

小特集 D-<sup>3</sup>He核融合とその開発課題

## 9. ヘリウム3資源[1]

百田 弘

(核融合科学研究所)

(1995年4月14日受理)

### Helium 3 Resources

MOMOTA Hiromu

*National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan*

(Received 14 April 1995)

#### Abstract

The helium 3 resources for D-<sup>3</sup>He fueled fusion are presented[1]. Terrestrial helium 3 is too dilute in air for practical use. Artificially <sup>3</sup>He is produced by the  $\beta$  decay of tritium from CANDU reactor and reservoir of thermo-nuclear weapons, which is not sufficient to supply energy resources of 21st century. An inventory of  $\sim$  one million tons of <sup>3</sup>He deposited in the lunar regolith by the solar wind has been well-established. This amount of <sup>3</sup>He is equivalent to provide energy demands in the world of the middle of 21st century for about 500 years.

#### Keywords:

helium 3 resources, D-<sup>3</sup>He fueled fusion, lunar regolith,

#### 9.1 はじめに

21世紀中頃に予想される100億程度の人々が文化的生活を営むためには、大雑把に言って300億キロワット程度のエネルギーが必要である。既に議論されたように100万キロワットのヘリウム3動力プラントは年間50～70キログラム程度のヘリウム3燃料を消費するので21世紀中頃の文明世界は年間2,000トン程度のヘリウム3資源を必要とする。この大量のヘリウム3燃料資源の確保はD-<sup>3</sup>He核融合開発の大前提であるが、はたしてこれが可能かどうか問題である。

#### 9.2 地球環境での天然ヘリウム3資源

宇宙生成(ビッグバン)の初期には $n(\beta)p$ や $p(n,D)$ に続く $p(d,\gamma)^3\text{He}$ その他の核反応によってヘリウム3が大量に発生したと考えられる。この原初ヘリウム3のヘリウム4に対する濃度比は140appmと考えられている。地球形成と進化の過程で数百万から千万トンもの原初ヘリウム3が地球内部のマントル中に捕獲された。このヘリウム3はマントル中での種々の核分裂で発生するヘリウム4で希釈され、濃度比は0.015appm程度にまで低下している。年間に全世界のヘリウム噴出口から大気中に放出されているヘリウム3はこ

のうちの3キログラムである。

同様の原初ヘリウム3は地殻プレート中にも封入されており、西太平洋のプレート沈下によるプレート溶解によってヘリウム3が開放される。体積比が $1.4\sim 8.8\times 10^{-20}$ で総量が25,000トン程度のヘリウム3が地殻の下に混じって蓄えられていると見積られる。このヘリウム3のヘリウム4にたいする濃度比は2~10ppmである。天然ガス田でも同様の核分裂に伴って若干のヘリウム3が発生し、これに原初のものが加わった結果天然ガス中のヘリウム3は $4.2\sim 6.7\times 10^{-10}$ の体積比である。

地球大気中では、原初ヘリウム3が地球進化の過程で宇宙空間に拡散したと考えられる。地球内部から大気中に放出されるヘリウム3と宇宙線による酸素や窒素の核破壊 (spallation) でつくられるトリチウムのベータ崩壊によるヘリウム3とが宇宙空間に拡散放出されるものとの間で平衡を保っている。大気中のヘリウム3は総量で4,000トン程度、大気との体積比は $7.3\times 10^{-12}$ でヘリウム3/ヘリウム4の体積比は $1.4\times 10^{-6}$ である。

このように、地球環境には多量の天然ヘリウム3が存在するが、その濃度は非常に希薄で、これまで天然ガスの副産物としての分離利用されてきたにすぎない。

### 9.3 ヘリウム3の人工資源

ヘリウム3を人工的に増殖すべく  $p(^6\text{Li}, \alpha)^3\text{He}$  反応の利用が検討された。固体かプラズマ状態の $^6\text{Li}$ に陽子ビームを照射することやリチウムと陽子の混合プラズマを想定したが、この反応断面積が小さく、ヘリウム3の燃焼で得られるエネルギーを考慮してもエネルギー的にバランスしない[2]。軽水炉やD-T核融合炉からの中性子を固体のリチウムに照射してトリチウムを作り、そのベータ崩壊を待つてヘリウム3を製造することも考えられる。しかしそのためには、百万キロワットのヘリウム3動力炉1基あたりで1トン、すなわち1メガトン級の熱核爆弾数百発分のトリチウム貯蔵が必要である。これはトリチウムという金属透過性が非常に高い放射性物質の管理上の問

題に加えて核兵器その他への転用の危険性、いわゆる“Safe Guard”の観点での問題が極めて大きい。

カナダの重水炉 (CANDU) を用いて年間2キログラム程度のヘリウム3を製造することができる。この原子炉は減速材として重水を採用しており、重水素の中性子捕獲でトリチウムが発生する。このトリチウムのベータ崩壊を待つてヘリウム3を得ることが可能で、10キログラム程度のヘリウム3を供給することはそれほどの大問題ではない。

ベータ崩壊によって性能が劣化した熱核兵器のトリチウムの再装填で得られるヘリウム3は米国だけで年間15キログラムであり、十数年間に総量300キログラムを確保することは可能である。これらのヘリウム3の人工資源はヘリウム3核融合の研究開発のためには十分に役立つ量であるが、21世紀の基幹エネルギー資源としてはあまりにも少量で問題にならない。ちなみに米国エネルギー省によって販売される研究目的のヘリウム3は標準状態で1リッターあたり100ドル (グラムあたり700ドル) とのことである。

### 9.4 ヘリウム3の地球外資源

持続的エネルギー資源たるに十分な量のヘリウム3は地球外に豊富に存在すると考えられる。木星、土星、天王星や海王星等のガス状惑星の10%以上がヘリウムで、原初ヘリウム3は $10^{26}$ キログラム程度と推定される。ただし、このヘリウム3資源の直接測定はまだ行われていない。

月は地球とちがって地磁気や大気を持たず、表面は直接太陽風にさらされている。太陽内の  $p(d, \gamma)^3\text{He}$  反応によるヘリウム3は太陽風の一部として月面に到達する。ソ連の月ロケットLUNAによる測定によると、太陽風でのヘリウム3とヘリウム4の比は480ppmである。これらの粒子は月面の岩石に激突して岩石の表面から20~30ナノメートル程度に埋め込まれる。結局、月はその形成以来45億年もの間この照射をうけてきたわけで、極く僅かのヘリウムは年月とともに月面の岩石から拡散して宇宙空間に放出されるが、なお多量のヘリウムが岩石中に蓄えられてい

る。

米国の月探査ロケット：APOLLO-11, 12, 15, 17や旧ソ連のLUNA16, 20, 24等が月面から持ち帰った土壌サンプルの解析は月面で経済的に採取可能なヘリウム3の存在を明らかにした[1]。月の明るく輝く高地では斜長石の碎片（カルシウム，アルミニウム，シリコン）を多く含んだ土壌が10～15メートルの厚さで岩床を覆っており，暗くて海と呼ばれている平らな部分は玄武岩の碎片（鉄，マグネシウム，チタン）を多く含んだ土壌が4～5mの厚さで岩床を覆っている。これらの土壌サンプルの分析によると，ヘリウムは月のイルミナイト ( $Ti_2O_3 \cdot FeO$ ) とよばれる細かい砂，とくに  $TiO_2$  に高濃度で蓄積されている。月の表面は大小さまざまな隕石の衝突によって4～5メートル程度，少なくとも3メートルの深さまで粉碎・混合されて細かく均一の土壌が作られるのでヘリウムもこの程度の深さまで一様に蓄積されていると考えられる。蓄積されているヘリウムの重量比は10～100マイクロメートルという微細な粒子で最も大きくなっている。

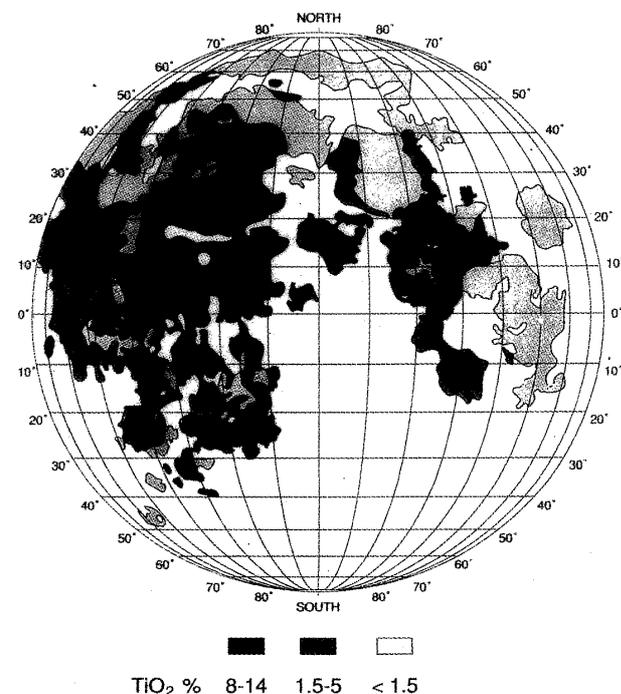


Fig. 9.1 Distribution of  $TiO_2$  on the lunar surface:  $TiO_2$ , i.e. helium 3, is distributed with high density in the maria.

月面での  $TiO_2$  の分布が米国と旧ソ連で独立に測定された。測定は地球からの電波の反射を望遠鏡で調べるもので， $TiO_2$  に固有の反射を地上実験でのデータと比較した。Fig. 9.1はその結果[3]で，月面の表側（地球に面した側）の海に  $TiO_2$  が高濃度で存在することがわかる。裏側の月面には海が殆どないので  $TiO_2$  も比較的低濃度と考えられる。この  $TiO_2$  の分布とヘリウム3の分布がよく一致していることは月面人工衛星による太陽活動の活発なときの月面からの  $\gamma$  線を測定することで確認されている。これらの資料を基にして，米国ヴィスコンシン大学の研究グループは月面で採取可能なヘリウム3を100万トン以上と推測している。これは21世紀中頃の全世界のエネルギー需要を500年間まかなえる量である。ここで，ガス状惑星にはヘリウム3が  $10^{26}$  キログラム程度も存在することを思い起こせば，月面のヘリウム3資源は当面のエネルギー需要を賄うには十分の量であるといえよう。

ヴィスコンシン大学を中心とした研究者グループは有人月面基地を建設し，ヘリウム3を採掘・精製してこれを地球に持ち帰るシナリオでヘリウム3のコストを試算した。コストを大きく左右するのは月へのプラント機器の輸送費用である。生産開始の2015年には初期投資が大きくヘリウム3のコストはグラムあたり15,300ドルにもなる。その後，生産量が増加するとともにコストは年々低下し，2040年以降にはグラムあたり150～300ドルに落ち着くとしている。ここでドルは1990年の基準である。何れにしてもこの月面ヘリウム3は21世紀以降の人類に明るい展望と  $D-^3He$  核融合燃料を非常に安価に提供してくれそうである。

### 参考文献

- [1] L.J.Wittenberg, J.F.Santarius and G.L.Kulcinski, Fusion Technology **10**, 167 (1986).
- [2] H.Momota, Paper presented at 6th International Toki Conference (held at Toki, Japan, 1994).
- [3] "Lunar Mare Basalts," Basaltic Volcanism of the Terrestrial Planets, p.236, Pergamon Press, Oxford (1981).