

常温核融合(機構についての一考察)

水野忠彦・秋本 正・佐藤教男

北海道大学工学部 〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目
(1989 年 8 月 12 日 受理)

Cold Fusion (A Consideration on the Mechanism)

Tadahiko MIZUNO, Tadashi AKIMOTO
and Norio SATO

Faculty of Engineering, Hokkaido University
Kita 13 Nishi 8, Kita-ku Sapporo 060

(Received August 12, 1989)

常温核融合発見の経緯と国内外での研究の現状を紹介し、その問題点や機構及びその将来の見通しについて報告する。特に国内においては色々な研究所や大学において精力的に研究が進行しており、常温核融合の可能性が確実視されてきているが、まだ問題点も少なくはない。

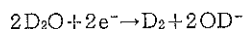
なぜこの常温核融合の検証が困難なのか、どうして再現性が少ないのかを著者らの研究を主体に、特にその機構と結びつけて述べる。

1. 初めに

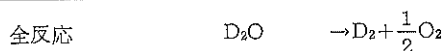
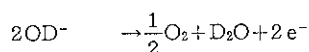
3 月末にアメリカにおいて相次いで 2 つの論文が発表され、その内容の重大さのために、全世界に大きな衝撃をまき起こした。それはいずれも重水中で Pd, Ti 等を陰極として電解し、核融合反応を起こすのに成功したというものである。重水を電気分解すると次のような反応が起きる。

重水 (D₂O) を電気分解した場合

カソード反応 (Pd 表面)



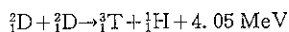
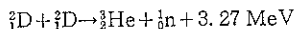
アノード反応 (Pt 表面)



$$\Delta G^\circ = -243.5 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta H^\circ = -294.6 \text{ kJ/mol}$$

この時 Pd 表面で発生した重水素の一部が、金属表面かまたはその内部で核融合反応を起こし、中性子や熱を発生したというものである。通常の重水素によって起こる核融合反応は次のようである。



もちろんこの二論文の内容においてその反応率には大きな、まさにけた違いの差があったことや、論文発表をめぐってのかけひきなどがこの学問的に大きな興味のある問題を極めて複雑にしてしまったのである。Fleischmann と Pons¹⁾の報告では、この方法によって世界のエネルギー問題が明日にでも解決してしまうような見通しをもたせるものであった。即ち入力に対して何倍にも及ぶ熱出力が得られ、それに伴ってトリチウムや核反応に基づくγ線を検出したと言うものである。しかしながら現在までのところ、彼らの報告に基づくレベルでの反応の確認には、どこも成功はしていない。Jones ら²⁾は最初の報告で常温核融合が起こっていることの間接的な例証として 3 つをあげている。1 つは火山から高い ³He/⁴He の比のヘリウムが放出されていること、2 つ目は木星の高い発熱量は木星のコアで p-d 核融合反応が起きていることで説明できること、さらに電気精錬に際して金属箔等に高い濃度の ³He が濃縮しているのは核融合で説明できることなどである。そのような仮説の実証として彼らは Pd ないし Ti を電極としてカソード分極を行い、その結果核反応に基づく 2.45 MeV のエネルギーを持つ中性子を得ている。Jones らのレベルの核反応の確認は世界の所々でなされている様である。

2. 常温核融合の方法

現在のところ、大きく分けて固体内での核融合にはカソード分極時の重水素吸収によるものと、気相からの重水素ガス吸収によるものの 2 つの方法がある。これら 2 つの方法は水素の入れ方が違うが、金属内部で起きていると考えられる核融合反応の機構については同じではないかと思われる。

日本においてもその後多くの研究がなされてきており、我々のチームでも基本的には Jones のチームと同じ追試実験を行い、彼らとほぼ同じ結果³⁾を得ている。ただし使用した溶液は彼らとは異なり、より単純な 0.5 M LiOD-D₂O を用いた。また電極としての Pd 棒もあらかじめ真空中で焼鈍し、その後重水素を吸収させたものを用いている。そのようにして求めた結果を図 1 に示す。これは電解中 (200 mA/cm², 1.8 cm²) 及び電解を止めたときに得られた結果の差を処理して求めた中性子スペクトルである。2.5 MeV の位置に明らかに中性子のピークが認められる。これから得られた反応率は $\sim 10^{-23}$ fusions/s/d-d pair であった。その後報告された坂元⁴⁾の測定は太さ 0.1 mm の Pd 線を用いて 0.1 mol/kg NaOH-D₂O 中でカソード分極し、発生すると考えられ

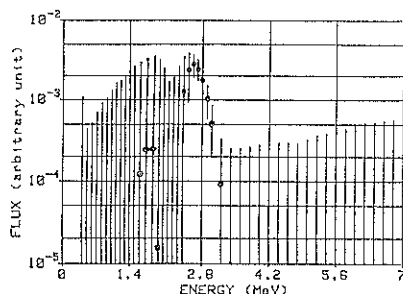


図1 重水中でPdを電極としてカソード分極した時に得られた中性子スペクトル。

る中性子をBF₃検出器で測定したものである。この時2台の中性子検出系を用いて、同時に電解中と、バックグラウンドの測定を行い、バックグラウンド変動幅明らかに越える中性子の発生をみている。小山等⁶⁾も種々の金属合金で重水中でカソード分極した際にある処理も行ったものから異常な熱発生を認めている。ただし彼らはこの反応が核融合以外によるものである可能性も指摘している。新村等⁹⁾も多数の検出器を用いて電解中の中性子の発生を認めている。また松本等⁷⁾は酢酸ウラニルを用いたフィッシュントラック検出法によって、PdやPtを電極として重水を電解した際の速中性子の検出を行っている。高橋等⁸⁾は2種類の中性子検出系を用いて重水をPdを電極として電流密度を変化させることによって、2.45 MeVのエネルギーを有する中性子の放出を認めている。

高圧の重水素吸収による方法ではTiなどの粉末を使用して重水素を数10気圧で吸収させた後、温度を下げ77Kまで冷却し、その後温度を上げて行くときに中性子の発生をみている。この方法はまずNinno等⁹⁾が行い、その後Ryan等¹⁰⁾によって追試されている。この時の反応は非常に間欠的であり、その時には、極めて短時間に中性子が放出されている。この方法は初期には再現性で苦労があったが、同チームのMenloveは現在では再現性良く反応を起こすことが出来ると述べている。

3. 常温核融合の問題点

現在までに常温核融合として報告されてきた例で最も重大な問題点は再現性に困難があった例が多いことである。もちろんその理由の一つとして、反応率が測定器の検出限界に極めて近いこともあるが、それだけではなく本質的にこの現象は定常的なものではなくて、間欠的な現象と思われる点にある。同じ条件で測定を行ってみても、常に中性子を観測するわけではない。これらのことは反応を起こすためにはいくつかの複数の条件があって、同時にこれらの条件を満たした場合のみ核融合を

起こすと言うことを意味しているのではないだろうか。

4. 常温核融合の機構

このような状況で反応の機構を論ずるには無理があるが、逆にその状況が一つのヒントを与えてもいる。現在のところ、固体内での核融合の機構には次のようないくつかの説がある。(補遺 49 ページ参照)

- a) クラック誘起説
- b) 相転移説
- c) トンネル効果説
- d) プラズマモデル
- e) 物質内核融合説

ここで種々の報告例の示すとおり、ある条件を満たしたときにだけ突然核融合反応が生じ、中性子が発生し、また反応が停止するという状況を考えるうえで、a)の機構は他の機構に比較して非定常な反応を説明するのに適している。すなわち、金属中に水素が入っていき、その表面から水素化物を作って行くと、一般に水素化物の方が密度が低く、また時には新しい相が析出していくために、内部の金属相との間に大きな歪応力が形成されていく。その応力が金属同士の結合力を上回った時に破壊が生じ、金属内にクラックが発生する。この時新しい金属面に電荷の不均一が生じ、それに伴ってそのクラック内部に強い電場が形成されることになる(図2)。その電場の強さは計算では数keV~数百keVとなる。もしこの時、金属内に重水素がイオンの状態で存在していたとすると、この電場によって加速され、他の重水素に衝突し、D-D核融合を起こすことが考えられる。この場合、核融合反応を起こすためには少なくともつぎに示すような条件が必要である。

- 1) 金属内部で重水素がイオンの状態で存在すること。
- 2) 水素の進入に伴ってクラックが生ずること。
- 3) クラック内に核融合が生ずるための適当な電場が形成されること。
- 4) ターゲットとなる重水素原子ないし分子が存在す

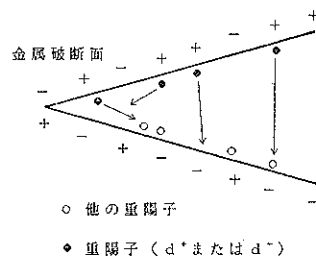


図2 金属内部のクラック中でD-D核融合が起きる機構。

ること。

これらの条件を色々な金属について考えてみる。1)については一般に水素が金属中に入り込むと正負のイオンの形で金属内に存在確率がある。2)については通常アルカリ金属以外は金属中に水素が入り、水素化物を形成するようになるとその体積が増加し、金属内部と水素化物との間に応力を生ずるようになる。この様な状態ではほとんどの金属にクラックが生ずるようになる。この様な金属には Ti, Zr, V, Ta, Nb, La, Ce, Pd 等がある。また特に Ti, Zr, Pd は低温においては水素化物を形成し水素の吸蔵量が多いものとして知られている。場合によってはほとんど化学量論比にまで達することがある。

しかしクラックの入り方、たとえばその形状、頻度や持続時間等には、金属中の不純物、熱処理、水素吸収速度、温度さらには金属本体の幾何学的な形状などが大きく影響を及ぼすと考えられる。さらに 3)の条件は、最も大切な条件であり、この様な電場の発生機構は King 等¹¹⁾によって計算されている。また一般に金属を破壊すると、電子 (exoelectron emission) や音波 (acoustic emission) が放出される現象が知られている。例えば水素貯蔵合金に水素が入るときに電子が放出され、その電流は $10^{-11} \sim 10^{-12} \text{ A}^{12)}$ 程度と報告されている。またこの機構を直接裏づけるものとして Klyuev¹³⁾等は、LiD の結晶に破壊が起きたときにクラックの発生にともなって中性子が放出されることを確認している (図 3)。これは直径 3 mm 位の LiD の単結晶を、ガス銃を用いて 200 m/s 位の速度で 50 g ほどの錘りで衝撃するとだいたい 10 個くらいの中性子を観測したと言うものである。この報告はすでに 3 年も前になされており、常温核融合という点ではこちらの方が先輩格かもしれない。

5. 常温核融合を確実に起こすには

この 3)の条件はこの機構の要であるが、今のところこの反応が生ずるための最適なクラックの形状、持続時間さらには生ずる電場の強さなどについては全く分かっていない。常温核融合を起こすためには、上記に示したような条件を同時にすべてみたしたときのみ反応が進行

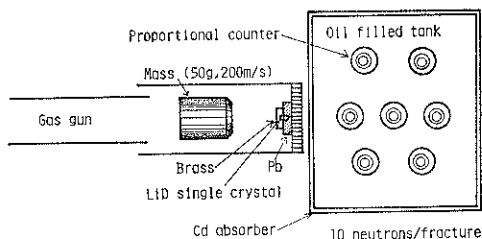


図 3 Klyuev 等¹³⁾の実験体系。

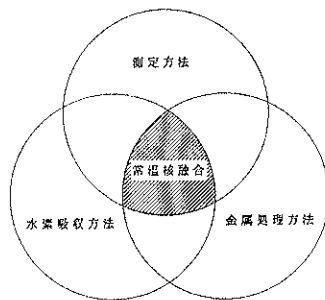


図 4 常温核融合の起きる条件。

すると考えられる (図 4)。しかしその条件の一つであるクラックの状態を作用する因子はさきに述べたように色々な条件によって左右されているのである。また、さらにこれ以外の条件が必要であるかもしれないし、上記の条件すべてが必要ではないのかもしれない。さらにこのマイクロクラック説以外の説が、あるいは正しいのかもしれない。いずれにせよ現在の状況で研究が進行して行くと近い将来すべて明らかになるであろう。もし機構がはっきりしてくると常温ないしは低温核融合という名称も変わるかもしれない。

文 献

- 1) M. Fleischmann and S. Pons: J. Electroanal. Chem. **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 and J. Rafelski: Nature **338**, 27 April 737 (1989).
- 3) T. Mizuno, T. Akimoto and N. Sato: Denki Kagaku **57**, 742 (1989).
- 4) 坂元重康: 常温核融合に関する研究討論会資料 6 月, (1989).
- 5) 小山 昇, 大坂武男, 波戸崎修, 山本信重, 倉沢祐子, 笠原誠司, 武岡 壮, 今井祐子, 大山幸夫, 中村知夫, 柴田徳思, 今村峰雄, 上裳義朋, 柴田誠一: 電気化学ミニシンポジウム (常温核融合と電気化学) 7 月, (1989), 東京
- 6) 新村信雄, 武藤正勝, 今野 収, 渡辺 浩, 吉田博, 板谷謙悟, 梶谷 剛: 電気化学ミニシンポジウム (常温核融合と電気化学) (1989).
- 7) 松本 修, 木村 幹, 斉藤裕子, 宇山春夫, 矢板毅: 電気化学ミニシンポジウム (常温核融合と電気化学) (1989).
- 8) 高橋亮人, 飯田敏行, 吉田茂生: 電気化学ミニシンポジウム (常温核融合と電気化学) (1989).
- 9) A. De Ninno, A. Frattolillo, G. Lollbattista, L. Martinis, M. Martone, L. Mori, S. Podda and F. Scaramuzzi: Europysics Letters (pre-print submitted).
- 10) R. Ryan, M. Fowler, E. Garcia, H. Menlove,

- M. Miller, A. Mayer, J. Wilhelmy, C. Orth, S. Schmidt, R. Mills and D. Moore; Workshop on cold fusion phenomena May 23-25 (1989) Sante Fe.
- 11) J. S. King, F. Mayer and J. Reitz: Workshop on cold fusion phenomena May 23-25 (1989)
- 12) S. Misawa and H. Sugawara: J. Less-Common Metals 89, 19 (1983).
- 13) V. A. Klyuev, A. Lipson, Y. Toporov, B. Deryagin, V. Lushchikov, A. Strelkov and E. Shabalin: Sov. Tech. Phys. Lett. 12, 551 (1988).

補 遺

常温核融合の機構

a) クラック誘起説: 金属中に水素が入っていき水素化合物を形成すると、その密度の変化によって金属中にクラックが発生する。クラックの進行によって金属破断面に電荷の不均一が生じ、それに伴って短時間に電場が形成される。この電場は局部的に数百 keV にもなることが計算されている。金属内部の重水素は一部イオン状態で存在しているために、この電場によって加速され、D-D 核融合反応を起こすことになる。

b) 相転移説: 金属中への重水素の吸収に伴って、金属は金属水素化合物へと変化していく。その金属水素化合物は水素の濃度、温度及び圧力によって通常異なった相を形成する。その相変化による重水素原子の再配列に伴って核融合が生ずる。

c) トンネル効果説: 金属中の重水素原子同士の距離がなんらかの原因によってきわめて接近してくると核融合の確率が高くなっていく。通常の D_2 分子であると、

その核間距離は $0.74 \times 10^{-10} \text{m}$ で重水素を2個接触させた距離、約 $1 \times 10^{-10} \text{m}$ よりは近い。核力の働く距離は 10 fm ($10 \times 10^{-15} \text{m}$) であり、この時のクーロンエネルギーは 1 MeV である。原子分子の電離エネルギーは 10 eV のオーダーでありこのままでは核反応を起こすことはできない。トンネル効果、あるいはゼロ点振動によって原理的には起こせるが、その確率は1分子当たり毎秒 10^{-70} – 10^{-60} である。もし仮想的な重い電子があり、それが分子を作っているとすれば反応率は大きくなる。Jones の程度の反応率、 $10^{-23}/\text{s}$ 程度の値になるためには電子の質量は5倍程度でよい。

d) プラズマモデル: 熱核融合でプラズマの温度が下がってくると核間に存在する電子の遮蔽効果が効いてくる。この様な状態になると反応のメカニズムは自由な核同志とは異なって、多くの核が関与し核同志はお互いに押しあって平衡状態の核のゼロ点振動の振幅の重なりによるようになる。この様な反応は pycnonuclear reaction と呼ばれていて、冷たい星、例えば白色わい星で起きている核反応として知られている。ここで $10^{-23}/\text{s}$ の反応率を得るためにはプラズマの密度は 10^{26} – 10^{27} であることが必要である。この様な高密度プラズマの平均核間距離は約 $2 \times 10^{-11} \text{m}$ である。

e) 物質内核融合説: 核を近づけるメカニズムはクーロン反発力をどの様に遮蔽するかということである。クーロン力が遮蔽されていればある程度近づける。プラズマの密度が通常の物質の場合、核は回りの電子を引きつけて遮蔽されている。Pd の場合この遮蔽効果をその電子比熱から計算すると、核融合反応率は $10^{-30}/\text{s}$ となる。