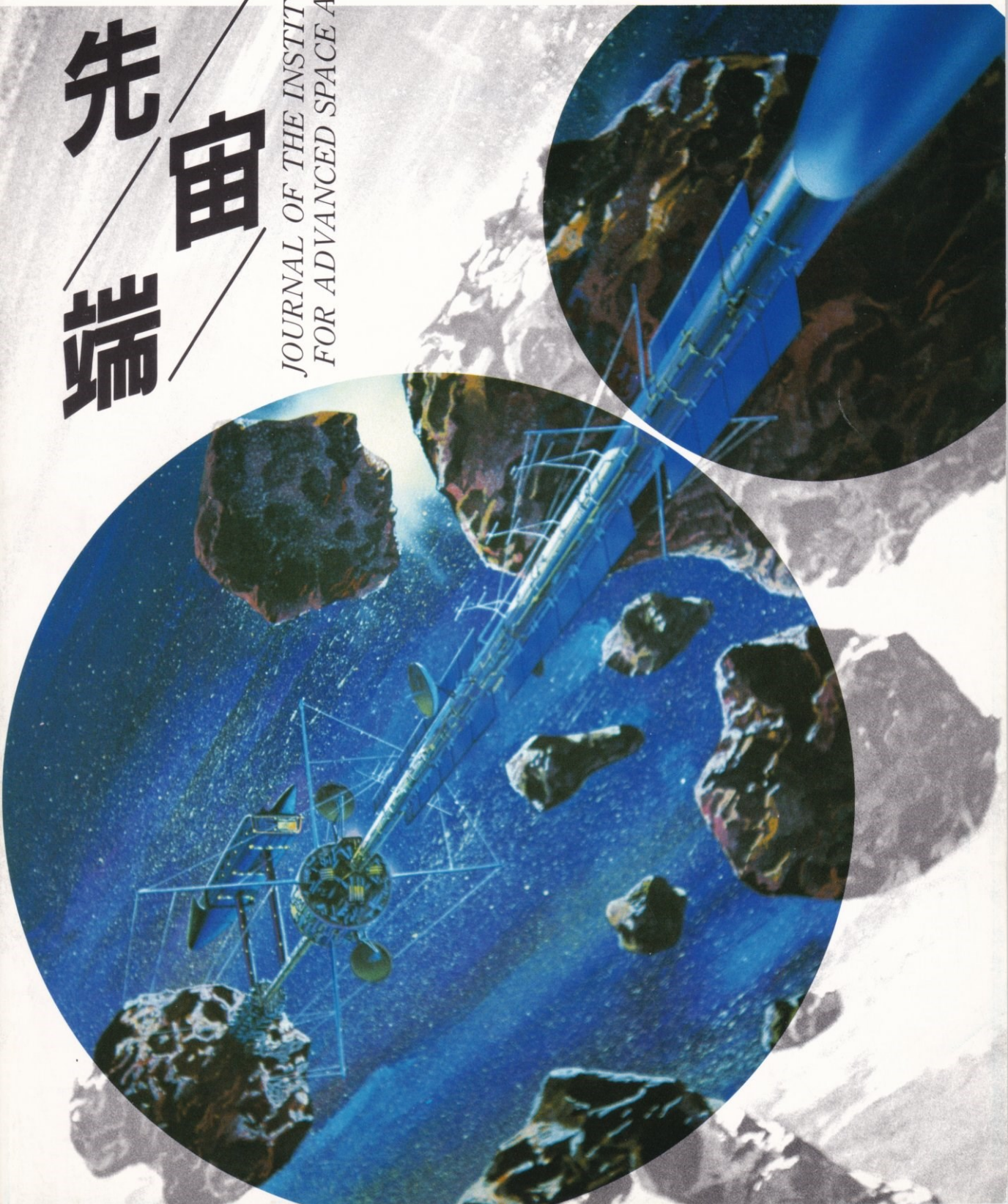


宇宙 先端

JOURNAL OF THE INSTITUTE
FOR ADVANCED SPACE ACTIVITIES

宇宙先端活動研究会誌
NOV.1992 VOL.8-NO

IAA 6



1. 講演記録 ヘリウム3と核融合 百田 弘 . . . 169
2. 宇宙船地球号/2040年(3)
ヘリウムスリー (^3He) 発電 森本 盛 . . . 186
3. JUNK BOX
初夢 長島 隆一 . . . 192

表紙画提供：池松 均

宇宙先端活動研究会

代表世話人

五代 富文

世話人

石澤 禎弘	伊藤 雄一	湯沢 克宜	岩田 勉	上原 利数
大仲 末雄	川島 鋭司	菊池 博	櫻場 宏一	笹原 真文
佐藤 雅彦	茂原 正道	柴藤 羊二	鈴木 和弘	竹中 幸彦
鳥居 啓之	中井 豊	長嶋 隆一	長谷川秀夫	樋口 清司
福田 徹	松原 彰士	森 雅裕	森本 盛	岩本 裕之

事務局連絡先

〒105 港区芝大門1丁目4-4 ノア芝大門802
(財)科学技術広報財団 宇宙プロジェクト室
櫻場 宏一 (事務局長)
佐伯 邦子

TEL 03-3459-8115 FAX 03-3459-8116

ヘリウム 3 と核融合

百田 弘 氏

核融合科学研究所の百田でございます。

私自身は、核融合研究に入って随分長いんですが、ここ20年ほど、いわゆるヘリウム3のようないろいろの燃料を使った核融合の可能性をずっと研究しております。

1987年でしたか、アメリカのクルチンスキーと、それからもう1人、ビンターパークという化屋さんが入って、その辺がアポロの持ち帰った月の試料と、それからソビエトのルナが持ち帰ったソビエトでの月の試料を分析した結果、月面にかなり多量のヘリウム3が存在するということが発表されて、それまである意味では核融合の将来についてはジレンマにあったわけですが、そこで非常にクリアに、今後の核融合の研究の指針といったようなものが見出されたわけです。

それでは、一体どういったような核融合がそのヘリウム3に適したものであるかということ、ここ数年間、10名弱のグループですが、一生懸命に検討しまして、結果的には非常に有望であるという確信を持つに至ったわけです。

ただ、残念なことに、これは後ほどにもお話しますが、核融合の研究に従事している人たちの間では、ヘリウム3燃料を月から持ってくるという話になりますと、冗談じゃない、そんなばかげたことを考えるなど言われるのが普通でして、核融合と宇宙開発とは必ずしも密接に情報が行き渡っていないということを痛切に感じるわけです。そういう意味では、きょうは非常にありがたい機会を与えていただいて、幸いに思っております。

きょうの話のアウトラインは、「D-ヘリウム3フュエルド・FRCパワープラント・フォー・ザ・21世紀」という論文、これは、先日、1週間前に、オランダで、「今後開発すべき21世紀のためのエネルギー

ギー開発」というテーマでのセミナーがありまして、そこで話をしたものを文書にしたものですが、それを参考にして下さい。

この話に入る前に、先ほど申しましたクルチンスキーから核融合研究者のため、それから宇宙開発の研究者のため、両方の研究者を対象にした割合初等的なビデオテープを送ってくれましたので、13分ですけれども、これを最初に簡単に紹介したいと思うんです。

初めの方は、宇宙研究者のための簡単な核融合の解説、後半は核融合研究者のための簡単な月資源の紹介というふうに成り立っています。

〔ビデオ映写 — 内容省略〕

最近新聞を賑わしましたのは、JETと言われている、ジョイント・ヨーロッパ・トカマクという装置で、大体1,500,000ワットを出したというのが今までの核融合出力の記録です。とにかく装置をどんどん大きくしてプラズマに注入するパワーを上げることで、核融合自身は確実にゴールに近づきつつあるという見方もできるわけです。この延長線上には、インターナショナル・トカマク・エキスペリエンタブル・リアクター、簡単にイーターと称する装置、これは装置そのものがうんと安く見積もって1兆円ぐらいの装置で、そういう金がどこから出るんだろうと各国の人は言っていますけれども、それで割合リアクターに近づく、まだ完全なリアクターじゃないんですけれども、リアクターの一步手前まで行くというふうに普通は言われております。

ただ、少し冷静に考えてみれば、必ずしも話はそう簡単ではないんで、例えば、トリチウムというのは自然界には存在しない、したがって、何らかの恰好でプラント自身でトリチウムを製造しなきゃいけないんです。普通には、核融合から発生した中性子をリチウムに当てて、そこで起こる核反応を利用してトリチウムをつくってやるという方式、いわゆるトリチウムを増殖するようなブランケットを導入してやるということになっているんですけれども、なかなかトリチウム・ブリーディング・ブランケットそのものが、今までのところリーズナブルなものはまだ設計されていない。

結局これは冷やさなまきゃいけないという要請と、トリチウムを増殖しなまきゃいけない、そのためにはヒートパイプを極力少なくしなまきゃいけない、このバランスがもたないんです。冷やそうと思えば、トリチウム・ブリーディングが不十分になりますし、トリチウム・ブリーディングをうんとしてやろうと思えば、非常に高温になってしまって材料がもたないというところで、まだこのブリーディング・ブランケット自身はコンセプトができていない。

それから、14ミリオン・エレクトロンボルトの中性子が容器の壁をたたきますので、壁が損傷を受ける。例えば、普通の原子炉で使われているようなステンレスチールですと、スクエアメートル当たり2メガワットのニュートロンの壁負荷を前提として設計すれば、1年間で寿命が尽きる。それから、実際に余り装置を大きくすると経済的に大変なことになりますから、ある程度リーズナブルな大きさにしようと思えば、10メガワット／スクエアメートルぐらいの壁の熱負荷にしなまきゃいけない。HT9という少し特殊なスチールを使っても、正味1年で壁はだめになってしまう。すると1年ごとに壁を交換しなまきゃいけない。実際にそういうことはできっこない。というのは、交換するごとに膨大な量の放射性的な金属を出しますから、それは後にも触れますけれども、日本ではまだ基準がないらしいんですけれども、例えば、マンツルのあたりにまで埋めなまきゃいけないといったような大変なことになってくる。そういう意味でも、この壁の寿命が短いということが大問題になってきます。

リアクターそのものは、おおよそ3万トンの重さです。これは今の軽水炉が1万トンぐらいですから、おおよそ3倍ぐらい。それを毎年かえるというようなことはこれはとても考えられない。そういうものをどこに捨てるのか、そのことも大問題になります。

それから、トリチウムというのは燃料になるわけですがけれども、このトリチウム自身はリチウムからつくるわけです。そのリチウムのリソースというのが、おおよそウラン235と大体コンパラオーダーです。ですから資

源的にも決して十分ではない。

それから、そうやってとにかくリアクターができたとしても、その発電効率というのは、どう安く見積もっても今の軽水炉より安くなることはあり得ない。そうすると、一体何を開発しているのかという話になるわけです。

一方、これは後で詳しく述べますけれども、D-ヘリウム3、この重水素自身は地球上に無限にあります。ヘリウム3は残念ながら地球上にはないんですけれども、100万トンぐらいいは割合効率よく月の泥から分離することができる。経済的に回収できる月面上のヘリウム3というのはおおよそ100万トン、それで月全体のヘリウム3のおおよそ1%ぐらいだという話ですけれども、それを使えば大分話が変わってくる。少なくとも中性子は100分の1ぐらいの量にまで減少しますので、例えば壁の寿命というのは、実際に30年なら30年、40年でもいいんですけれども、そのぐらいの寿命を考えたときに、壁はリアクターの寿命の間健全である。しかも、廃炉を捨てる場合、放射性廃棄物のクラスというのがあって、クラスA・B・C、それから捨てるてはいけないものと。ヘリウム3を使えば、その放射性廃棄物で一番楽なレベルにまでその廃棄物の質が向上するというようなメリットもありますので、そういう意味でもD-ヘリウム3ということを考えることは非常に得策であろう。

ちなみに、これはソビエトのゴロービンという人が試算した値ですけれども、2050年に、とにかく人類の必要とするエネルギーの総和は、6掛ける10の4乗、6万ギガワット—1ギガワットが100万キロワットですから、100万キロワットの発電所を6万個というのが、2050年、21世紀の中ごろに予想されるエネルギーの需要でして、これに対して、ヘリウム3であれば年間3,000トン必要ということになります。スペースシャトルが一度往復すると、ヘリウム3を30トン運べるとして、スペースシャトルが月に100回往復すれば、一切石油も何もなしで、現在じゃなくて2050年のレベルでの地球上のすべてのエネルギー需要を賄うことができるということになります。このレベルで月のヘリウム3はおおよそ300年もちます。今のレベルのエネルギー使用量ですと1,00

0年以上もちますけれども、これは発展途上国のエネルギー使用量はこれからどんどんふえるということ、それから人口そのものが今後ある程度ふえるということを考えて、2050年のレベルで、とにかく300年程度は月から燃料を供給することができる。というのは、月表面上には100万トンの採鉱し得る、経済的にペイし得るヘリウム3があるからです。これがだめなときには、火星とか木星、ここには事実上無限大、月のさらに100兆倍のヘリウム3が推定されておりますので、こちらから持ってくれば、これは事実上エネルギーを供給するという問題は消滅するわけです。

ところで材料に中性子が当たりますとボイドができる、泡ができてぼろぼろになるわけです。と同時に、ちょうど水ぼうそうみたいな感じで金属が膨らみます。その膨らみが数%にもなると、これは材料そのものが変わってしまうというのか、割れやすくなるというのか、脆性が非常に大きくなって、実際に使えなくなる。それがどの程度かという、1平方センチ当たり14ミリオンの中性子が10の22乗当たった場合には大丈夫、大体4か5ぐらい掛ける10の22乗当たれば、ボイド・スウェリングという点でほぼ限界です。ちなみに、トリチウムを使った核融合で30年間使おうと思えば、この量は、大体40ぐらいになります。だから、こういう材料を使う限り、ボイド・スウェリングからいっても、およそトリチウムを使うような核融合というのは実際には使えない。

それじゃどうするかということで、我々、以前は随分いろんな反応を検討してみました。例えば、プロトンとリチウムを衝突させる。これはリチウム中で4分の1はリチウム6という、大多数はリチウム7なんですけれども、リチウム6という同位元素です。そうすると荷電粒子だけが発生して若干のエネルギーがとれます。

それから、プロトン-ボロン11、ボロン11というのはボロンの中で結構多くあります。これですと、ヘリウム4、普通のヘリウムが発生してエネルギーが出てくる。

それから、ヘリウム3-ヘリウム3反応、これでもやはり荷電粒子、ヘ

リウム4、アルファ・パーティクルとプロトンが発生するだけで、ニュートロンは出ないといったようなものがいろいろ考えられるんですけども、実際にはクロスセクションが小さ過ぎて、なかなかこういったような反応でエネルギーを取り出すことは難しい。

最後に残るのは、若干妥協して、重水素とヘリウム3を反応させて、ヘリウム4とプロトンを発生させて、18.4ミリオン・エレクトロンボルトというかなり大きなエネルギーをつくり出すことです。ただ、このときには、うまいぐあいに、この重水素とヘリウム3だけが反応するんじゃなくて、このDとDが自分自身で反応するという部分があります。そのときにトリチウムが若干出ます。それからニュートロンも若干出ます。このトリチウムは、ぐあいの悪いことに、重水素と反応して、D-T核融合と同じように14ミリオンの中性子を出します。ここで出てきた中性子、それからこのトリチウムが燃えて出てきた中性子、それはゼロになることが望ましいんですけども、実際にはゼロにならないので、それはD-T核融合のおよそ1%程度は出ます。そういう意味では完全に放射能がゼロということにはなりません。

それではどういうプラズマをつくってやればいいのか。

プラズマの密度とエネルギーの閉じ込め時間とプラズマ温度の積が大体10の20乗ぐらいになりますと、プラズマを加熱するに必要なパワーとフュージョン・パワーとは同じぐらいになります。それから、3掛ける10の21乗ぐらいになりますと、無限大になります。ということは、もう外部からパワーを注入しなくても、核反応でプラズマ自身が自分でその温度をキープする、それは言い直せば燃焼をするわけです。

それに比べて、ヘリウム3を使いますと、およそ10の23乗ぐらいが必要で、プラズマに対する要請はおよそ30倍ほどきつくなります。温度はより高くなる。それから、プラズマの密度はより大きくなります。けれども、目的としているのは中性子を減らしたいということです。

D-T反応ですとプラズマ温度を大体1億度から1億4,000万度ぐらいでということを考えています。1億度というのは大変みたいな感じです

けれども、こういう非常に薄いガスの1億度というのはそれほど大変な話ではないので、普通の日常の感覚の温度と少し違いますけれども、それに対してD-ヘリウム3反応の場合ですと、7億度から10億度ぐらい、エレクトロンボルト単位で70 keVから100 keVといったような、非常に高い温度のところで燃焼させる必要があります。温度が上がるに従って発生したエネルギーのうちで中性子の占めるエネルギーの割合がどんどん下がってきて、大体70から100 keVぐらい、7億度から10億度ぐらいの温度ですと1%ぐらいにまで少なくなります。D-Tですと、80%までが中性子によって運ばれるエネルギーです。それが1%ぐらいにまで減少するという事です。ですから、この差そのものと、それから、このD-ヘリウム3を使いますと、これも後で触れますけれども、プラント自身の効率が非常に高くなりますので、要するに蒸気タービンを使いませんので、全体のプラントの効率が非常に高くなります。そういう意味でもメリットは大きいので、その両方を考えますと、D-T核融合に対して、100万キロワットの発電所といったようなものを想定したときに、中性子の割合はD-T核融合に比べて1%以下といったような値にもなります。

ただ、物理的には若干要請が厳しくて、D-T核融合に比べて、D-ヘリウム3を燃やそうとういときには、今申しましたプラズマの温度というのは70 keVから100 keV、およそ7億度から10億度、それから、閉じ込めパラメーター、つまり密度とエネルギーの閉じ込め時間との積というのが、D-T核融合に比べて4倍ぐらい大きくなります。ということは、閉じ込め性能、または熱絶縁と申してもいいと思うんですけれども、閉じ込められたプラズマの絶縁性を上げなきゃいけない。

それから、このD-ヘリウム3核融合の場合には、大部分が荷電粒子の運動エネルギーという恰好でエネルギーが与えられるので、それをうまく電気に変える方法が同時に開発されなきゃいけない。そういうものが開発されれば、直接に荷電粒子の運動エネルギーを電力に変えることのできるようなもの、すなわちダイレクト・エナジー・コンバーター、これはそんなに大変な話じゃないんですけれども、少なくともそういうものが

くつつくことが必要である。

トラス型プラズマに燃料として重水素とヘリウム3を入れてやる。そうすると核融合反応が起こって、エネルギーは15ミリオン・エレクトロンボルトの水素の恰好で出ますから、ここで発生したエネルギーは高エネルギーの水素のイオンで、それが磁力線に沿って外部に逃げていく。そうすると、この先に、その運動エネルギーを電気に変えてやるような装置をつけてやれば、それですべてオーケーだということになります。

実際にこういうものができるのかどうかということ、やはりここ3年ほど、日本とアメリカとで共同研究をやりました。最終的にはアメリカはほとんど寄与しなくて、最後は日本だけでやったんですけれども。

我々の考えた装置を、我々はフィールド・リバースド・コンフィギュレーション、磁場逆転配置または簡単にFRCと呼んでおります。D-ヘリウム3の燃料をFRCに入れた場合に、そのプラズマというのは、クローズした磁力線で閉じている。その結果、閉じ込め性能が十分に上がる。それから、このFRCプラズマというのは、オープンライン、閉じていない磁力線、そういうもので包まれておりますので、したがって、フュージョンパワーのうち荷電粒子で運ばれるものを取り出すのに適しておる。

それから、こういう閉じ込め装置にD-ヘリウム3を使った場合には、発生した荷電粒子のプロトンのうち、ある割合のものが自分自身で電流をつくります。ちょうどこの装置はこういう電流でもってこういう磁場をつくっているわけですから、この電流がだんだん減衰していくものを補うべく、電流を駆動してやらなきゃいけない。そういう電流の駆動を、フュージョンで発生したプロトン自身が賄ってくれるという、どうもうまいことがたくさんあり過ぎるような話ですけども、そのようなことを見いだしました。しかも、プラズマというのは、一般になかなか安定にならない。ところが、このFRCでD-ヘリウム3という燃料を注入した場合には、非常に高エネルギーの核融合で生じたプロトンが電流をつくるべく流れますので、そのフュージョンプロトン自身がプラズマを安定化してくれるという、何かFRCとヘリウム3の燃料を組み合わせることによって、何かかもがうまいといったような話が見つかったわけです。

我々が設計した装置ではチャンバーの長さが25 m、半径2 m。プラズマの半径は1 m、長さが17 m、おおよそこの程度のプラズマができます。プラズマ全体のボリュームは多分60立米ぐらいです。ですから、これがいわゆるリアクターそのものになるわけです。若干のニュートロンが出ますから、超伝導コイル自身がダメージを受けないように若干の遮蔽は必要です。ただ、発熱量が小さいですから、この遮蔽のクーリング・パイプというのはごくわずかであって、そういう意味では、遮蔽の厚さ、ボリュームとも普通の遮蔽に比べれば随分小さくなります。

ここで発生した荷電粒子は、ずっと磁力線に沿って、両サイドに移してやって、両サイドには板がたくさん並んでいます。板といっても、1枚1枚の板はグリッドメッシュの構造をしておる。したがって、トランスパーレンシーは非常にいいんです。流れてきたプロトンはここでいったんバンチをさせてやって、ここでモジュレートして、それがだんだんバンチしてきて、バンチが完成したところで、全部で19枚のグリッドメッシュの中に進行波を立ててやって、その進行波でビームを減速させてやる。そうすると、そのバンチしたビームの運動エネルギーがこのグリッドメッシュにつながれたタンク回路に電力をそのまま変換するという恰好で、正味ここで1. 何ミリオンボルトで30メガヘルツぐらいの交流が発生できる設計になっております。

実際、こういう恰好で直接にエネルギーを変換しますと、その変換効率というのは、損失の大部分はプロトンがこのグリッドに衝突することによるエネルギー損失ですけれども、全体の効率としては75%という、非常に高いエネルギー変換効率を得られます。この75%という非常に高い効率を得られるので、全体としてのプラントの効率は非常に上がるわけです。

ここで収支を考えてみると、1年のうち9ヶ月運転して、3ヶ月は定期点検、つまり稼働率は75%ということ为前提にし、出力は100万キロワットとします。電気出力が100万キロワット。ヘリウム3は38 kg必要です。それをまずヘリウム3のリザーバーに入れて、ここで重水素――

これもリザーバーがあります、それでペレットをつくってやる。それを標準プラズマに注入してやる。大部分はそのまま核反応を起こさずに逃げます。逃げたものはもう一遍リザーバーに戻してやる。それから、重水素も同じようにリザーバーに戻してやる。それから、ある種のもはD-D反応でトリチウムができます。これは年間3.25キログラムのトリチウムが出てきます。

核融合出力は160万キロワットです。そのうち、輻射で出るものが35万キロワット、それから、中性子は7万キロワット、荷電粒子は直接変換器に移してやります。これは先ほど言いました、効率が75%のプロトンに対するダイレクト・エネルギー・コンバーター、エネルギーが低い成分を直接エネルギーに変換するには普通ベネチアンブラインドと呼んでいるものを使います。これは静電型でエネルギーを回収します。その結果、電気出力は1,052メガワット、そのうち52メガワットは冷却ポンプのためのパワーと、インジェクターのためのパワーに使って、残りちょうど100万キロワットというのが全体のエネルギーフローです。100万キロワットのための核融合出力は160万キロワット、したがって、全体のプラント効率が62%という、現在存在するプラントのおよそ2倍ぐらいの効率を得られるということです。

これはあんまり設計によらないんで、ヘリウム3を使ってこういう高効率のダイレクト・エネルギー・コンバーターをつければ、いや応なしに全体の効率は非常に高くなります。このことは、先ほどのビデオでもクルチンスキーが強調しておったところです。

これは、そのリアクターの主要諸元ですけれども、特にここで問題にしておかなければいけないのは、壁負荷がD-T核融合の場合には10メガワット/m²だということを先ほど申しましたけれども、この場合には0.26メガワットで、およそ40分の1の壁負荷になっています。ということは、壁の寿命が40倍になるということです。これは燃料比を若干ヘリウム3を節約する方向で設計したものですから、これが0.26になったんですけれども、今から思えば燃料比を1対1にするとういことでもちょうど半分になります。そういう意味では、D-Tに比べて壁負荷はおよそ1%

ぐらいにまで減らすことはできる。これが意外に大きいのは、プラズマのボリュームが、例えばD-Tトカマクですと1,000立米ぐらいあります。そういう意味では壁は非常に大きいんです。それに比べて、これはプラズマのボリュームがせいぜい60立米ぐらいで非常に小さく、壁自身も小さい。そういう意味では単位面積当たりでは結構大きく出るんですけども、それにしてもD-Tトカマクリアクターに比べれば壁負荷は非常にわずかであるということ。それから、磁場もせいぜい7テスラーで十分である。例えばD-T核融合ですとこれは20テスラーとか、磁場の開発が大問題になりますけれども、この場合にはせいぜい7テスラー、これは普通に使われている超伝導磁石で十分です。そういう意味で、技術的にはほとんど、クリアすべき基本的な問題点は存在しない。

リアクターの重さは3,000トンで、原子炉よりも随分軽くなる。このことは、炉のキャピタルコストが安くなるということに即あらわれます。

我々の設計をもとに、未来工研の向崎さんが、エセコムという、安全性とコスト評価のスタンダードな手法に基づいて計算なされた結果では、トータルなダイレクトコストが、このリアクターの部分の1987年のドルのベースでの値段が大体1,300億円という話になります。そのほかに間接費が入って、それから建設期間中は電力が売れませんからその期間の利子、8.56%を見込んで、トータルなキャピタルコストは1,730ミリオンダラーという話になります。

その上で、電力代を出しますと、そのキャピタルコストは、30年間使うとして年間146ミリオンダラー、これはキャピタルコストに対する償還です。それから、オペレーションのために必要な値段が年間34ミリオンダラー、ですからおよそ50億円ですか、キャピタルコストの返還が200億弱ですね。

それから、燃料コスト、これは月からヘリウム3を持ってくるというのがメインですけれども、それがどれぐらいかわからないんですけども、1キログラム20ミリオンダラー、ということは、ヘリウム3が1グラム200ドルですね、現在多分ヘリウム3の値段が100ドルぐらいです。

月から持ってきて若干上がったとして、1グラム200ドルと仮定したとしても、年間必要な燃料費というのはせいぜい8ミリオンダラー、10億円ちょっとという、これは原子炉に比べて断然有利な点です。

したがって、トータル年間188.6ミリオンダラーというのが必要な費用です。これからキロワット／アワー当たりの値段を出しますと、2.87セント、キロワット当たり3セント弱、日本円にしてキロワット当たり4円というような計算になります。

原子炉が今がもうちょっと高いはずですが、日本の場合には多分6円か7円か、それぐらいだと思いますので、そういう意味で、こういうコストの点でも随分安くなる。

これはヘリウム3とFRCを組み合わせるということでリアクターが非常に小さくなるということと、それから、中性子がプロトンに変わりますので発電効率が非常に上がるということの結果です。ですから、これは特にFRCを使う場合に限りませんが、炉壁の温度、例えばD-Tフュージョン、一般には安全だと言われておりますけれども、外側にブランケットがありますから、最初摂氏500度でオペレートしていたとして仮にブランケットの冷却水が全部ストップしたとしますと温度はどんどん上昇して1,000度を超します。これはそのままメルトダウンにつながるわけですが、ところが、ヘリウム3の場合は、すべての冷却系がとまっても、ブランケットで核反応を起こすということをやっておりませんので、自然に温度が下がっていく。そういう意味ではこれはインヘレントに、生まれつきというのか、そもそも本質的に安全で、メルトダウンという話はそもそも存在し得ないということになります。これをインヘレントリー・セーフ・システムと、これはこういうプラントの一つの理想だろうと思うんですけれども。

それから、放射性廃棄物がどれぐらいあるか。これもD-Tトカマクに比べての話ですけれども、クラスAというのは、普通に、廃棄する作業もリモートコントロールが要らない、手でもって3m以上埋めればよろしいと、たしかそのようなものです。アメリカの基準ですけれども。それから、クラスCというのは、リモートハンドを利用しなければいけない、それか

ら埋めたものを100年以上にわたって管理しなければいけない。その下のものというのは、人間に影響を与える層に埋めてはいけない、埋めることのできない、ちょうど今の軽水炉の使用済み燃料と同じレベルの話で、多分500mとかマントル層に捨てるということが唯一です。

D-Tの場合ですと、こういう捨てることのできない放射性廃棄物が非常にたくさんあるということに対して、D-ヘリウム3は30年使った場合でもすべてのものは廃棄できるレベルにおさまっており、しかもその量が少ないということになります。

我々はこのFRCリアクターに「アルテミス」という名前をつけたんですけども、このアルテミスを設計した結果でわかったことは、D-ヘリウム3を燃料としたFRCフュージョン・リアクターのコンプリートなシナリオができたということです。これは実は、コンプリートなシナリオができたというのは核融合の世界で初めてなんです。トカマクでいろいろ議論がありますけれども、まだトカマクでも完全なシナリオというのはできていないんです。そういう意味で初めての経験です。

しかも、ここで採用した技術の基礎、技術そのものじゃなくて基礎というのは、既存の技術で十分である、特別に開発しなきゃいけない基礎技術というものはない。例えば材料とか、マグネットとかいったような、根本的に開発しなきゃいけないという技術はない。それから、D-ヘリウム3を使いますので、14ミリオンのニュートロンというのはファクター2少なくなりますし、安全性というのはインヘレントである、本質的に安全であるということ。電力代は現在のライトウオーターリアクターに比べてもなおかつ安いということがわかったわけです。

若干研究課題は残っておりますけれども、それらがクリアされれば、これはまさに理想的なものであろう。それで、実際こういうリアクターですと、物理的に課題が達成できれば、あと技術的に根本的な話は何もないということです。

例えば、今我々が提案しようとしている、検討している実験計画ですけども、幾つかのフィジックスをベースにして設計したわけですけども、

その辺のフィジックス、いわばプリンシプルを実証する必要があるという、そういう実証実験を9年間で実行する必要があるだろうと考えています。

これとあわせて、先ほど簡単に話しましたダイレクト・エナジー・コンバーターとか、ニュートラルビーム・インジェクターを開発する必要がある。それができますと、すぐこれはプロトタイプのリアクターでプランニング・アンド・デザイン、プロトタイプのリアクターをつくるのが可能になります。そういう意味では、我々は2050年とか、そういう話はおもととする気もないし、その話をしちゃいけない、むしろ今からすぐに着手するとすれば、12年先にはこのプロトタイプのリアクターの建設にかかれるんじゃないかということを主張しているんです。

ただ、核融合ではあんまりこういう話を聞こうとしないんで、ちょっと困っているんですけども、やはりD-Tトカマクを信奉して、新しい話は聞く耳を持たぬという人が多くて、若干困っているんですけども、割合まじめに考えて、12年、若干延びても15年、したがって、プロトタイプのリアクターそのものは2010年にはできる。実際これができた段階では、50キログラムのヘリウム3を月から持ってくるというのは、たしかSEIでは2015年に若干のものを月から持ってくるという年次計画ともこれならうまくマッチできる。

ただ、フュージョンの方はなかなかコンサーバティブで困っているんですけども、「ア・ステートメント・フロム・ワークショップ・オン・D-ヘリウム3ベースド・リアクター・スタディ」という資料をお配りしておきました。これは、アメリカとソビエトとでこういうワークショップをここの9月25日から10月2日まで開催したんです。アメリカとソビエトは両方ともD-ヘリウム3に関心を持っているらしくて、そこで、このワークショップのまとめとしてこういうステートメントを発表して、私も含めて皆さんがサインしたんですけども、ソビエト自身はもう既に、国を挙げて核融合はヘリウム3に完全に切りかえています。ここでのポイントは、D-Tリアクターというのはフィッシャレンに比べてはるかに安全であるとはいえ、どういう意味でかということ、ラジオアクティブな使用済み

燃料がないという意味ではるかに安全であるとはいえ、誘導放射能があつて、しかもその量はフィッションと余り変わらない、実際にはフィッションより多いと思うんですけれども、ということが問題だと。しかも、そのファーストウォール—プラズマ容器のしばしばの交換が必要になる。これは先ほど言いました寿命がせいぜい1年とかそういうオーダーですので、非常に頻りに壁を交換しなきゃいけない。その結果、エネルギーのコストがふえるということになる。したがって、現在のD-Tに基づいたメインラインというものがフュージョンシステムとしてオプティマムなものであるかどうかというのは確かではない。我々は結局究極的には、D-ヘリウム3に基づいたシステムというものがオプティマムであつて、これはラジオアクティビティを減少させるというようなこととか、リライアビリティとか、リアクターのライフとか、そういう意味でこういうD-ヘリウム3に基づいたシステムというのが最適であろうと考えるという宣言をしているわけです。

その上で、一番最後に、イーターというのは、アメリカ、ソビエト、ヨーロッパ、日本という4カ国での共同の研究としてIAAをベースにして進めてきているんですけれども、そういう経験をもとにしてD-ヘリウム3のフュージョンプログラムでも同じようなアクティビティを必要としていると、そのプログラムは、プラズマ物理と、材料と、ルナ・プログラム、これ3つが必要で、特にこのプラズマ・フィジックスと、燃料がなきゃ話になりませんのでルナプログラムという、この2つは何とあつても欠かせない部分で、ここでは材料のことも言っていますけれども、それらを含んだ開発のプログラムで、これを米・ソ・ヨーロッパ・日本という4カ国の共同で提案しているわけです。

さらに、そのプログラムのための予算というのか、そういうものは1992年に、もうすぐですけれども、シュッド・ビー・ランチドですから、つながってなきゃいけないというのがここでの話です。

実際にこういうステートメントを裏書きするようなアクティビティがソビエトでは現にあります。

D-ヘリウム3のリアクターとして、ワークショップで発表されたもの

は、アメリカが4つ、ソビエトが6つ、日本は私が今さっき申しましたアルテミスを発表したんです。これは米ソのワークショップですので、日本人が探するのはおかしいんですけども、FRCが一番有望であろうと何人かの人が考えて、それでぜひこれに出るようというインビテーションをもらったわけです。そこでアルテミスという、先ほどの話をしたわけですけども。これはクルチャトフというのがソビエトの核融合研究の中心というか、原子力そのものの中心ですけども、ここは、研究所を挙げてD-ヘリウム3に切りかえた。アメリカはまだ切りかえていません。日本は全く考えもしていません。しかし、この程度のアクティビティがあるということ。特にソビエトは完全に切りかえたということですね。

それから、今月の初めに、IEAの委員会のためにオランダのロイヤルアカデミーが「21世紀のために開発すべきエネルギーシステムのセミナー」というものを開催したんです。そこでは太陽エネルギー関係と、それから、核融合として、正味はD-ヘリウム3だけを21世紀のエネルギー源のキャンディデートとしてピックアップしております。そのほかはなしです。

それから割合同じ時期に、ニューヨークタイムスのことし11月23日の記事で、シーボルトつまり1970—もっと古いですか、化学でノーベル賞をもらった人で、アメリカの原子力に対して、水爆も含めてですけど、テラーとシーボルトという2人が特に指導的であると言われているような人です。この人はむしろ政治家というのか、大統領顧問とか、そういうことで政府のサイドで原子力政策を支えてきた人です。この人が「テスト・ヘリウム3フュージョン・イツ・セイフ・クリーン・エコノミカル」という記事を書いております。

ここで特に我々として気にしたことは、これは割合最近忘れていたんですけども、核融合の最初の約束というのは、安全でクリーンで環境保全性を伴ったエネルギー・ソースを提供するというのが最初の約束であったが、トリチウム・フュージョンというのはそういうものではない、しかし、そのほかのオプションというものが今存在するとして、ヘリウム3の重要性を主張して、実際にどういふふうにはヘリウム3を燃やすのかということ

で、最後の方に、ジス・メイ・ナウ・ビー・アチーフド・ウイズ・ア・ニューテクニク・コールド・フィールドリバーサルと、シーボルクは一体だれに聞いたのだろうかとちょっと思ったんです。わからないんですけども。これでもってD-ヘリウム3の核融合ができるんだ、だからすぐにその核融合の研究に着手しろと。このヘリウム3フュージョンのみがグローバルに、全世界的に――その前にちょっと言っていますのは、オイルショックのときはとにかくエネルギーそのものが必要であった、しかしその後様子が変わって、ただ単にエネルギーを出すだけじゃなくて、環境保全性に富んだエネルギーでなきゃいけない、そういう要請にこたえるエネルギーソースというのはヘリウム3フュージョンだけである、すなわち、ここではラジオアクティブな燃料はない、ラジオアクティビティというのはほんのわずかである。それから、コンパクトで安全で経済的である。そういう意味ですぐにこれをテストしなきゃいけないというのが、このシーボルクの結論なんです。これは非常に力強い味方を見つけたというふうに現在思っております。

以上、非常にかいつまんで、私の考えております、正味21世紀のエネルギーというのは今のところこれしかないんじゃないかという気がします。それと、現状を紹介させていただいた次第です。

〔以下質疑応答〕

この記事は91年12月19日に宇宙開発事業団本社にて行われた、核融合科学研究所の百田弘先生の講演を録音テープから書き起こしたものです。若干の分かりにくい点、録音の不備な点については編集局にて修正しています。本記録についての文責は編集局にあります。

ヘリウムスリー（ ^3He ）発電

森本 盛

前章に出たヘリウムスリーを使う、核融合発電は、宇宙関係者の注意を喚起しておきたいシロモノである。それは、放射能汚染のないクリーンエネルギーであり、そのうえ発電効率が高いなどのメリットをもつからである。ただ核という文字は、素人にクリーンというイメージを与えない（私が原爆経験者だからであろうか？）。素人に対しては、安心感を与える言葉にするよう専門家の気配りをお願いしたいところである。

それはそれとして、核融合発電については、かなり前から色々な方法が考えられていた。その中にヘリウムスリーを使うとよいというアイデアがあった。しかしヘリウムスリーは地球上にほとんど存在しないのでアイデア倒れかと思われていた。その原理は後回しにするとして、何故急に注目を集めるようになったか、.....

（1）宇宙開発に100%依存

NASAのアポロ計画で、月に大量のヘリウムスリーが存在することが発見された。1%を使って、人類が消費する電力の100年分をまかなえるといわれている（電力需要が今の2倍に増えるという条件で計算）。もう少しわかりやすい例では、スペースシャトルのカーゴベイ一杯分のヘリウムスリーで、米国で消費される一年分の電力をまかなうことができる。

では何故月にあって地球にないのだろうか。月のヘリウムスリーは太陽風（太陽から放射される物質・エネルギーの総称）によってやってきたものである。地球の場合、目に見えない2つの壁があって、熱と光以外はほとんど届かない。有害な放射線などは壁にさえぎられてしまう。有難いことである。というより地球上の生物は、この環境に合うように発生・進化したという方が正しい。目に見えない壁の一つは磁力線である。地球は大きな磁石なので、北極と南極の間に磁力線が通っており、これが地球を包む格好になっている。太陽からの放射線はこれに阻止される。これが溜ったのがバレンシア帯であり、強い放射能を帯びている。極地方の上空では磁力線の壁が凹んで

いるので、美しいオーロラが現れる。もう一つの壁は、地球をとりまく大気圏である。紫外線はオゾン層で弱められている。ヘリウムスリーも、これらの壁にさえぎられて地表に到達できない。一方、月にはこのような壁がないので、到達したヘリウムスリーが蓄積される。

月以外にもヘリウムスリーは存在する。木星及び土星である。これらはガス惑星であり、組織の大きな部分がヘリウムと考えられている。そしてヘリウムスリーの存在量は10²⁰トンと推測されている。これは将来の資源として期待される。資源の総量としては充分であるが、使いこなすシステムの開発が必要である。無人採掘機、無人精製設備、ロボット宇宙輸送船等々。これらが実現すれば、先進国11億人が消費する電力は、半永久的に保証できる。しかし途上国80億人が恩恵に浴するためには、さらに簡易/低コストの核融合発電を実現するか、あるいは何か簡易な送電方法が開発される必要がある。

ところで2040年の人口問題との関係はどうであろうか？燃料資源の枯渇により、寒冷地（主として先進国）で大量の死者がでるといふ悲劇は、ヘリウムスリーで救済できるものと推定される。しかし途上国対策については、技術・資金等の面から50年後に間に合わせるのは、かなり厳しい。だが急がねばならぬ。自然林を燃やし尽くしてしまえば何10億人という膨大な死者がでる。場合によっては大量の難民が先進国におしよせるかもしれない。先住民より難民の数の方が多いのだから、先住人はアメリカインディアンのようになる公算が大である。他人ごとといつてはられない。

(2) ヘリウムスリー核融合のメリット

ヘリウムスリー発電の特徴は、プラズマというもの（一種の電氣的現象 註1）を作り、これを直接電力に変換するところにある。原発では、核分裂のエネルギーで水を蒸気に変え、蒸気タービンを回し、発電機を回転させる。このようにエネルギーの種類を熱・機械・電気と何回も変換すると、変換の度に損失が出てしまう。又、動作温度を水の蒸発の温度に合わせてやらねばならない。このため総合の効率は40%以下になってしまう。

ところがヘリウムスリー発電のように、プラズマを直接電力に変換する方法では、少ない変換で済むうえに、高温のまま動作させることができるので、効率は95%以上といわれている。

水を使わないという特徴は、宇宙用ハードウェアとして有難い。月面・宇宙工場(軌道上)等の発電だけでなく、プラズマをそのまま材料加工に使うことができる。とくに月面工場では燃料のヘリウム3が手近にあるので、他の方法にくらべてきわだって有利と考えられる。又、ロケットとして使えば、比推力100万秒ともいわれている。これらについては後で紹介することにする。

(3) 核融合装置 (ちょっとわかりにくいのですが、「最新宇宙技術論」学習研究社の文を引用します。)

重水素-三重水素(D-T)を主として用いている核融合の研究が今日の主流となっていた。原因は、ヘリウム3が地球上に欠乏していることばかりではない。D-T反応の場合、要求される温度条件や磁場強度、その他の条件がもっともゆるやかで、核融合を達成しやすいからである。たとえば、重水素-ヘリウム3の反応によってエネルギーを生みだそうとすれば、今日すでにトカマク型の核融合炉で達成されている温度(約1億度C)の3~5倍ものプラズマ温度が必要となる。だが、過去15年の間に核融合の研究者たちはプラズマの実効温度を40倍も上げてきた。それをもう5倍向上させるのにそうむやみに長い時間はかからないだろう。

この高温条件下でプラズマを封じ込めるには、磁場の強度も増大させねばならない。今日、重水素-三重水素用のトカマク装置に必要と考えられている10~12テスラの磁場に代って、16テスラの磁場システムが必要だ(1テスラは1万ガウスで、5ガウスが地球磁場に等しい)。これはローレンス・リバモア国立研究所の磁気ミラー型核融合実験装置がすでに達成した磁場強度の30パーセント増にすぎず、日本ではすでに16テスラの磁場強度を持つ実験装置の建造も構想されているという。

また、核融合燃料を極性化する(燃料粒子のスピンの向きを磁場によってそろえる)ことによってもプラズマの反応を向上させることができる。これによってプラズマの内圧を軽減し、招かれざる重水素-重水素反応を抑えることもできる。プラズマの反応を50パーセント増大させられれば、反応炉全体の大きさを3分の2に縮小することも可能である。

では、いったいどのような方式の核融合炉が、重水素-ヘリウム3の反応にもっとも適しているのだろうか?たとえば、磁場の末端が開いており、直接電力に変換するプラズマ粒子が引き出しやすいタンデム・ミラー型反応炉のような開放系核融合炉、あ

るいはリニア核融合炉などが研究されている。ローレンス・リバモア研究所で行われたタンデム・ミラー装置による静電的な電力直接変換の初期実験では、95パーセントの変換効率が実証された。この核融合炉の形式はまた、宇宙船の推進システムにもっとも適しており、末端の開いた形は、ロケットの後ろから粒子を噴射するために必要である。

より高压のプラズマ電流によって駆動されるドーナツ型のトカマク装置においては、その形状自体がシンクロトン放射による電力への変換を助けている。マイクロ波は、それをよく反射するように壁を磨き上げられた反応炉の内部空間で発生する。このマイクロ波を電力に変換したり、化学反応の操作や食品への照射に利用するため、隣接する施設へ送り出すこともできる。

現在青写真段階にある重水素-三水素核融合実験装置を、より進んだ重水素-ヘリウム3燃料をテストするのに必要とされる改修は、ごくわずかな混乱しかもたらさない。米国の研究チームは現在、いかにして、またいつ頃この未知の核融合燃料サイクルがテストできるかを研究中である。彼らは、次の段階の技術試験炉が作動する頃、おそらく西暦2000年には、重水素-ヘリウム3燃料に点火し、それを実証炉として運転できると確信している。

ウィスコンシン大学のグループは、「月の土壌（レゴリス）を効果的なヘリウム吸収体としているのは、そのきわめて微小な粒子の大きさにある」と述べているが、これは、隕石の衝突によって月面の土壌が深さ5~15メートルにわたって細かく粉碎されているからである。

さらにまた、太陽風は、月の海の土壌に10パーセントほど含まれる「イルメナイト」の粒子に吸収されやすいため、月の高地の土壌より、海あるいは暗い色の平原部の土壌により多くのヘリウムが集積されることも確認されている。

月面のヘリウム3のうちどのくらいの量を経済的に採掘できるかについては今なお研究中であるが、ヘリウム抽出する技術については、すでに月面鉱業のさまざまな研究の中で開発されつつある。今まさに進行中の研究の中には、たとえば、月面基地にとってきわめて重要な月の土壌中の豊富な酸素を抽出する方法なども含まれている。

ウィスコンシン大学のチームは、月面の土壌からのヘリウム回収は、単純なプロセスで行う方法を固めている。月のヘリウム採掘のために彼らが開発した最新の方法では、遠隔操作の自走式車両（ローバー）が土壌を集め、処理することになっている。

ローバーは月の土壌の表層30センチ分を収集する。原材料はローバーの正面ですくい取られ、ヘリウムを放出するよう太陽熱で600度Cまで加熱される。放出されたヘリウム3はローバーのタンクに蓄えられ、処理済みの土壌はそれがすくい取られた場所から1メートルほど離れた地表に捨てられる。もしこの処理工程が2週間続く月の昼間に行われるなら、月面上の温度は130度Cまで上昇するから、必要な残りの熱は太陽集光装置から供給することが出来る。

ヘリウムは600度Cで土壌から解き放たれる。およそ10万トンの土壌が処理されることによって、1キログラムのヘリウム3が作られるものとみられる。

いったんヘリウムが土壌から解き放たれたあと、今度はさらにより豊富なヘリウム4からヘリウム3を分離しなければならない。低温工学的抽出方は、99・99パーセントの純粋なヘリウム3を作れることを実証している。この方法では、ヘリウムを絶対0度のわずか2・1度上(2・1K)まで冷却した時、ヘリウムの2つの同位体がフィルターによって分離するのである。この分離施設を、地表温度が120Kつまりマイナス153度Cまで下がる月の2週間続く夜の間に操業するなら、ヘリウムの冷却に要するエネルギーはより少なくてすむ。

〔註1〕

プラズマ plasma 物質が電離してイオンと電子が同密度で空間中に存在する状態になったもの。固体、液体、気体に次ぐ物質の第4の形態といわれている。グロー放電の陽光柱*は低温におけるプラズマであり、MHD発電*に用いる流体は高温におけるプラズマである。この状態では電気伝導性が高く、ほとんど電位差はなく、空間電荷は存在しない。

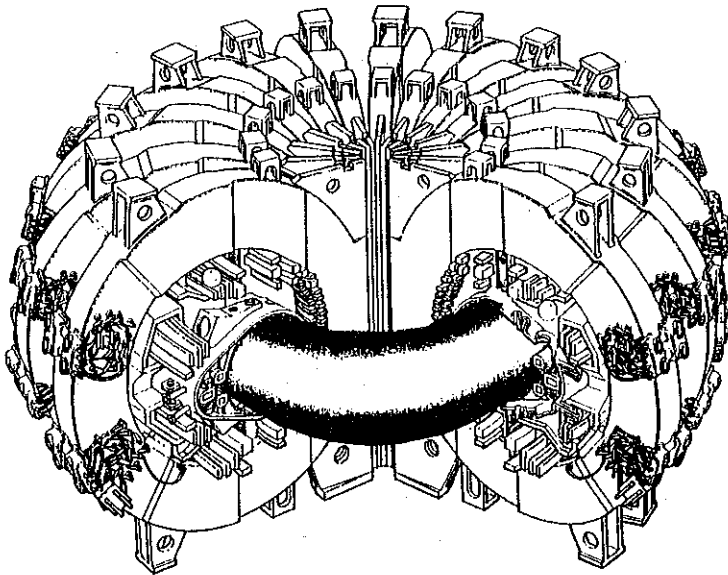
プラズマジェット plasma-jet アークによって電離された気体(プラズマ*)をつくり、高速度で噴出させたもの。数万度程度の高温が得られ、高融点物質の溶融切断などに利用される。

MHD発電 (—はつでん) MHD generation magneto hydrodynamics (電磁流体力学)を応用した発電方法。高温の燃焼ガスが一部分プラズマ*になって導電性を帯びたものをダクトに流して直角に磁界を加えると、そのいずれにも直角の方向に起電力が発生する。これをダクトの両側面に電極を置いて取り出す。原理的に直流大電力の発電に適し、現在の火力発電と組み合わせると総合熱効率を大きく向上できるものと期待され、現在開発が進められている。

核融合燃料サイクルの比較

核融合燃料の組み合わせは、放出されるエネルギーの形態を決定する。もともと点火条件のゆるやかな重水素-三重水素反応では、荷電粒子の形で得られるエネルギーは全放出量の20パーセントにすぎず、重水素同士の反応では、中性子+ヘリウム3または陽子+ヘリウム4のいずれかの反応となるが、その合計でも66パーセントにしかならない。重水素-ヘリウム3の場合のみ理論上100パーセントに近い荷電粒子が放出され、電力への直接変換効率も100パーセントに近くなる。

燃料	反応生成物	荷電粒子として放出されるエネルギーの比率
重水素-三重水素→	中性子+ヘリウム4	20%
重水素-重水素→	中性子+ヘリウム3 陽子+ヘリウム4	66%
重水素-ヘリウム3→	陽子+ヘリウム4	93~100%



典型的なトカマク型核融合炉（想像図）。ドーナツ形のコイルの内部空間に磁場の閉曲線を作り、プラズマを磁場で閉じ込めて圧縮し核融合を起こす。このタイプの核融合炉では、磁場にそって走る荷電粒子が加熱されて加速されることにより、プラズマ閉じ込め用のコイルに投入された以上の電力が返されることになる。すなわち、反応炉自体がMHD発電機を兼ねることができるのである。

初 夢

平成5年1月7日

長島 隆一

岩田様

新年明けましておめでとうございます。本年も宜しく願いいたします。
昨年のもくろみの話をきっかけに、多くの人のコンセンサスが得られ易いビジョンはないものか考えました。

その一案を初夢がわりに貴兄にお話し致します。

要は、月面に「国連」もどきの、あるいは「世界政府」もどきの機能をもつ機構をつくることである。

その理由をアト・ランダムに列挙すると、

- ① 現在、国連はアメリカのニューヨークにあるが、米国中心という感がぬぐいきれないでいる。
- ② 国連は、自国のエゴイズムがぶつかり合う場所になっている。月から美しい国境のない地球を常に見ながら議論しあうことは自国の利益よりも地球全体の利益を優先させる一助にはなりえるのではないか。
- ③ どこの国にも属さない高所で話し合っていると地球にいる人々が認識することも意味がある。

どこの国にも属さない場所として、地球にも「南極」があるが、誰もがすぐにながめられる場所としては「月」以外にない。（南極は、地球の端という感が強く、世界が結びつくという意味あいが薄い。）

- ④ 建設には金がかかるが、「世界政府」を目指した「国連」基地ということで、世界の人々のコンセンサスは得られやすく、世界中から金が集め易い。
- ⑤ また、世界的な意味で宇宙開発のモチベーションになりうる。
- ⑥ 政府の要人が月を往復することにより宇宙開発への理解が深まる。
- ⑦ 大量の物質運搬が必要であるが、現在、世界中のミサイルが余っており、この処分としても使用可能である。
- ⑧ 月から地球を多くの人が見ることにより、地球を大切に作る心が養われるようにもなる。
- ⑨ 現在、国連のあり方が問題化している時期でもあり、月面国連をつくる過程で、機構のあり方を全世界と打合せし、改善する一助ともなりえる。

入会案内

本会に入会を希望される方は、本誌添付の連絡用葉書に所定の事項を記入して本会まで送付するとともに、本年度の年会費を支払って下さい。なお、会費は主に会誌の発行にあてられます。

年会費： 3,000円（1992年6月～1993年5月）
会誌（年6冊）は無料で配布します。

年会費は、事務局（財務担当）に直接支払うか、郵便振替で下記口座に振り込んで下さい。（払込料金を加入者負担）

口座番号： 東京 2- 21144
加入者名： 宇宙先端活動研究会

投稿募集

宇宙先端は会員の原稿によって成り立っています。軽重、厚薄、長短を問わず奮って投稿を！（下記を参考にして下さい。）

会誌編集方針

- 1 『宇宙先端』は宇宙先端活動研究会の会誌で年6回発行される。
- 2 論文の内容は、全て著者の責任とする。
- 3 投稿資格：原則として本会会員に限る。
- 4 原稿送付：投稿する会員は、B5版横書きまたはA4版横書きでそのまま版下となるような原稿およびコピー1部を、宇宙先端研究会編集局宛送付する。原稿は返却しない。
- 5 論文は未発表の原著論文に限る。ただし、他に発表したものの要約、解説等は歓迎する。掲載論文に対する質疑、意見、提案等、誌上討論は大いに歓迎する。
- 6 A4で20ページを超えるものは掲載しないことがある。宣伝、中傷、その他本会の趣旨から極端に外れる投稿は掲載できない。編集人は会誌の整合のため、著者に改稿を求めることがある。

原稿送付先：〒105 東京都港区浜松町2丁目4番1号
宇宙開発事業団 総務部総務課
福田 徹

編集に関するお問い合わせは下記へ。

福田 徹（編集局長） TEL 03-5470-4132 FAX 03-3433-0796
岩田 勉（編集人） TEL 0298-52-2250 FAX 0298-52-2247

編集後記

ついに、発行ペースが完全に一号遅れになってしまいました。本号は92年11月号です。しかし、長島さんの一文は次号廻しにするのはあまりに惜しく、11月号に新春記事が載る結果に。まあ、そのうち取り戻します。また、編集局長は本業で異動になりましたので原稿送付先が変わりました。

(福)

宇宙先端
宇宙先端活動研究会誌

編集人
岩田 勉

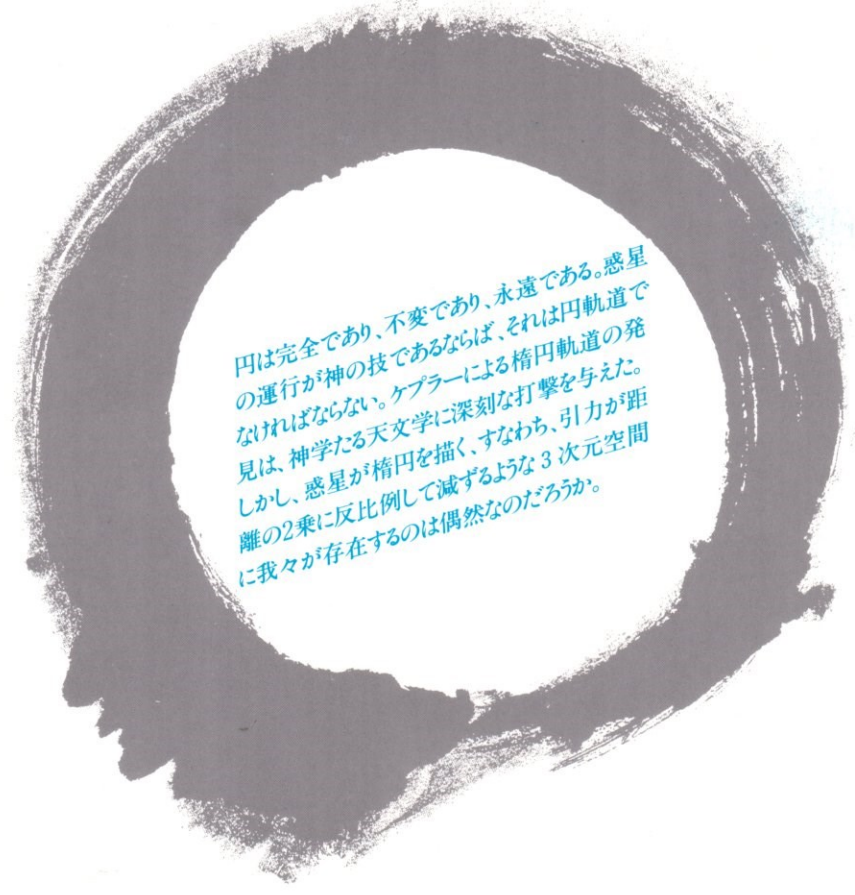
編集局長
福田 徹

編集顧問
久保園 晃 有人宇宙システム(株)代表取締役社長
土屋 清 帝京大学理工学部教授
中山 勝矢 工業技術院中国工業技術試験所長
長友 信人 宇宙科学研究所教授
山中 龍夫 航空宇宙技術研究所宇宙研究グループ総合研究官

監査役
伊藤 雄一 日本電気株式会社宇宙開発事業部技師長

宇宙先端	第8巻 第6号	頒価 1,000円
平成 4年11月15日発行		編集人 岩田 勉
発行 宇宙先端活動研究会		
東京都港区浜松町 世界貿易センタービル内郵便局私書箱 165号		

無断複写、転載を禁ずる。



円は完全であり、不変であり、永遠である。惑星の運行が神の技であるならば、それは円軌道でなければならぬ。ケプラーによる楕円軌道の発見は、神学たる天文学に深刻な打撃を与えた。しかし、惑星が楕円を描く、すなわち、引力が距離の2乗に反比例して減ずるような3次元空間に我々が存在するのは偶然なのだろうか。