

太陽の恵みヘリウム3

— 月面資源のエネルギー利用に向けて —



後藤 誠 一*

四半世紀も前に出版された小松左京氏の代表作の一つ「さよならジュピター」では、惑星間の常時飛行や太陽圏外への脱出に、ヘリウム3を燃料とする核融合推進ロケットが使われている。もちろんこれはSF小説の中の話しに過ぎない。しかし最近ではまんざらSFとは言えず、ヘリウム3を燃料とする新しいタイプの核融合発電方式が、科学的研究課題として真剣に模索され始めた。

地球上で文化的生活を営む人類を100億人程度とした時、究極のエネルギー源は今のところ核融合に依存せざるを得ないと筆者は考えている。当面100年間ぐらいでも、その必要性があると思っている。地球環境の保全という制約からも、この新しいエネルギー源は合理的な答えをもたらす筈である。しかし識者の大半は、今まで約40年間(研究規模が巨大となつてから20年間)も核融合を研究しながら実用化されるという話を聞いた事が無い、と追求されよう。以下に“新しいタイプ”という内容を簡単に紹介することにより、大きな夢があると理解していただければ、それへの回答の一部となるう。

現在の核融合開発主路線

エネルギー資源という限り、それは大量に且つ経済性に見合って取得されねばならない。有効な核融合反応速度を持つ原子には先ず重水素(D)があり、量的にもコスト的にも全く問題が無い。しかし、説明は省略するが、DD反応核融合炉は全く非現実的である。そこでトリチウム(T)による次の反応



を選ぶことになった。nは高速中性子(14MeV)であり、これにより核融合炉自身で、リチウム(L_i)からTを作り出す。L_iは大量にあり、且つTの生産コストも大きくない。これを発電炉とする熱焼部分(1~2億度のプラズマ)実現の見通しはもう既に得られた。その主役となったのがトカマクと呼ばれている磁場閉じ込め装置である。

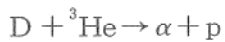
ところがここに来て、炉の全体構成に関する工学的・技術的研究から、トカマクをベースとする発電プラント実現の死命を制しかねない大きな問題が表面化した。100万KW発電炉を想定した時、それは(1)大量の高熱流と中性子束による炉壁材料の損耗が激しい、そのため壁を2年前後で交換せねばならないこと、(2)14MeV中性子による炉構成物の低レベル放射化、(3)重量が3~4万トンになる、という点にまとめられる。結果的に、コスト・安定性・環境保全性をクリアーするのが並み大抵でなくなった。

* Seiichi GOTO
1940年5月29日生
1965年大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了
現在、大阪大学工学部、超高温理工学研究施設、研究施設、教授、施設長、工学博士、プラズマ理工学、核融合学
TEL 06-879-7913
FAX 06-879-7916
E-Mail goto@ppl.osaka-u.ac.jp



月面ヘリウム3資源と基礎反応型式

それでは別の核融合反応を考えられないのか。それが冒頭に述べたヘリウム3 (^3He) ベースの次の反応である。



nの代わりに15 MeV プロトン (p) と、ヘリウム4の原子核すなわちアルファ粒子 (α) とが出力担体となる。高温(プラズマ)状態ではいずれも荷電粒子のため、前項で問題となった中性子とは異なり、放射化問題は大きく回避され、磁場や電場による制御法が考案できる。但し、有効な反応レートを実現するための温度はDT反応の数倍、閉じ込め(断熱)条件も数倍難しくなる。それにもかかわらず、前述した(1)と(2)項の大問題は本質的に回避される。(3)の問題は別の考察を必要とする。)このような有為性は核融合研究の初期から認識されていたが、燃料資源としてのヘリウム3が地球には極めて低い濃度でしか存在せず、また安価な人工生産法も見出せそうではなかった。なおジュピター(木星)には大量の ^3He が存在する。これは宇宙のビッグバン期に生成されたものが木星大気内に捕捉されたもので、小松左京氏の着眼点となったところであろう。

そこへ1980年代後半に朗報がアメリカの月科学研究者達から発表された。「月面上には採集可能なヘリウム3が100万トン程度あり、核融合燃料としては当面無尽蔵と考えられる。」という研究結果である。太陽内の3種類の融合反応系のうち、陽子-陽子系の過程でp(d, γ) ^3He 反応から発生し、この極く一部がソーラーウインド(太陽風)に混在して宇宙空間に放出される。月面は磁気や大気を持たないため、この太陽風に直接さらされ、種々の高速粒子は月面のレゴリス(月の砂)に衝突し砂粒の表面から20~30 nm内にインプラントされる。とくに ^3He は、玄武岩の碎片に含まれるイルミナイト($\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$)の TiO_2 に高濃度で蓄積されている。 TiO_2 の月面分布は主に月の海に多いこと、そのレゴリスの厚みは少なくとも3~5 mあり、その組成は深さに対し均一である。

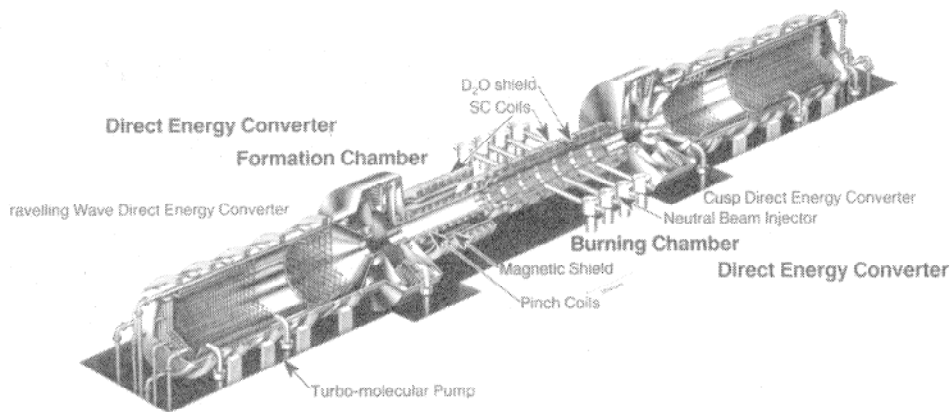
これらは月と太陽の誕生以来40億年以上の間、月面への大小様々な隕石の絶え間のない衝突と、太陽風の照射による結果である。月は太陽からの恵みをしっかりと保存していたわけである。

以上の内容は、米国のアポロ月探査機や旧ソ連のルナーが持ち帰った土壌サンプルの分析、地上からの電波反射望遠鏡観測、月面人工衛星による γ 線測定等から総合的に確認されている。さらに最近の研究では、 ^3He を採掘精製し、地球に持ち帰るときのコスト試算も行われた。地球上の発電炉が多数建設され生産量が多くなれば、グラムあたり300ドル前後とされている。月面基地建設の初期投資額が大きい—これは主に地球からの機材輸送費—ので、初期時コストはその500倍ぐらいと考えられているが。

ヘリウム3ベース発電炉の構想

反応素過程の出力は分かっているから、電力への変換効率を指定すれば ^3He の消費量は算出される。すぐ後に述べる新しいタイプの炉では、100万KW発電に対し年間50~70 Kgを消費することになる。それでも人類の消費エネルギーが現状程度とすれば、月面の100万トンは一応無尽蔵と考えて良いことになる。熱料コストのうえからも大きな問題とならないことが理解されよう。

最大の問題点は、ヘリウム3を燃焼し得る核融合炉を実現できるか否かにある。現在の炉心プラズマ型式トカマクは既にDT炉の条件を実現しているから、その延長線上にヘリウム3炉を模索している。また、他のタイプのプラズマ閉じ込め型式も検討されている。しかし残念ながら、それらのほとんどは、ヘリウム3燃焼には適合しないか、あるいはあまりにも得策でない。現在のところ、合理的な可能性と潜在的魅力を有している発電プラント構想は、唯一FRCプラズマと呼ばれる閉じ込め型式をベースとした概念設計炉アルテミス(ARTEMIS)²⁾である。これは、百田らにより提案されているもので、その概観を図に示す。全長は約150 mで、真中付近の30~50 m部分に核融合燃焼部としてのFRCプラズマ閉じ込めを採用している。両端各50 mの部分は、直径10 m弱の大型

FRC ベース D^3He 概念設計核融合炉アルテミス²⁾。

真空容器と考えてよく、反応出力(15 MeV)担体のプロトンから直接電力にエネルギー変換する機能を有している。これを用いることにより、プラント全体の発電効率は65%以上と試算された。総重量は約5000トンと小さく、工学的技術はほぼ既存技術そのもの、材料の放射化や損耗を誘起する14 MeV中性子(これは附属的反応として存在する。)発生量は出力比2%以下となっている。

私共の研究 — FRC プラズマ —

ARTEMIS 炉のコンセプトの優秀さは、既に国際的に高い評価を得ている。その実現への道は、燃焼部を形成するFRCプラズマが、設計の前提としている性能に達しうるかどうかのみにかかっている。さて、FRCとはField-Reversed Configurationの略称で、名の示すように高温プラズマ内部で磁力線方向が反転していることを意味し、従来の磁場閉じ込めと相当趣きを異にする。この方式のプラズマ研究の歴

史は浅く、またこれまでのトカマクプラズマ等と比べ理論的解析が難しく、研究者を近寄り難くしている。そこで、筆者らは実験的アプローチにより、キーポイントとなる課題領域を切り拓こうとしている。もう紙数もオーバーしているようなので、以上のこと全てに亘り参考文献³⁾を御覧頂きたい。なお、幸い平成7年度の補正予算により特別設備費を頂戴したので、鋭意これらに邁進するつもりである。

参 考 文 献

- 1) 後藤誠一:「地球新時代に向けて」7章, 69～82頁(第26回大阪大学開放講座, 平成6年8月印刷)
- 2) H. Momota et al, Fusion Technology 21, 2307 (1992).
- 3) 小特集「 $D-^3He$ 核融合とその開発課題」, プラズマ・核融合学会誌第71巻, 469～531頁(1995).

