

話 題 (I)

低 温 核 融 合

(原研) 鹿 園 直 基

1. 経 過

本年3月, Fleishmann, Pons及びJonesの発表以来低温核融合のブームがおこった。数多くの研究会やワークショップが続けざまに開催され, その結果は直ちに新聞, 雑誌等で報道されたのはご承知の通りである。現在では一時の熱狂的ブームも治り, 低温核融合についてその分析も進み, 内容もかなり整理されてはきている。しかし未だ完全に解決したわけでもない。低温核融合については既に多くの優れた解説が雑誌等に掲載されており, 改めて述べることも無いが, 筆者なりの整理もしてみたのでご参考までに記すことにする。周知のことの繰り返しや, 間違いもあることと思うが読者のご寛容をお願いしたい。

いま騒がれている低温核融合には二つの系統がある。一つはFleishmann, Ponsの系統であり, 一つはJonesの系統である。

1) Fleishmann, Ponsの実験¹⁾

パラジウムの電極で重水を電気分解したところ, 大量の熱が発生した。彼等はこのを核融合反応による発熱であると主張した。その主張の根拠は, (1)ジュール熱や化学反応では説明がつかない, (2) $D(n, \gamma)$ 反応によるガンマ線を観測した, (3)トリチウムからのベータ線を観測した, というものである。しかもその発熱量から推測される核融合反応率に対して, 観測された中性子量がきわめて少ないことから, これは新しいタイプの未知の核反応であると主張した。

現時点では, この主張に対して懐疑的な立場をとる人が多い。その理由は以下の通りである。

- (1) この実験を再現した追試がでてこない。発表の直後に幾つかの追試成功のニュースが流れたが, 今では大体否定されている。
- (2) 実験方法の公表を拒んでいる。彼等の論文には実験を再現できるような記述がされていない。
- (3) 測定データに疑問がある。熱の測りかたは正確か, ガンマ線は自然放射能によるものではないのか, トリチウムは本当に核融合によって生じたものなのか, などの疑問に答えられていない。
- (4) 根拠の乏しい推測をしている。未知の核反応といっているが, 実験的根拠に基づいたものではない。これを裏付ける説もだされたが, いづれも核反応の常識からは外れすぎていて説得力に乏しい。

2) Jones達の実験²⁾

チタンを電極として重水を電気分解したところ, 微量の中性子を検出した。この中性子は核

融合反応によるものであると主張した。

この主張に対しては、Fleishmann, Pons の主張よりは信憑性が高いと考えている人が多い。しかし、本当かもしれないが、まだよく分らないというのが現時点での評価である。

本当かもしれないと考えられる理由は以下の通りである。

- (1) 中性子検出装置が優れている。独自に開発した装置で、中性子のエネルギーが測定できて、D-D中性子のエネルギー 2.45MeVを確認している。宇宙線に含まれる中性子のエネルギーは一定でないので、バックグラウンドとは区別ができる。
- (2) 宇宙線の中のミュオンによるミュオン核融合ではないかという説もだされたが、東大、KEK、理研グループの実験³⁾でこの説は否定された。彼等は電解しながら加速器からのミュオンを（宇宙線にくらべれば圧倒的に多い）照射したが、中性子の発生はなかった。従って、宇宙線の影響ではなさそうだといえることができる。
- (3) ロスアラモス⁴⁾とイタリア⁵⁾のグループが独立に Jones の電解法とは違う方法（高圧低温で重水素ガスをチタンに吸わせる方法）で中性子発生を検出した。中性子発生量は Jones 達のいう値に近い。

また、疑わしいと考えられる理由は以下の通りである。

- (1) 追試の成功例が少なく、確定的では無い（ようにみえる）。
- (2) 今のところ理論的に説明が困難である。

低温核融合がいまひとつ信用されないのは実験に再現性の無いせいである。現在は、確実に中性子が発生する条件が見出されていない状況にある。ある時たまたま中性子或いは熱或いはトリチウムが検出されたということであって、これだと装置の一時的異常、バックグラウンドの一時的増加など、何かの間違ひではないかという疑いを完全にふっしょくすることができない。例えばロスアラモスの Menlove 達の（高圧法）実験⁴⁾は何回も実験をくりかえしており、信頼性の高いものだがそれでも平均して6回に1回の成功である。いつでも実験が成功するわけではない。そしてどういう物質でどういう時に成功するのかは未だ不明である。

現状では結論をだすことはまだできないが、あえて言えば Fleishmann, Pons の云う、直ちにエネルギー生産ができる、しかも中性子の発生が極めて少ない、というようなことは多分ないであろう。しかし Jones 系統（高圧法を含めて）の微量中性子の発生はある可能性がある。たとえ微量であってももしこれが本当だとすると画期的なことであって、将来エネルギー生産に発展することも全面的に否定することもできない。また、物理、化学の基礎分野に新しい側面をひらく可能性もある。

2. 低温核融合の原理

1) 分子的描像（分子モデル）

Jones 達²⁾は低温核融合の可能性を以下のように説明した。D₂分子を考えると、二つのD原子核のまわりを電子がまわり、丁度核同志のクーロン反発力を打消す位置にまでD原子核を

引寄せている。その距離は 0.74 \AA ($0.74 \times 10^{-8} \text{ cm}$) で、(重)水素原子を2個接触させた距離(約 1 \AA) よりはやや近い。これよりもD原子核をさらに近づけるためにはクーロン障壁を越えてゆかなければならない。核力の働く距離は約 10 fm ($10 \times 10^{-13} \text{ cm}$) であり、この位置でのクーロンエネルギーは 1 MeV 弱である。原子分子の電離エネルギー(リユードベリエネルギー)は 10 eV のオーダーであるので、原子分子的スケールの現象を通して核力の働く距離まで核同志を近づけることは容易ではない。古典力学では外から仕事をしないかぎり分子内の核同志が近づいて核反応を起こすことはないが、量子力学ではトンネル効果(或いはゼロ点振動)によって原理的には核反応を起こし得る。しかしその反応率は極めて小さく、1分子当たり毎秒 $10^{-70} \sim 10^{-60}$ である。自然界にある D_2 分子が核融合を起こすことは実際上は無視できる。事実 D_2 ガス 或いは重水が自然の状態では核融合反応を起こしたということは観測されていない。

Dのまわりをまわっているのが電子でなく電子の200倍の質量をもつミュオンの場合には、D核間の距離は $1/200$ に縮まっている。クーロン障壁の厚みが薄くなっているために、透過率が小さくなり反応率は 10^{12} と劇的に増加する。これは、ミュオン分子はサイズが小さくなるために核のまわりの負の電荷密度が大きく、正の電荷を遮蔽する効果が大きくなるためである。ミュオン核融合は実験的にも確かめられていて、科学的エネルギー収支のブレークスルーには達している⁶⁾。

もしも仮想的な重い電子があって、それが分子をつくっているとすれば、反応率は大きくなる筈である。Jones が彼等の実験で見出したDペア当たりの反応率は 10^{-23} /秒であり、自然の D_2 分子で予想される値の 10^{50} も大きい。反応率 10^{-23} /秒の値を得るためには、電子の質量が5倍位あればよい。チタンの中では電子の質量は有効的に重くなっているのではないか。これが Jones の与えた説明である。

たしかに物質内の電子には有効質量という概念があり、ものによっては自由電子の10倍にもなるものもある。しかしこの概念がそのまま分子をつくる電子にあてはまるかどうかについては多くの物性物理屋は疑問を持っている。物質内の電子は自由な電子とは違う特性をもっているのは確かだが、それがDペアを引寄せるとどのように働くかは吟味を要することである。

2) プラズマ的描像(プラズマモデル)

D核と電子との二成分系プラズマを考える。トカマクなどの核融合装置は全て高温低密度プラズマをつくり、核融合反応を起こさせようとするものである。高温低密度プラズマの場合には、自由な裸の核同志の衝突とみなすことができる。プラズマの温度が下がり密度が増えてくると従って、核と核との間にある電子の遮蔽効果がきいてくるようになり、裸の原子核同志の衝突とは異なる様子を示すようになる。更に温度が下がり密度が上がると核はお互のクーロン力のために動けなくなり格子を組むようになる(電子は軽いので全体に広がっている)。このような状態での核反応は自由な核同志との衝突とは全く異なり、多くの核が関与する反応となる。反応のメカニズムは、互いに押しあって平衡状態にある核のゼロ点振動の振幅の重な

りによるもので、温度には殆どよらない。二核間の実効ポテンシャルによって反応率が決定される。このような反応は Pycnonuclear Reaction と呼ばれ、冷たい星（例えば白色わい星）の内部で起こる核反応として知られているものである⁷⁾。この考えを適用して計算してみると、Jones のいう 10^{-23} /秒の反応率を得るためにはプラズマの密度が $10^{26} \sim 10^{27}$ であることが要求される⁸⁾。この密度は普通の物質の密度 ($\sim 10^{23}$) の千倍及至一万倍にあたる。このような高密度プラズマでの平均核間距離は約 0.2 Å であり、この値は Jones の分子モデルで出した値と一致する。

星の内部のような超高压なしに、通常の物質内でこのような高密度が得られるかどうかについては今のところ何のてがかりも無い。

3) 物質内核融合

重水素原子核は物質中に入っており、自由な分子や二成分プラズマとは異なる。物質を構成する他の原子との相互作用があり、あるいは核間距離を 0.2 Å 程度に近づけるメカニズムがあるかもしれないという期待はある。しかし残念ながら定常状態ではこれは期待薄である。例えば PdD 中の D の間隔は 2.85 Å もあり、どのように D をつめても 2.1 Å よりは近づかないということが経験的に知られている。近づく可能性としては一つのサイトに 2 個入るとか、格子の点欠陥に何個もつまるとかのことが考えられ提唱されているが、定量的に議論されているわけではなく、いまのところ定性的な推測にとどまっている。

核を近づけるメカニズムはいいかえればクーロン反発力を如何に遮蔽するかということである。物質内で平均の核間距離が離れていてもかならずしもそれ以上近づけないわけでもない。クーロン力が遮蔽されていればある距離までは近づくことができるであろう。近藤モデル⁹⁾ではこの距離をトーマスフェルミ遮蔽長にとる。Pycnonuclear Reaction の計算では、電子の密度は一様であると仮定しているが、プラズマの密度が比較的薄い（普通の物質程度）場合には核はまわりの電子をひきつけて遮蔽効果を持つ。即ちトーマスフェルミ遮蔽である。（核のまわりの電荷密度が大きくなるので、電子の質量が実効的に重くなったとみなすこともできるが、分子モデルでいう有効質量とは物理的意味が異なる。）Pd のトーマスフェルミ遮蔽長をその電子比熱から求めて核融合反応率を求めてみると $\sim 10^{-39}$ /秒とかなり大きな値が得られる⁹⁾。しかし未だ Jones 達の得た 10^{-23} には至らない。また、純粋な Pd の物性値が Pd 中の D にそのまま適用できるかどうかについての保証もない。

遮蔽長を決める物理量は核のまわりの電子の密度とその状態密度とである。物質中の（重）水素の状態はフリーの水素原子の電子状態とそれほど変わらないと考えるのが常識的であろう。フリーな重水素原子の電子密度と状態密度を用いると、核反応率は 10^{-59} /秒となり極めて小さくなる⁹⁾。しかしなんらかの理由によって電子状態が大きく変ることもあるかもしれないという立場をとる人もいる。例えば前述のように格子欠陥等に入った核は近づき得るといふ計算例もある。幾つかの仮定はあるが、実効的なクーロン障壁を求めて計算してみると、許容できる

パラメータの値でも十分近づく解もあるという⁸⁾。

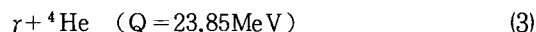
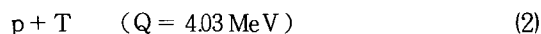
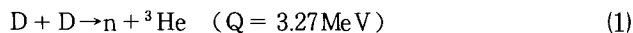
核反応はトンネル効果を通じて起こるので、ゼロエネルギー近くでの反応率は主としてクーロン障壁の透過率によって定まる。透過率は通過する粒子の質量が小さいほど大きいので、反応率が小さい場合にはD + D反応よりもp + D 反応の方が起こりやすい。通常の熱核融合反応では当然p + D 反応よりD + D反応が起こり易く、t + D反応が最も反応率は高い。

物質内での核融合反応は、定常状態では起こりそうもない、起こるとすれば非定常状態あるいは非平衡状態ではないか、というのが常識的な理論的予測である。それは表面現象かもしれないし、動的な現象かもしれない。また、相転移や結晶の不整合など複数の要因がからんだ現象かもしれない。非定常状態を作る試みは色々と考えられる。例えば、人工的に欠陥を作る、機械的衝撃を与えるなどである。最近では非定常状態からの低温核融合のメカニズムとして、fracto-fusion という説が登場してきている。これは結晶が割れた時に電圧が発生してDイオンを加速し、D - D反応を起こさせるというものである。実験的にはしかしこの説を支持するような事例は未だ現れていない。

3. 極低エネルギー核反応の特殊性

未知の核反応ではないかというFleishmann, Ponsの主張は、原子核物理の立場からは簡単には納得し難いというのが第一感である。以下にその理由を述べる。

D + Dの核反応には三つの分岐がある。



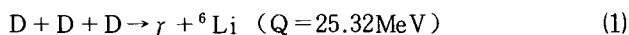
この三つの分岐の割合は、ほぼ1 : 1 : 2×10^{-7} で実験的に定められている。(1)と(2)の分岐比が1 : 1であるのは核力はnとpとに同等に働くことの現われである。(3)の分岐比が小さいのは核力と電磁力との強さの違いの現われである。従って、この比は基本的には普遍定数で定まっており、核の構造等で多少の違いはでも大きく変えることは考えにくい。現在観測されているあらゆる核反応でこの事実を反するものはなく、D + D反応だけが特別である理由はないというのが常識的な考えである。

(3)だけを考えれば、ガンマ線を出さずに ${}^4\text{He}$ が大部分のエネルギーを担うことは、原理的には可能である。物質の格子振動にエネルギーと運動量の保存を受持ってもらえばよい。しかし、ガンマ線のエネルギーは 10^7eV のオーダーであるのに対して、フォノン（格子振動）のエネルギーは eV のオーダーであるので、エネルギーのスケールが違いすぎて、そのメカニズムを考えることは困難である。また、たとえこれが可能だとしても(3)の分岐比が変るわけではないので、中性子を出さない核反応にはならない。

極低エネルギー（10keV以下）ではD + D核反応断面積はクーロン障壁のため断面積が急激に小さくなるので測定が難しく、実際の測定データは存在しない。上述の分岐比は10keV以上

のエネルギーでの測定から定めたものである。従って、今問題となっている低温核融合のように殆どゼロエネルギーでの分岐比の実験的根拠はない。(1)と(2)との比が1:1でなく、(1)に比べて(2)が大きくなることがあれば、(荷電粒子は物質中ですぐ止ってしまうので)中性子を出さずに発熱だけが観測される(Fleishmann, Ponsの実験)こともあるかもしれない。例えば、中性子はクーロン力を感じないので際壁を通過して陽子だけが放出される、すなわち(2)の過程だけが生ずることもあり得るのではないかという意見もある。このような過程についての正確な計算はなされていないので何ともいえないが、定性的には(1)と(2)の過程に多少の違いはあるかもしれないが、それほど大きな差はないであろうというのが一般的な予想である。その理由は、一つには少なくとも実験的には10keVまでは(1)と(2)の断面積に差はなく、断面積のエネルギー依存もなめらかで、10keV以下で急に差がでると思えないこと、一つには以下に述べるように理論的にも予測されないことである。(1)が起きずに(2)が起きるということは、Dが融合する前にnとpとに分裂してnだけがもう一方のDに捕獲されるということである。Dを核力に打ち勝ってnとpとに分裂させる力はクーロン力しかないわけであるが、クーロン障壁の高さは1MeV弱であるのに対してDの結合エネルギー(核力)は2MeV強である。従って、D同志が核力の及ぶ範囲まで近づいたときに、Dは分裂するよりはDのままのかたちで融合する(核反応を起こす)割合のほうが多いと考えるのが自然である。そうすれば核力の対称性によってnとp放出とは差はでない筈である。従って、(1)と(2)との分岐比にファクターの違いがいろいろあっても、10の何乗もの差がでるということはちょっと予想しがたい。

中性子をださない核融合反応の可能性としていわれていることに、多体反応がある。上述のように二体反応を考える限り中性子をださない反応機構は考えにくいとすると、3体或いは4体反応ではないかという主張である。3体反応を例にとると、分岐は以下ようになる。



この反応がもし起こったとすると、中性子を放出しないわけではないが、その分岐比は二体反応の場合よりは小さいであろう。一番起こりやすい分岐は(2)で、放出されたDは減速されてまた反応に使われる(連鎖反応)かもしれない。大変都合のよい話であるが、二体でさえ起こらない反応がどうして三体で起こるのかという疑問が生ずる。 $D + D \rightarrow {}^4\text{He}^*$, ${}^4\text{He}^* + D \rightarrow {}^6\text{Li}^*$ という過程で、中間状態の ${}^4\text{He}^*$ の存在時間は極めて短く、 10^{-22} 秒程度である。この短時間の間にもう一つのDが加わって融合する可能性は極めて薄い。三体反応が二体反応より優先するためには、二体反応の反応率が少なくとも 10^{22} /秒以上でなければならぬことは簡単な計算ですぐにわかる。(このような反応率では大爆発をおこしてしまう。)中間状態を経ないで三

体が同時に合体することは更にありそうもない。この他にも未知の核反応機構について多くの説が提唱されてはいるが、今のところ皆が納得するようなものはないように思われる。

4. 結 論

低温核融合の問題を考える時に基本となることはむしろ単純である。クーロン力が物質内（表面）でいかに遮蔽されるか、クーロン障壁をいかに乗越えられるかということに尽きる。核反応は核力の及ぶ範囲（ ~ 10 fm）にまで近づかないかぎり起こり得ないのである。

今後の進展としては、理論的予測は勿論大切であるが、決め手となるのはやはり実験である。万人が認める測定を行う必要がある。中性子を検出したという報告はいくつかあるが、再現性と中性子発生の条件を明らかにすることが未だ確立されていない。いろいろの仮定をひとつづつ検証してゆく地味な努力が要求されるであろう。あるいは低温核融合というのは無いのかもしれないが、無いことを証明するのは有ることを証明するより難しいことである。

注意すべきことは“心理的効果”である。よく知られていることであるが、有ると思えば有る、無いと思えば無い、というデータがで易い。意識的にデータを作ることは論外としても、無意識のうちにデータを作ってしまうことは有り勝ちなことである。すなわち、無意識に都合のよいデータだけを選択してしまう危険があるということである。例えば、ある現象を期待して測定を行っている場合、それと思われる現象がみえた時に測定を止める、このような測定を何回か繰り返す、というようなことである。このようなやり方は統計的変動やシステムティックエラーを強調してしまっておそれがある。また逆の場合もあって、本当の事象を見逃してしまうこともありうる。

今回のブームは物理、化学の分野に大変面白い問題を提起したと云える。現時点ではエネルギー生産にはならないことが多いことをあらためて認識させた意義は大きい。

参考文献

- 1) M. Fleishmann, S. Pons, M. Hawkins, J. Electroanalytical Chemistry 261 301 (1989).
- 2) S.E. Jones, E.P. Palmer, J.B. Czirr, D.L. Decker, G.L. Jensen, J.M. Thorne, S.F. Taylor, J. Rafelski, Nature 338 737 (1989).
- 3) K. Nagamine, T. Matsuzaki, K. Ishida, S. Sakamoto, Y. Watanabe, M. Iwasaki, H. Miyake, K. Nishiyama, H. Kurihara, E. Torikai, T. Suzuki, S. Isagawa, K. Kondo, Workshop on COLD FUSION, Santa Fe (1989).
- 4) H.O. Menlove, M.M. Fowler, E. Carcia, A. Mayer, M.C. Miller, R.R. Ryan, S.E. Jones, Paper submitted to Nature.
- 5) A. De Ninno, A. Frattolillo, G. Lollobattista, L. Martinis, M. Martone, L. Mori, S. Podda, F. Scaramizzi, Paper submitted to Europhysics Letters.
- 6) 例えば、永嶺謙忠, 原研受託研究報告書「ミュオン触媒核融合研究の最近の発展」(昭和

62年2月).

- 7) E.E. Salpeter, H.M. Van Horn, The Astrophysical Journal 155 183 (1969).
- 8) 鹿園直基, 低温核融合に関する討論会報告集, JAERI-M Report (印刷中).
- 9) J.Kondo, J. Phys. Soc. Japan (to be published).

