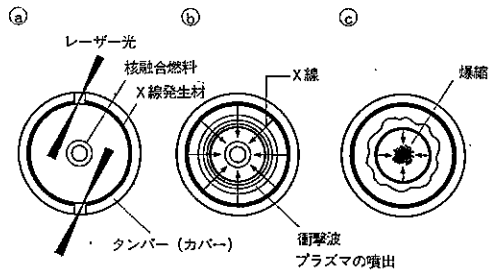
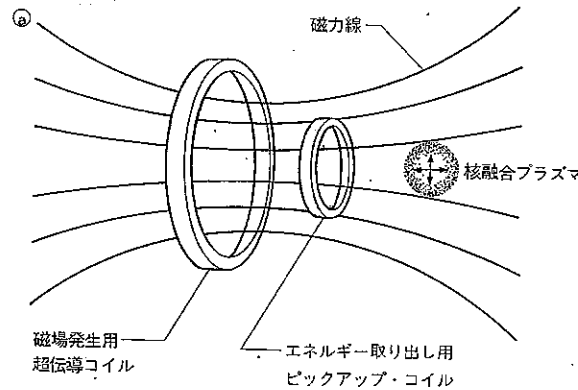
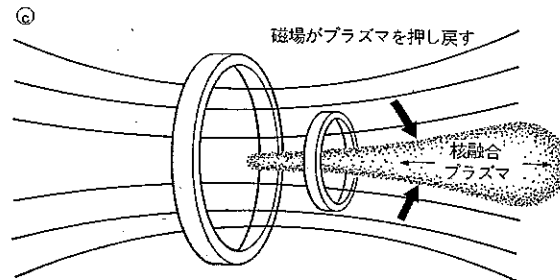
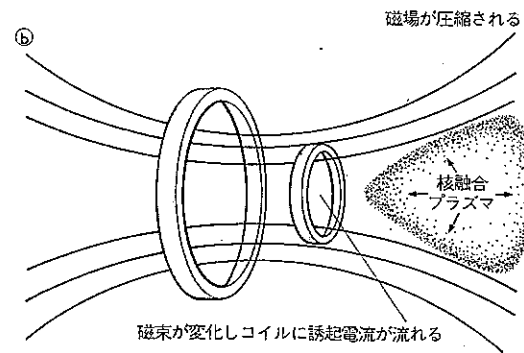


図6/慣性核融合ロケットの推進原理



ターゲットの孔に向けてレーザー光を照射すると、レーザー・エネルギーは外殻の内壁で反射をくり返しながら吸収される(a)。吸収されたレーザー・エネルギーはX線に変換されて放出され、それによってターゲットの表面がプラズマとなって噴出する(アブレーションという)(b)。この噴出の反作用によって内球が圧縮され、その後、外殻から噴出するプラズマが到達し反射されることによってさらに圧縮される(爆縮)。燃料球が中心付近まで圧縮されると、燃料のもつ運動エネルギーが内部エネルギーに変換して燃料が加熱され、核融合が起こる(c)。



核融合燃料は超伝導コイルが発生する強い磁場の中でプラズマとなって磁場を押し上げ(a)、自らの圧力でさらに膨張しようとする。しかし膨張することによって圧力が減少するため(b)、磁場によって押し戻され、右方に噴出して推力を生み出す(c)。磁場中に置かれたピックアップ・コイルには磁束の変化によって誘起電流が流れるが、この電流は次のレーザー照射のために蓄えられる。

余分な材料が必要になり、ターゲット質量が増加することである。最近では、粒子ビームをドライバーに用いる間接照射型ターゲットも考えられている。

次にドライバーについて考えてみよう。荷電粒子ビームは、最大25パーセントという高い効率を得られるという利点をもっている。しかし、とくに軽イオン・ビームなどは、同種の粒子のクローン反発力による空間電荷効果(注3)のため、離れたところにあるターゲット上での収束が悪い、つまり焦点が合っていないという欠点がある。慣性核融合ロケットでは10メートルくらい離れたところにある1センチメートルくらいのターゲットを狙う必要があるため、ビームの収束性は重要な問題である。この点、重イオン・ビームは案外であるが、何しろ加速器を含めた装置全体は直径数キロメートルにもなり、ロケット応用には大きすぎ、また重すぎる。一時期電子ビームも考えられたが、収束性の問題、また爆縮時に制動放射線(注4)が発生するためターゲットが先行加熱するという問題もあり、現在ほとんど考えられていない。

レーザーは収束性にすぐれており、自由電子レーザー、炭酸ガスレーザー、固体レーザー、エキシマレーザーの4種類がドライバーの候補に考えられている。これらのうち自由電子レーザーは高いエネルギー効率をもっているが、重イオンビームと同様、加速器が大きなものになるという問題がある。炭酸ガスレーザーも高効率という利点をもっているが、レーザーの波長が長く(つまりエネルギー

が低く)、ターゲットの爆縮の効率が悪い。また運転温度(注5)も4000Kと低く、宇宙空間への放射によって排熱することを考えると、排熱装置の質量が大きくなってしまふ。

固体レーザーは、今日慣性核融合の実験にいちばんよく使用されていて実績もある。短波長化、あるいは高効率化に向けての研究・開発も著しい。しかし、これもまた運転温度はせいぜい4000K程度で低いという欠点がある。

エキシマレーザー(注6)の1つであるフッ化クリプトンレーザーは短波長であり、高温運転可能、高くり返し照射が可能であるなど、ロケット応用ではもっとも有望であると考えられている。また、形の整ったパルスにする研究も進んでいる。これらのレーザーのほかにも、小さなドーナツ状のプラズマを加速してドライバーに使用する研究などが進んでいる。

さて、以上のような問題が解決されて慣性核融合推進システムが実現したとき、このロケットはどのようにして宇宙空間を飛行するのか? 核融合の反応室は、超伝導ソレノイド・コイルが強力な磁場を発生して、高温プラズマと化した核融合燃料は導電性のため磁場の侵入を防ぎ、磁場を押し上げながら膨張して磁場を圧縮する。しかしプラズマは膨張するにつれて圧力が低下してゆき、ついに磁場の圧力のほうが大きくなる。すると磁場はプラズマを押し返し、プラズマは向きを変えられて反応室の外へ放出される。その反作用としてコイル(宇宙船の船体に固定

されている)が力を受け、宇宙船が推力を得ることになる(図6)。

核融合反応で生じたエネルギーの一部は、磁場中に置かれたコイル(ピックアップ・コイル)によって次のレーザー・ビーム照射のために蓄えられる。ピックアップ・コイルを通る磁束がプラズマによって圧縮され変化するため、フレミングの電磁誘導の法則によってコイル中に起電力が生じるのである(図6)。1回の照射に必要なエネルギーを取り出すために要求されるゲイン(利得)は、荷電粒子割合のXレーザー効率、 $\alpha \times \text{ピックアップ・コイルの効率}$ の積の逆数となる。たとえば、荷電粒子割合が0.25、レーザー効率が0.06、ピックアップ・コイル効率が0.10とすれば、ゲインは約700が要求される。

本項では、核融合推進システムに求められることも中心的な要素技術として燃料ベレット、エネルギー照射用のドライバー、それに反応室がとらえるべき要件について概観した。しかし、核融合推進宇宙船の構成要素としては、ほかに燃料ロケットを始動するためのタンク、核融合ロケットを始動するための最大5メガワットくらいの原子炉、排熱のためのヒートパイプ、排熱装置、その遮蔽体などが、これらのコンポーネントを完成させる技術開発も同時に進められなければならない。それは困難な技術的挑戦ではあるが、人類文明が遠く宇宙へ拡がっていくこととするとき、必ず越えねばならないハードルなのである。

$$E_L \times G \times dp \times lp$$

$$= \frac{E_L}{n}$$

$$G = \frac{1}{dp \cdot n \cdot lp}$$

注3/空間電荷効果  
低エネルギーの荷電粒子のビームが同種粒子間のクローン反発力によって収束しにくくなる現象。この効果は電子のより軽い粒子のビームほど大きい。ビームのエネルギーが高くなると減る。すなわち電子は荷電粒子の流れつまり電流なので周囲に磁場が生じ、粒子間に引力が働く。したがってビーム速度が大きければ、一定のクローン力に対して磁場が大きくなり、ビームは収束しやすくなる。

注4/制動放射  
荷電粒子が電場によって加速されたときに放出する電磁波またはその放射の過程。一般には、物質中を高速で進む荷電粒子が物質の原子核のクローン反発力によって減速されたときに放射するX線、ガンマ線などの電磁波をいう。放射線量は粒子の質量の2乗に反比例するので、同じ大きさのクローン力を受けると、電子は軽い粒子ほど制動放射が起りやすい。

注5/運転温度  
ここでは使用されるレーザー媒体の温度をいう。単位面積あたりの放射熱量の4乗に比例して大きくなるので、媒体の温度、つまり運転温度の高さが、排熱装置をコンパクトにできる。

注6/エキシマレーザー  
エキシマレーザーは「基底状態」の分子1個とエネルギーが一定レベルで励起状態の分子1個が結合した二原子をエキシマ(excimer)と呼ぶ。エキシマが基底状態に移行するとき放射する光を利用するレーザーをエキシマレーザーという。エキシマは基底状態に戻るとすぐに分解してしまうため、同一波長の光を吸収してまた励起状態になることが、そのためのエキシマとして書かれたエネルギーを高効率で利用できるフッ化クリプトンレーザー、フッ化アルゴンレーザーなどは代表的なエキシマレーザーである。

# 「核融合ロケット」有力設計案

太陽系内ミッションから恒星間飛行まで

中島秀紀 (Hideki Nakajima) 九州大学総合理工学研究科助教授

ここで、慣性核融合ロケットの研究の歴史を簡単に振り返ろう。これまでにさまざまな概念設計レベルの核融合ロケットが提案されてきた。しかし、それらの中には、現在では実現の可能性が低いと評価されている方式もあるので、これらについては簡単な説明にとどめておきたい。

しかし、新しいアイデアを生み出そうとするとき、いまはあまり評価されない設計の中に重要なヒントが隠されていることが少なくない。したがって、研究の歴史を振り返ることもまた、新しい研究の重要な一部をなしているといえる。

太陽から5.9光年離れたバーナード星に向かう核融合ロケット「ダイダロス」。バーナード星は暗い赤い星で、惑星系をもつのではないかと考えられている。ダイダロスはこの惑星系を観測して地球にその情報を伝えるため、光速の12パーセントの速度で50年という時間をかけて無人飛行する。バーナード星に接近したときからダイダロスの観測は始まり、速度をゆるめることなく飛行する。その後、ダイダロスはわずか20時間でバーナード星系を通り過ぎてふたたび宇宙空間に飛び出し、2度と地球には戻らない。ダイダロスとはギリシア神話の中のクレタ島の迷路を作った名工だが、彼は後に王に幽閉されたために、ロウの翼を作り、息子イカルスとともに飛び立って島を逃げ出したという。

F・ウインターバーグ

# 電子ビームで点火する核融合ロケット

1971年、アメリカ、ネバダ大学の物理学教授フリードワルト・ウインターバーグ(下写真)は、電子ビームをドライバーとし、火星に1週間で到達する核融合ロケットを提案した(左ページイラスト、図1)。

このロケットでは、核融合反応は半球殻状の反応室の中心で起こる。反応室の内部は超伝導コイルによって発生する磁場で満たされている。まず、重水素トリチウム(D-T)の核融合燃料ペレットが投射装置から打ち出される。ペレットが反応室の中心に達したときに電子ビームが照射されると、核融合燃料とその周囲の水素推進剤が核融合反応を起こしてプラズマ化する。このプラズマは周囲の磁場を一度押し拡げて圧縮するが、たちにはね返される。磁場がこうしてバネのよう作用してプラズマを半球殻の開口側(後方)に押し出すことにより、宇宙船が推力を得るのである。

ここで用いられる燃料ペレットは半径約2ミリメートルの小球である。このペレットでは、重水素トリチウム燃料の外側が中心部を慣性的に閉じ込める作用をし、爆縮は起こらない。重水素トリチウム燃料の外側はウランの殻に包まれており、この殻は、中心部の燃料の核融合反応で発生する中性子により核分裂反応を起こす。このウラン殻の外側はさらに、推力を増強するための水素推進剤で包まれている。

ウラン殻と水素推進剤には両者を貫通する穴があけられており、電子ビームはこの穴を導って内部の重水素トリチウム燃料へと導

ミニ核融合をくり返してロケットを推進させようというアイデア(パルス核融合推進)を最初に提案したフリードワルト・ウインターバーグ。彼は慣性核融合研究のパイオニアだが、1979年、この核融合による推進システムの研究によって「ヘルマン・オーベルト・ゴールドメダル」を受賞した。写真/矢沢 潔



かれる。この方式は、電子ビームが作り出す磁場によって核融合反応で生じる熱の伝導が抑制されるなど、後述の磁気絶縁型に似ている。ちなみに電子ビームは、マルクス発生器ブルームライン線路などの、いわゆるパルスパワー技術(注1)によって発生させる。

表1にこの核融合ロケットのパラメータを示した。燃料消費量を最小にして燃料コストを抑える低比推力の場合と、推進剤を用いない高比推力の場合を比較している。排出速

注1/パルスパワー技術  
レーザー光や電子ビームは高出力を持続的に維持することはできないが、瞬間的に発生させることはできる。瞬間的・空間的に電磁エネルギーを集中して瞬間的に、つまりパルスとして発生させる技術をパルスパワー技術という。荷電粒子ビームの生成、高温プラズマの生成には不可欠の技術である。

表1/電子ビーム核融合ロケットのパラメータ

| パラメータ         | 低比推力                | 高比推力                 |
|---------------|---------------------|----------------------|
| 核融合出力(J)      | 10 <sup>10</sup>    | 10 <sup>10</sup>     |
| くり返し率(ショット/秒) | 3                   | 3                    |
| 排出速度(m/秒)     | 6.2×10 <sup>4</sup> | 10 <sup>6</sup>      |
| 比推力(秒)        | 6,320               | 1.02×10 <sup>5</sup> |
| 推力(N)         | 9.7×10 <sup>8</sup> | 6×10 <sup>8</sup>    |
| 宇宙船質量内訳(トン)   |                     |                      |
| ドライバー         | 200                 | 200                  |
| 燃料            | 4.7                 | 1,200                |
| 推進剤           | 1,200               | 0                    |
| 初期質量          | 1,500               | 1,500                |
| 積載物           | 100                 | 100                  |

資料/F. Winterberg (1971)

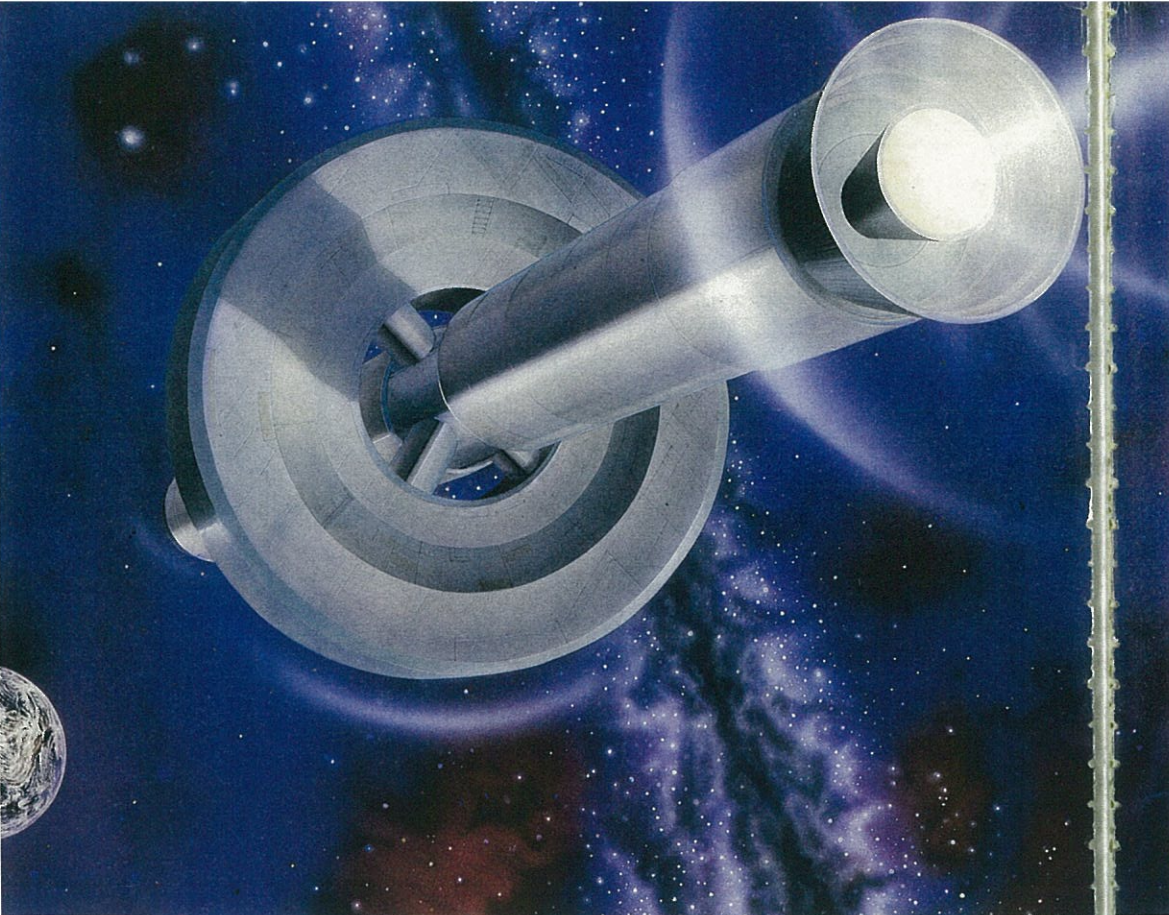
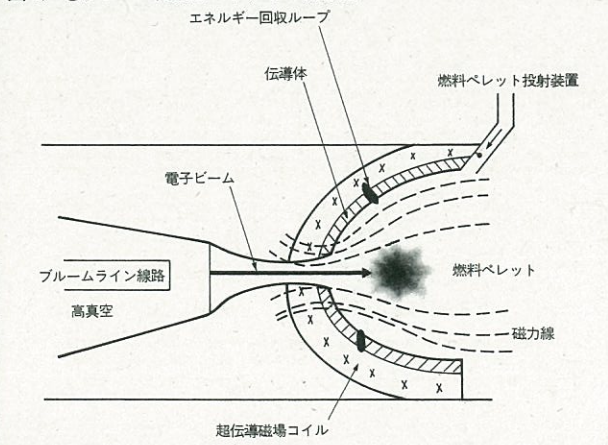


図1/電子ビーム核融合ロケットの概念図



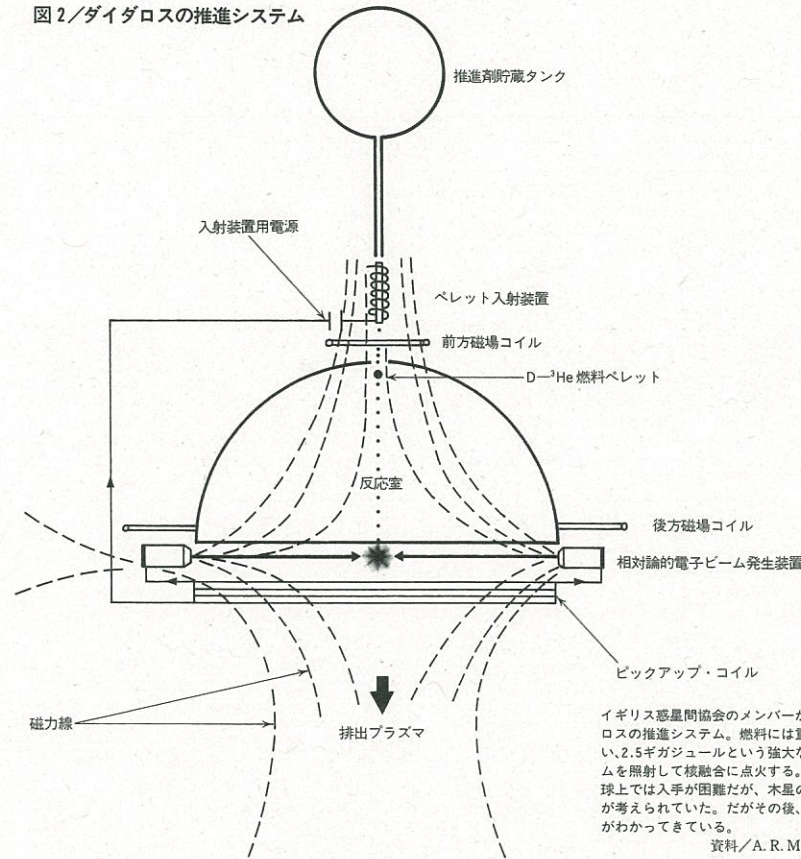
ウインターバーグが1971年に発表した核融合ロケットの推進原理。投射装置から燃料ペレットが打ち出され、これが反応室の中央に達したとき、電子ビームが照射されて核融合反応が起こる。このとき発生するプラズマと磁場の相互作用によってロケットは推進する。

パルス推進で宇宙を航行する慣性核融合ロケット。電子ビームで燃料ペレットに点火してミニ核融合を連続的に起こしながら推進する。錠剤ほどの大きさのペレットでもTNT火薬10トン分のエネルギーが放出され、わずか1週間で火星に到着するという。  
イラスト/本原康彦

いる。  
ウインターバーグのこの宇宙船はミニ核融合、つまり「パルス核融合」にもつくロケットの潜在的可能性を示した最初の提案となった。しかし、エネルギー・ドライバーのところでも言及したように、現在は電子ビームによる核融合点火は将来性がないと見られるようになっており、このアイデアの研究はほとんど行われていない。

# バーナード星を目指す「ダイダロス計画」

図2/ダイダロスの推進システム



イギリス惑星間協会のメンバーが詳細に設計したダイダロスの推進システム。燃料には重水素-ヘリウム3を用い、2.5ギガジュールという強大なエネルギーの電子ビームを照射して核融合に点火する。燃料のヘリウム3は地球上では入手が困難だが、木星の大気から採取することが考えられていた。だがその後、月面で入手できることがわかってきている。

資料/A. R. Martin, A. Bond (1978)

1973年から78年の間に、アラン・ボンドライギリス惑星間協会の会員13人が恒星間飛行を想定した宇宙船「ダイダロス」の設計を行った。ダイダロスのミッションは、太陽から5・9光年離れたバーナード星にあると思われる惑星系である。彼らはここに光速の12パーセントの速度で50年間の片道飛行を行い、4500トンの科学観測機器を側方通過（フライバイ）させようと考えたのである。

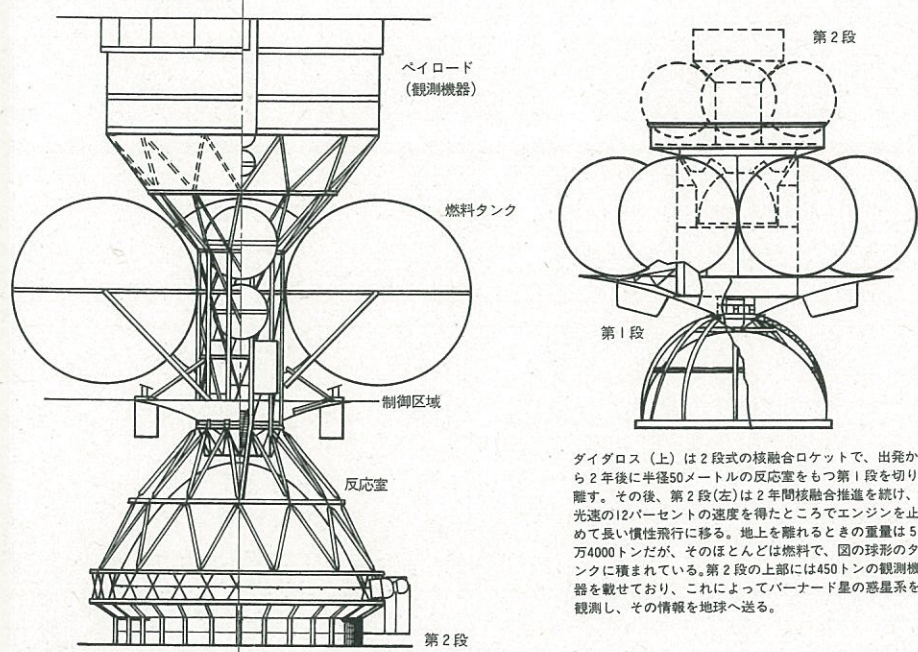
ダイダロス宇宙船（116ページイラスト、図2、3および表2参照）は2段式であり、出発から約2年後に第1段を切り離す。第2段はその後約2年間、核融合で推進し続けた後、エンジンを止めて数十年にわたる慣性飛行に移る。この核融合ロケットは重水素-ヘリウム3（D-He）のペレットを核融合燃料とする。このペレットの中心部には、点火を容易にするために重水素トリチウム（D-T）が装荷されている。

ダイダロスの第1段では、毎秒250回、2.5ギガジュール（250万キロジュール）の電子ビームを数グラムの燃料に打ち込んで核融合を起こさせるが、このときの出力は10ワット（100億キロワット）にも達する。ペレット・ゲインは約1000である。

他方、第2段は、電子ビームのエネルギー、燃料の質量、核融合による出力ともに、第1段よりはるかに小さい。しかしプラズマの排出速度はほぼ等しい。平均推力は第1段が7・54メガニュートン、第2段が0・66メガニュートンである。

また、これらの推進システムは、第1段の

図3/ダイダロスの概念図



ダイダロス（上）は2段式の核融合ロケットで、出発から2年後に半径50メートルの反応室をもつ第1段を切り離す。その後、第2段（左）は2年間核融合推進を続け、光速の12パーセントの速度を得たところでエンジンを止めて長い慣性飛行に移る。地上を離れたときの重量は5万4000トンだが、そのほとんどは燃料で、図の球形のタンクに積まれている。第2段の上部には450トンの観測機器を載せており、これによってバーナード星の惑星系を観測し、その情報を地球へ送る。

表2/核融合ロケット「ダイダロス」のパラメーター

| パラメーター         | 第1段                | 第2段                 |
|----------------|--------------------|---------------------|
| 推進剤質量 (トン)     | 46,000             | 4,000               |
| 排出速度 (m/秒)     | $1.06 \times 10^7$ | $0.921 \times 10^7$ |
| 燃焼時間 (年)       | 2.05               | 1.76                |
| 点火方式           | 相対論的電子ビーム          |                     |
| 推力 (N)         | $7.54 \times 10^6$ | $6.63 \times 10^6$  |
| くり返し率 (ショット/秒) | 250                | 250                 |
| 積載物質量 (トン)     |                    | 450                 |

質量が944トン、核融合を起こす反応室の半径は50メートルであり、第2段の質量は220トン、反応室の半径は20メートルである。核融合で発生したプラズマを押し返して宇宙空間に排出・噴射させるための磁場は、4組の超伝導コイルによって発生させる。このアイデアでは、前出のフリートワル

ト・ウインターバークの提案と同様、反応室の磁場強度は非常に弱い。第1段では0・03テスラ（300ガウス）、第2段では0・07テスラ（700ガウス）である。磁場のエネルギーも、プラズマのもつエネルギーに比べて小さい。これは後出のローリック・ハインの設計とは対照的である。

核融合反応で生じたプラズマが膨張するにすぎない、磁場は、プラズマ外側の境界と反応室の金属（モリブデン）製の殻の間で圧縮される。このような設計で弱い磁場を使うことの利点は、磁場発生用のコイルの質量を軽くできることであり、また超伝導コイルの使用も考えられる。この場合はさらに、核融合によって生じる中性子に対する遮蔽問題が軽減されるという長所もある。一方欠点としては、金属殻が中性子や熱放射を受けて熱負荷が大きくなるほか、強い磁場コイルを用いる場合に比べて推進効率が低いという問題が生じる。

ダイダロス宇宙船の出発時の総重量は5万4000トンだが、そのうちの約5万トンは燃料であり、平均加速度0・011〜0・1Gで50年間の無人飛行を行う。観測機器の重量は450トンである。

なお、燃料のヘリウム3は木星の大気から採取するという前提であったが、現在では月面から入手することが考えられる。また電子ビームを使用することの問題点については前述の通りである。ギガジュール級のドライブは著者には想像もつかないが、遠い将来にはそういうものが作られるかもしれない。

# レーザー核融合ロケットで 太陽系の果てまで1年で飛行

1972年、アメリカ、ローレンス・リバモア国立研究所のローデリック・ハイデラによってレーザー核融合ロケットが提案された。当時、レーザーについてはまだよく知られておらず、アメリカでは高度な機密とされていたこともあり、レーザーという言葉自体がもつ響きによって、発表と同時に全米の研究者たちの話題をさらったといわれる。図4にその宇宙船の概念図を、また表3にパラメータを示す(左イラスト)。

この宇宙船では、毎秒500回の核融合爆発が生じる。燃料ペレットは加速器から秒速2・5キロメートルで打ち出され、100メートル離れた半球形の反応室の中心に達する。その瞬間にレーザーが発射され、ミラーで反射されて8方向からペレットを照射する。このレーザーのエネルギーは1メガジュール、核融合出力は125メガジュールとされているので、ペレット・ゲインは125である。使用されるレーザーは、1500Kという高温運転と最大30パーセントの高効率を実現するため、水銀ガスレーザーを選択している。

このレーザーは図4に示すような円柱形をしており、その長さ方向にヒートパイプ(124ページ注2)で構成される2つの放射排熱フィンをもっている。1つのフィンの大さは61×23メートルである。ペレットの主燃料は重水素-重水素(D-D)であり、点火を容易にするため、これと別に少量の重水素トリチウム(D-T)を使用する。核融合出力のうち30パーセントは等方的に発生する熱放射と中性子であり、これらは磁場により向きを変えさせることはできない。このエネルギーは設計では最大18ギガワット(1800万キロワット)にも達するので、発生源からみた宇宙船構造物の立体角を図5に見るようになるべく小さくする必要がある。反応室は2つのコイルにより磁気ミラー(反射鏡)を形成している。前方の小さなコイル(図中のSコイル)のほうが磁場が強く、プラズマはこの磁場によって向きを変えられ、後方の大きいコイルから宇宙空間に放出される。コイルにはニオブチタンの超伝導体を用いる。核融合爆発点付近の磁場の強さは約0・

5テスラ(50000ガウス)である。ペレット1個の質量を15ミリグラムとすると、プラズマの排出速度は秒速3260キロメートル、推力は2万4400ニュートンとなる。なお、核融合で発生した荷電粒子(プラズマ)エネルギーのうちの約6パーセント、5メガジュールはビックアップ・コイルによって取り出され、電送線を通して蓄電器に貯蔵され、次のレーザー照射に用いられる。この推進システムの荷電粒子の出力は85メガジュールなので、ビックアップ・コイルで取り出した以外の80メガジュールが、宇宙船の推力として利用されることになる。

中性子の遮蔽体は厚さが1・3メートルで、材質は水素化リチウム(LiH)と重水素化リチウム(LiD)よりなる。リチウム6と中性子によって生じたトリチウムは回収されて燃料ペレットに用いられる。ただ、燃料ペレットの設計の詳細についてはデータが不足している。この核融合推進システム的全質量(重量)は300トン、そのうち半分をレーザーが占めている。設計者によれば、この宇宙船は太陽系内のどの地点へも1年以内で到達できるとしている。この設計を提案している論文は設計手法にまで言及している点で興味深い。

## 11年後に出された 新たな設計案

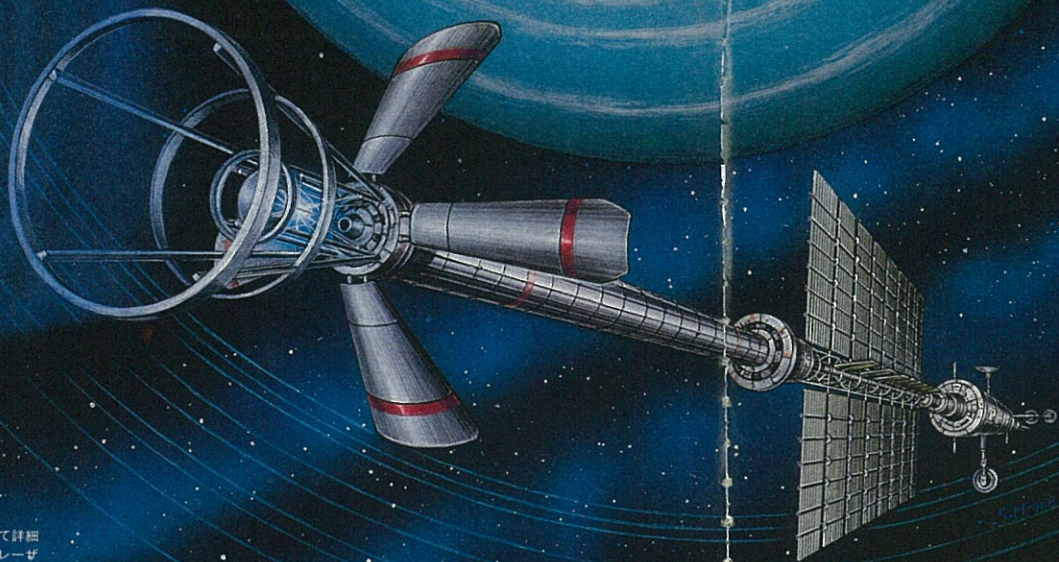
前記の設計から11年後の1983年、ローデリック・ハイデラは、コンピュータ・シミュレーションを駆使したさらに詳細な設計を発表した(125ページ図6および表4)。

この核融合ロケットの設計でも、燃料はやはり重水素-重水素(D-D)であり、点火を容易にするために少量のトリチウム(T)を用いる。重水素-重水素燃料のペレット・ゲインは1000を仮定しており、表3の値に比較すると大きい。ここでは核融合出力のうち64パーセントは、宇宙船の推力に用いられるプラズマのエネルギーである。

レーザーは2メガジュールのフックアップトン(KrF)レーザーで、200基のレーザー増幅器を用いる。図7(125ページ)はその1基の概念図である。図中央部にある円筒形のレーザー室は円周上で5つに分けられており、毎秒10回の速度で回転し、電子ビームによって励起される。レーザー室は1000Kで運転され、効率は6パーセントである。冷却にはナトリウムのヒートパイプが用いられ、900Kの熱放射によって排熱される。

反応室の磁場発生用コイルは半径6・5メートル、電流22メガアンペアのバナジウムガリウム(VaGa)の超伝導体で、磁場強度はピーク値で15・8テスラで、4・8K(約マインナス268度)で運転される。発生磁場のエネルギーはプラズマの運動エネルギー(1300メガジュール)の約5倍である。磁場発生用コイルは、前出の設計と違い、1基だけである。

中性子遮蔽体はリチウムと水素化リチウムからなり、モンテカルロ・コード(注3)を用いて中性子とガンマ線の輸送が解かれている。この遮蔽体は、リチウムを利用したトリチウム増殖用のブランケットを兼ねている。



ローレンス・リバモア国立研究所の研究者によって詳細な概念設計が行われたレーザー核融合ロケット。レーザーという言葉のもつ響きから、発表と同時に全米の科学者の話題をさらったという。当時、レーザーはアメリカでは高度な機密であったということもあり、まだ一般には知られていなかった。このロケットは太陽系のどこへでも1年以内で飛行することができるとされている。

イラスト/長谷川正樹



図6/レーザー核融合ロケットの新設計(1983年)

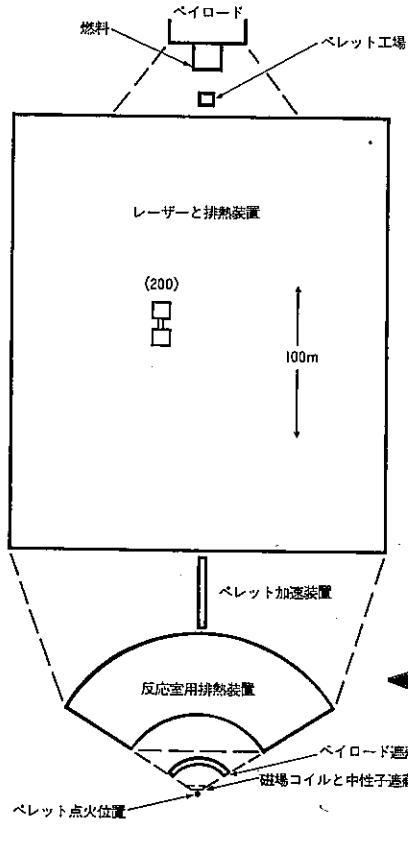


表4/レーザー核融合ロケットのパラメータ(新設計)

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| レーザー・エネルギー (MJ) | 2               |
| 核融合出力 (MJ)      | ~2000           |
| 荷電粒子出力 (MJ)     | 1280            |
| くり返し率 (ショット/秒)  | 100             |
| D-D燃料質量 (mg)    | ~15             |
| 最大推力 (N)        | $3 \times 10^6$ |
| 比出力 (W/g)       | 110             |
| 推進効率 (%)        | 65 (電動量)        |
| 宇宙船重量内訳 (トン)    |                 |
| レーザー・システム       | 262             |
| 反応室             | 166             |
| 乗算遮蔽材           | 17              |
| 燃料タンク           | 16              |
| 始動用原子炉          | 5               |
| 構造支柱            | 20              |

資料/R. Hyde et al. (1983)

1983年にふたたびハイデラが発表した新しい核融合ロケット。機体質量は、466トンと72年の設計よりも増え、補助用の核分裂炉もつけている。また機体の中心軸から少しずれたところで核融合爆発を起こすことによって方向転換を行うこともできる。この新たな設計では、1500トンの貨物を搭載していても、冥王星へ1年以内で到達できるといふ。

図7/フッ化クリプトン・レーザー

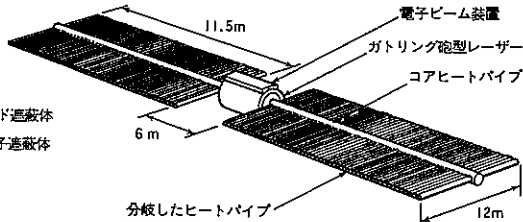


図6のロケットが用いるフッ化クリプトンレーザー。図の中央部にある円筒形のレーザー室は5つに区分されていて、毎秒10回の速度で回転している。このレーザー室の中の気体を電子ビームによって照射して励起させ、レーザーを発生させる。このレーザー装置は200基用いられる。

この推進システムの効率を考慮すると、推力に利用できるパワーは54・1ギガワット(5410万キロワット)であり、比出力(噴射ガスの出力を宇宙船の全質量で割った値)は110ワット/グラムにも達する。このシステムを前出の1972年の設計と比べると、ペレット・ゲインは8倍になっている(表3と表4参照)。

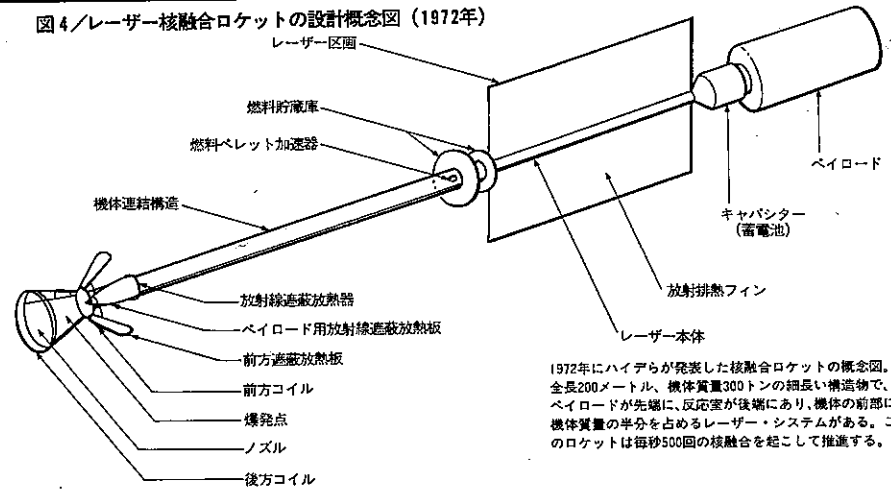
この宇宙船の性能は、片道航行を考えると、荷物をほとんど積まないいわゆる、VIPミッションでは地球の周囲軌道から火星まで9日間で到達し、また15000トンの貨物を積んで冥王星を目指した場合、1年たらずに目的地に到達できるとしている。

強する。これらの重水素は重さ16トンのタンクに貯蔵される。

ミッションとミッションの間、あるいは慣性飛行中は宇宙船の核融合ロケットは駆動していない。この間に必要な電力を供給するのは補助用の核分裂炉である(質量5トン、出力1メガワット)。核融合推進システムを始動あるいは再始動させるときにはエネルギー・ドライバの蓄電器に充電し、レーザー・ガスを加熱しなければならぬが、このときにも核分裂炉が使用される。

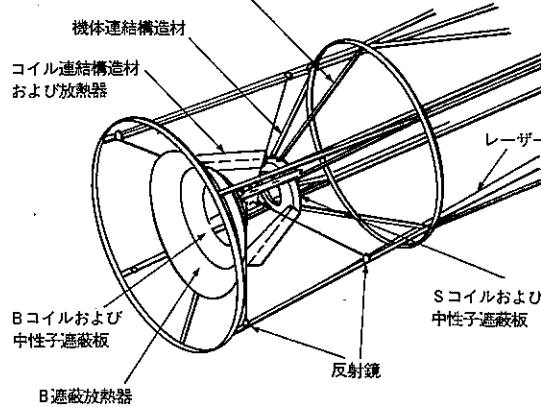
電磁流体シミュレーション(注4)の結果、反応室で生じる核融合のエネルギーの推力への変換効率は、運動量で計って65パーセント、またエネルギーでは42パーセントであった。推進システムの質量は486トンだが、そのうちレーザー装置が約50パーセントを占めている。

図4/レーザー核融合ロケットの設計概念図(1972年)



1972年にハイデラが発表した核融合ロケットの概念図。全長200メートル、機体質量300トンの細長い構造物で、ペイロードが先端に、反応室が後端にあり、機体の前部に機体質量の半分を占めるレーザー・システムがある。このロケットは毎秒500回の核融合を起こして推進する。

リチウム6供給・回収パイプ 図5/推進システム



上の図の推進部分を拡大したもの。燃料貯蔵庫から燃料ペレットが秒速2.5キロメートルに加速されて後方に打ち出される。ペレットが反応室に達した瞬間、レーザーが8方向から照射されて核融合が起こる。これによって発生したプラズマは、前方のコイル(Sコイル)の強い磁場によって反射され、後方へ噴出される。

図6に示すように、燃料ペレットの点火位置から20メートル離れたところにペイロード用の遮蔽体がある。燃料ペレットはペレット加速装置から秒速2キロメートルで打ち出される。このとき、軸上より少し離れたところで核融合爆発を生じさせることによって発生する推力のベクトルの向きを制御し、宇宙船の方向転換を行う。

反応室の排熱装置(ヒートパイプ)のリチウムの中に存在するトリチウムは取り出されてペレット工場へ運ばれ、ここで重水素-重水素からなる主燃料に添加される。この燃料と同様、推進剤にも重水素を用いて推力を増

表3/レーザー核融合ロケットのパラメータ

|                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| レーザー・エネルギー (MJ) | 125                |
| 核融合出力 (MJ)      | 85                 |
| 荷電粒子出力 (MJ)     | 500                |
| くり返し率 (ショット/秒)  | 0.015              |
| ペレット質量 (g)      | $3.26 \times 10^6$ |
| プラズマ噴出速度 (m/秒)  | $3.33 \times 10^6$ |
| 比出力 (W/g)       | $2.44 \times 10^6$ |
| 推力 (N)          |                    |
| 宇宙船重量内訳 (トン)    |                    |
| レーザー・システム       | 15                 |
| 反応室             | 54                 |
| 乗算遮蔽材           | 17                 |
| 冷却系             | 9                  |
| タンク             | 25                 |
| その他             | 44                 |
| 構造物             | 100                |

\* MJ=100万ジュール 資料/R. Hyde et al. (1972)

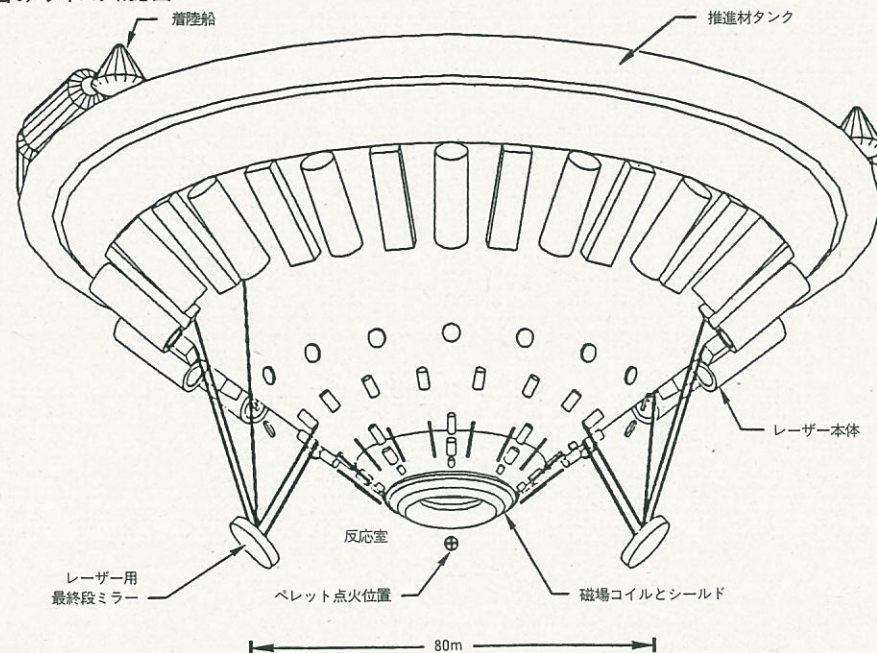
注2/ヒートパイプ 内に変化(相転移)しやすい液体(作動流体)を入れ、その液体が相変化したときに解放される熱は吸収する液体を利用して熱を輸送するもの。相転移は明確な物理的境界によって隔てられている。物質の状態をいい、この境界を超えて物質の状態が変化することを相変化といふ。たとえば水が氷に変わるのも相変化である。

注3/モンテカルロ・コード 電子計算機内部で発生する乱数を確率的な事象(素過程)に対応させて、確率的な物理問題(たとえば原子核の中核子輸送)を解くコード。

注4/電磁流体シミュレーション プラズマを電磁場と相互作用する一つの流体として取り扱う方法。ただしこの近似ではプラズマの粒子性が失われる。

# 有人惑星飛行を目指すレーザー核融合 ロケットの最新設計「ヴィスタ」

図8/ヴィスタ概念図



有人飛行を行うために設計された核融合ロケット「ヴィスタ」。中性子の遮蔽を効果的に行うために、内部が「ちゃん型」をしている。外周には多数のミラーが並んでおり、これを介して燃料ペレットを照射する。2020年代には、搭乗員と貨物をのせたこのようなロケットが火星を目指して飛行しているかもしれない。

前出のハイデの設計をもとにして、1987年、2020年代に有人火星飛行を目指す最新の核融合推進の宇宙船「ヴィスタ」が、ローレンス・リバモア国立研究所のC・オースらのグループによって発表された。ヴィスタについては本シリーズ9「最新核エネルギー論」で筆者がくわしく紹介しているのので、ここでは概略を述べるにとどめる。図8はその概念図である（左ページイラスト）。

前項のハイデの核融合ロケットが細長い鉛筆型であったのに対して、ヴィスタの形状は、中性子の遮蔽を効果的に行うために内側が空っぽの円錐形、いわば「ちゃん型」である。前者は魚を連想させ、後者はUFOを思わせる。

表5にヴィスタのパラメータを示した。フックリプトン(KrF)レーザーの効率は6パーセント、運転温度は1000K、出力は5メガジュールを考えている。照射くり返し率は毎秒30回である。

この核融合推進システムの燃料ペレットには1個あたり44ミリグラムの重水素・トリチウム(D-T)を用いており、ペレット・ゲインは1500である。重水素・トリチウム燃料の周囲には50グラムの水素推進剤を用いている。

プラズマ出力は1875メガジュール(核融合出力の25パーセント)であり、このうち約4パーセントの83メガジュールが次のレーザー・ショットのため、反応室でビックアップ・コイルにより取り出される。

反応室では、半径13メートル、電流強度3

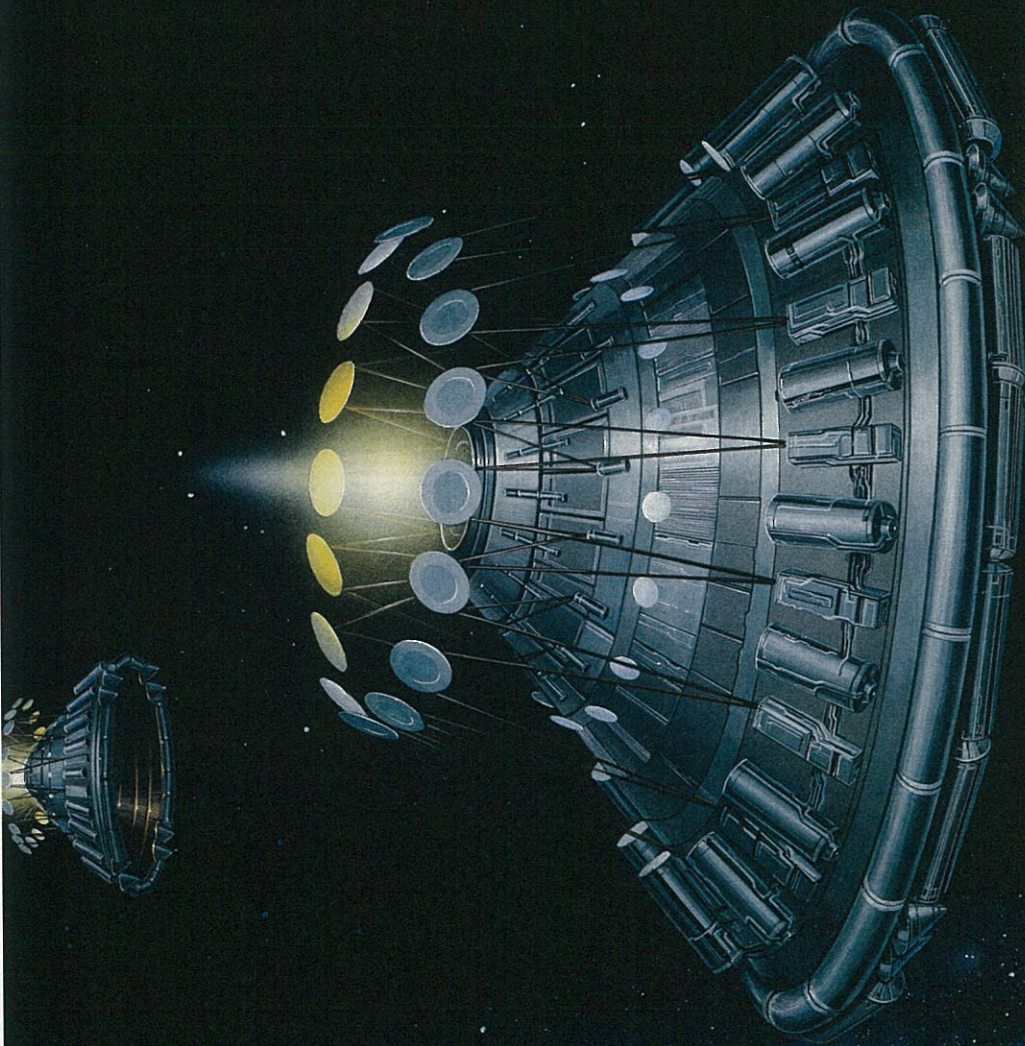


図10/核融合反応のエネルギー分布

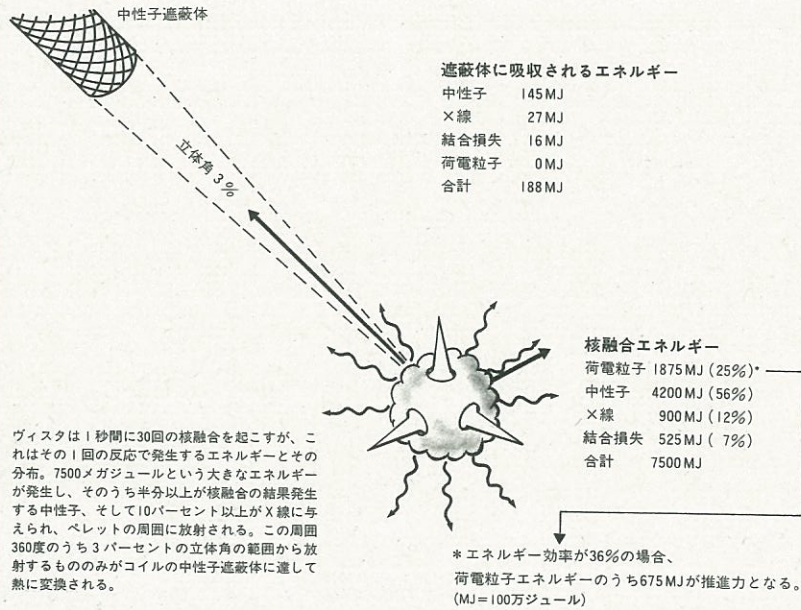


表5/レーザー核融合ロケット「ウィスタ」のパラメーター

| レーザーエネルギー (MJ) | 5                     | 宇宙船質量内訳 (トン)      |       |
|----------------|-----------------------|-------------------|-------|
| 核融合出力 (MJ)     | 7500                  | 積載物               | 100   |
| 荷電粒子出力 (MJ)    | 1875                  | 乗員室遮蔽材            | 140   |
| くり返し率 (ショット/秒) | 30                    | 推進剤 <sup>1)</sup> | 4,390 |
| D-T燃料質量 (mg)   | 44                    | レーザー・システム         | 500   |
| 実効比推力 (秒)      | 17,000                | 反応室               | 675   |
| 比出力 (W/g)      | 18                    | 始動用原子炉            | 5     |
| 推進剤消費量 (kg/秒)  | 1.5                   | 電源系               | 90    |
| 推力 (N)         | 2.4 × 10 <sup>8</sup> | 構造材他              | 100   |
| 推進出力 (MW)      | 2 × 10 <sup>4</sup>   |                   |       |
| 推進効率 (%)       | 60 (運動量)              |                   |       |

1) 燃料タンク等を含む

資料/C. Orth et al. (1987)

(図10)。またレーザー反射用ミラーなどの部分が立体角の1パーセントを占める。

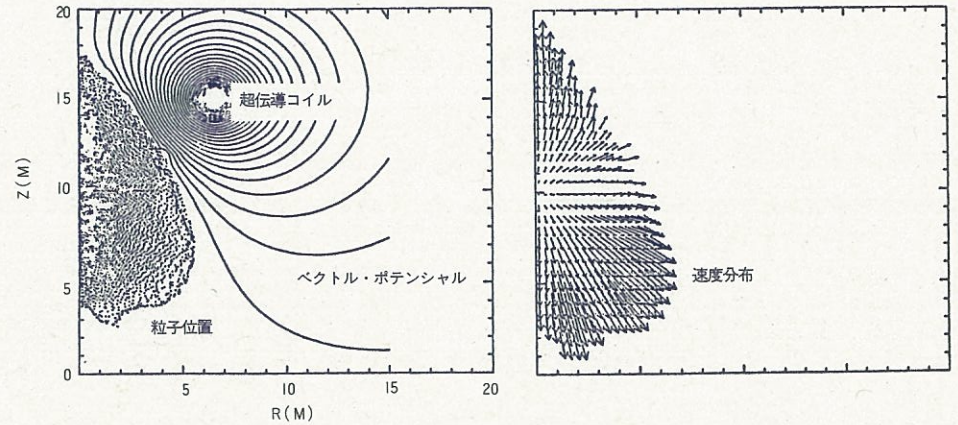
磁場発生コイルは、源からみて中心軸より50度方向にある。これは推進効率を最大化するために、その効率は運動量で測って60パーセントである。効率の低下は、後述べるように、軸上に沿って前方へプラズマ粒子がもれるためである。(右ページ図9)。

排熱はヒートパイプを用いて行われ、レーザー系ヒートパイプの運転温度は900 K、コイル遮蔽体は1500 Kである。これらのヒートパイプの半径は6〜8ミリメートル、厚さは0.05ミリメートルというきわめて細いものである。そしてヒートパイプの本数は、レーザー系が2060万本、遮蔽体用では325万本という莫大なものである。ヒートパイプは、円錐形の宇宙船の表面に並べられる。排熱すべき熱負荷は、それぞれ5・64ギガワット(564万キロワット)と2・35ギガワット(235万キロワット)である。

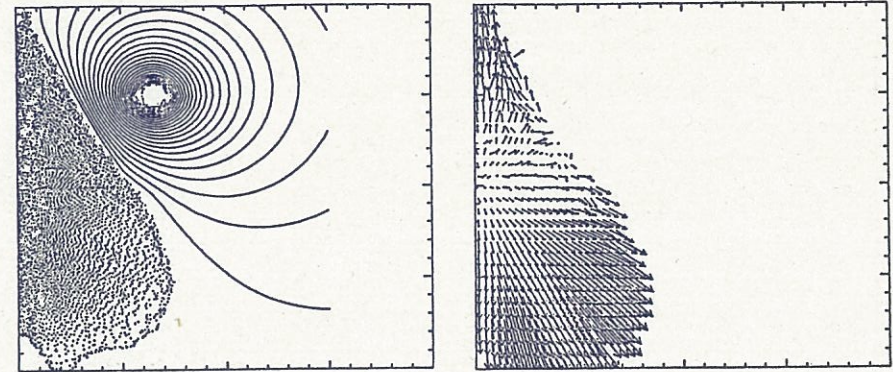
ウィスタ宇宙船は全質量が6000トンで、そのうち推進剤が41000トンを占めている。機体質量は、レーザーと反応室の占める割合が大きい。比推力は1万7000秒、比出力は18ワット/グラムである。

ウィスタの性能は、5〜10人の搭乗員と1000トンの積荷を乗せ、10日間の火星滞在期間を含めて100日間て火星往復が可能というものである。典型的な慣性航行速度は秒速40〜60キロメートルである。所要日数が100日間に設定されたのは、無重力状態での搭乗員の健康、たとえば骨からのカルシウム損

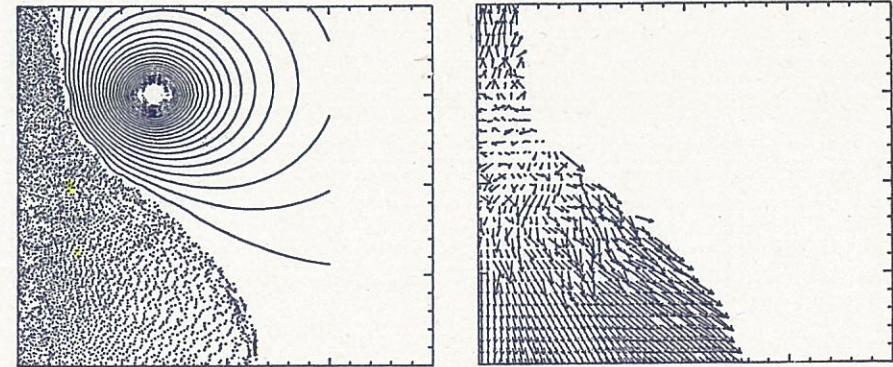
図9/反応室におけるペレット・プラズマの運動 時間=7.86マイクロ秒



時間=11.0マイクロ秒



時間=18.5マイクロ秒



電磁粒子コードによってプラズマ粒子の挙動をシミュレーションした結果を示す。左図はプラズマ粒子の位置とベクトル・ポテンシャルを、また右図はプラズマ粒子の速度分布を示す。最初等方的に発生したプラズマ粒子が、時間の経過とともに磁場によって下方へ反射されていくことがわかる。一部の粒子は上方(ペイロード側)へ逃げ、推進効率の低下の原因となる。

失の問題、宇宙線に起因する放射線被曝の問題に対する配慮からである。

このように、高い効率で迅速に人員と資材を輸送し、また搭乗員の健康を守るためには、高速の宇宙輸送システムが確立されなければならない。核融合ロケットは、核分裂電気推進型ロケット(イオン・ロケット)より2〜3倍速く、また現在の化学ロケットに比較して10倍ほど高い性能をもっている。

以上述べたように、レーザ核融合ロケットは高速性能をもち、近未来の推進システムとして非常に魅力的であるが、まだ今後解決すべき課題もいくつか残されている。最新の宇宙船「ウィスタ」でそれを見てみると、次のような課題を列挙することができる。

●ペレット・ゲイン、つまり入力エネルギーに対する出力エネルギーの割合は、レーザ1・エネルギー15メガジュールに対して1500と非常に大きい値が採用されている。しかし、ペレット爆縮の詳細についてはほとんど議論されていない。地上用では、爆縮時の不安定性を考えるとペレット・ゲインはせいぜい100程度であろうといわれているので、今後の技術の進歩(照射一様性の改善、パルス整形によるエントロピー制御、スピン偏極など)が望まれる。また、ロケットへの応用に有望と考えられるキヤノンボール型ターゲットの研究は、現在アメリカなどでは機密下にあり、情報交換などができないのが残念である。磁気絶縁型(Magnetically Insulated)と呼ばれる磁場閉じ込め方式との混合型では、ゲインが1000程度は得られるとの報告も

あり、それにもとづく宇宙船も提案されている。また筆者らが検討したように、本当にゲイン1500が必要かどうかという、最適化の問題もある。

●レーザは毎秒30ショットの運転が考えられており、しかも1億回という高いくり返しショットに対して性能を保持する必要がある。フッククリプトン・レーザがロケット用のレーザとしては現在のところ最適であると考えられるが、日本では電子技術総合研究所電気通信大学などで、またアメリカではロスアラモス国立研究所などで着実に研究が進められており、今後の成果が期待される。

●反応室ではプラズマと磁場との相互作用によって推力を得ているわけであるが、磁場閉じ込め核融合炉と同様な各種プラズマ不安定性(例：ドリフト不安定性)が発生することが考えられる。したがって、不安定性の成長率あるいはその抑制法などを検討しておく必要がある。最終的には、推力変換効率などのシミュレーション結果を実験で検討しておく必要がある。またビックアップ・コイルにおける高電圧パルスパワーの取り扱いも検討されなければならない。

右に述べた慣性核融合ロケットを特徴づける3つの主要コンポーネントである燃料ペレット、エネルギー・ドライバ、反応室のほかに、放熱用的高性能ヒートパイプの開発など、他の宇宙船と共通する課題もある。筆者らのグループは現在までに、キヤノンボール型ターゲットの爆縮シミュレーション、

重水素-重水素および重水素-ヘリウム3燃料ペレットの燃焼特性の評価、反応室におけるプラズマ挙動解析(推進効率の改善法の提案)、プラズマ不安定性の解析、ビックアップ・コイルからのエネルギー取り出しの効率計算、システム設計などを行ってきた。図9(128ページ)にそれらのコンピュータ・シミュレーションの結果の一部を示す。

現在は、先程述べた磁気絶縁ペレットのゲインの検討を行っている。高ゲインの可能性に対しては異論もあるからである。また、電磁粒子シミュレーション・コードを用いて反応室でのプラズマ挙動解析を行い、推進効率の評価、不安定性の同定やその成長率の評価などをさらに進めつつある。ウィスタ宇宙船の設計上の課題に対する何らかの解を得ることで、レーザ核融合ロケットの実現に少しでも寄与したいと考えているわけである。このテーマは今後も地道な研究が必要であり、この記事によって一人でも多くの人が核融合ロケットに関心をもち、また実際に研究・開発に参加されることを切望するものである。

筆者は近々、情報交換あるいは実際にロケット設計のための委員会を組織したいと考えている。関心のある方は筆者(巻末の紹介欄参照)へ連絡していただきたい。ロケット設計には、ターゲットから通信システムに至る非常に多岐にわたる検討を要する。核融合プラズマをとつても、ターゲットについては慣性閉じ込め方式の、また反応室でのプラズマ挙動は磁場閉じ込め方式の知識が必要である。したがって、多方面からの参加を希望する。●