

常 温 核 融 合

——過剰熱・核反応生成物と反応モデル——

Cold Fusion : Excess Heat, Nuclear Products and Reaction Model

高 橋 亮 人*

Akito Takahashi

1. はじめに

1992年10月末の第3回常温核融合国際会議は、参加者数・発表論文数が多く、過去最高の盛り上がりをもてた会議だった。過剰熱と核反応生成物についてポジティブな実験結果が非常に多く発表されて「現象」再現条件がかなりつめられたこととメカニズム説明のための手掛かりとなる核的・物性的データがかなり出た点で注目されるべきイベントであった¹⁾。この会議を含めて今まで4年間に発表された実験結果を要約すると次のようになる¹⁾²⁾。

- 1) 非常に弱いレベルだが中性子が発生する。中性子スペクトルには、d-d核融合反応の証拠と思われる2.45MeVのピークがみつまっている。しかし、3~10MeVにわたって、ブロードな成分も観測されており、既知の核融合反応(d-d, d-t, d-Li等)で説明できない。
- 2) 高エネルギーの荷電粒子の発生がみられる。d-d反応の産物と思われる3MeVの陽子が少量だが観測されている。しかし、3~15MeVにわたって高エネルギー荷電粒子(α , p, t, 等)が発生したとの報告がかなりある。
- 3) かなりのレベルのトリチウム発生が多く、ところで観測されており、中性子との発生数比(n/T)比が 10^{-4} ~ 10^{-9} と異常な値を示す。(既知のd-d反応では、n/T~1.0のはずである。)
- 4) ⁴Heが発熱に対する量発生するという報告が出てきた³⁾⁴⁾。特にNTTの真空系の実験⁴⁾が注目されている。⁴Heの大量発生は既知のd-d反応では考えられない。
- 5) 化学発熱で説明出来るレベルの100~1000倍以上に及ぶ過剰熱が、特にD₂O/Pd電解系で発生し、

ごく弱いレベルの放射線の発生がともなう^{5)~8)}。軽水素で発熱したときの報告もある⁹⁾。過剰熱の源が核反応かどうかまだ特定出来ていない。

再現条件に関しては、次のようなことが明らかになりつつある。

- a) 重水素吸蔵率(D/Pd比)が試料の体積平均で0.82~0.85をこすと過剰熱が発生し、D/Pd比は0.80程度で飽和するので、工夫が必要である。材料が“悪い”と0.7程度までしか吸蔵せず、過剰熱は発生しない。
- b) 電解系の過剰熱は、表面電流密度と相関があり、過剰熱発生しきい値(~200mA/cm²)があるらしい。Pd電極表面をA10x等の金属酸化物の薄膜で被うと、D/Pd比の増大及び過剰熱発生に効果がある。また、ガス・ビーム系の実験でPdやTiの表面に金属酸化薄膜をつけると、高エネルギー荷電粒子¹⁰⁾や⁴Heが発生¹¹⁾する。
- c) D/Pd>0.85では、吸蔵過程が吸熱反応に変わり、温度が上昇するほど(約80℃をこえて)吸蔵が促進される可能性がある(未確認だが)¹¹⁾。

これらの結果をありのまま受けとめると、

- ①重水素を吸蔵する常温の個体内で、既知のd-d反応だけでは説明出来ない特殊な核反応が生ずる。
- ②中性子、 γ 線、トリチウムのような放射能を殆ど伴わない、“大量”の熱が発生するが、核エネルギーかどうかは謎である。

ということになるであろう。このような結果を出した、個々の実験手順には、それぞれ、まだ克服すべき“弱点”が残っていると考えられ、論争中であるが、以後序々に改良されて更にデータが集積されていくものと思われる。本稿では、上にまとめた実験結果を「事実」として受けとめることにし、まず次節で、「現象」の説明にアプローチするために固体内重水素/水素核反応のモデルについて私見(仮説段階)を述べる。次に、

*大阪大学工学部原子力工学教室教授
〒565 吹田市山田丘2-1

筆者のグループがこの4年間に得たポジティブなデータを中心に、モデルとの対比において説明し、「常温核融合」解明のための一助としたい。

2. 固体内重水素/水素核反応のモデル

重水素や水素を吸蔵した常温の固体内では、「定常状態においては」検出出来るレベルの核反応（特にd-d核融合反応）が生ずることはありえないことが、理論的にほぼ証明されている¹⁹⁾。「何らかの過渡的条件」が問題となる。発熱を伴うほどの大量の核反応がPdDx等の固体内で起こるためには、次の3つの条件が同時に全部満たされねばならない。

- i) 2つ以上の水素同位体原子核が0.2オングストローム (10^{-8} cm) 以内の空間に近寄れる過渡的なメカニズムがあること。
- ii) クーロンバリア透過率（量子トンネル効果）が充分大きくなり、いわゆる super screening が起こること。
- iii) 強い相互作用が異常増大するメカニズムがあり、S-値が 10^6 keV・bより大きくなれること。

いわゆる“Jonesレベル” (0.1~1 反応/秒) の反応しか起こらないのであれば、i) と ii) の条件を同時に満たせば良い。“F-Pレベル” (10^{12} ~ 10^{16} 反応/秒) を説明出来るには、iii) の条件が不可欠で本質的である。

一般に、核融合反応の過程は、次の4つの段階に“近似的に”分けて考えることができる。

第一は；原子レベルの運動において近接ペアー又はクラスターを形成する過程である。

第二は；クローン反発力によるバリアを透過する過程である（確率 e^{-G} ；GはGamow因子）。

第三は；核力による引力、即ち強い相互作用により仮想複合核が形成される過程である。

第四は；仮想複合核が終状態相互作用により粒子放出出口チャンネルへと分岐する過程である。我々が実験で観測するのは、出口チャンネルの放出粒子であり、

$$[\text{チャンネル別反応率}] = [\text{ペア形成確率}] \times [\text{バリア透過率}] \times [\text{核内核融合率}] \times [\text{分岐比}]$$

と表せる。ここで、ペア形成確率、バリア透過率、分岐比は定義によりその最大値が1.0であるから、「核内核融合率」 $\approx S \times v/E$ が反応率の最大値 ($\lambda \text{ max}$) を決めている。既知のd-d反応の場合、 $S=110\text{keV} \cdot \text{b}$ 、 $E=30\text{meV}$ とし、固体中の重水素密度の最大値 10^{23} cm^{-3} を用いると、単位体積当たりの最大反応量は、

$Y_{\text{max}}(d-d) = 10^{23} \times \lambda \text{ max} \approx 10^{10} \text{ f/s/cc} \approx 0.01 \text{ w/cc}$ となる。即ち、過剰熱の実験結果が示すような、 $10 \text{ w/cc} \sim 4 \text{ kw/cc}$ といった反応レベルにはなりえない。バリア透過率 (e^{-G}) は、super screeningがあったとしても、 10^{-3} くらいになるのがせいぜいであろうから、d-d反応では、S-値の大きさが6桁は足りないことになる。d-t反応でも4桁は足りない。二体反応を考えるかぎり、固体内で実験結果のような発熱レベルになることはありえないと思われる。

S-値が異常増大出来る一つの可能性は、反応に“第3の重い粒子”が関与して、強い相互作用が“倍増”することである。筆者は、p-d-d、d-d-d、p-d-d-d、d-d-d-dのような水素同位体の多体同時核融合反応²¹⁾ によるS値の異常増大の可能性を考えている。まだ非常に大胆な推論だが、d-d-d反応で $S_3 d \sim 10^8 \text{ keV} \cdot \text{b}$ くらいになれると予測している。ii) の条件は、これで可能性ありそうである。問題は、3コ以上の粒子 (dまたはp) クラスターが、ハイゼンベルグの不確定性の球内 (ドブロイ波長内 $\sim 0.2 \text{ \AA}$ 径) に同時に存在出来るメカニズムが、固体内過渡現象で生ずるかどうかである。これについては $D/Pd > 1.0$ のときPdDxのfcc格子に生ずる4コのO-サイト重陽子と1コのt-サイト重陽子が作る正四面体のミクロ秩序領域でのフォノン励起による過渡現象にその可能性があるのではと考えて解析を進めている。この過渡現象時にt-サイト近くの 0.2 \AA 径の空間に重陽子 (又は重陽子/陽子混合の) クラスターが瞬時生まれ、その時多数 (10コ以上)

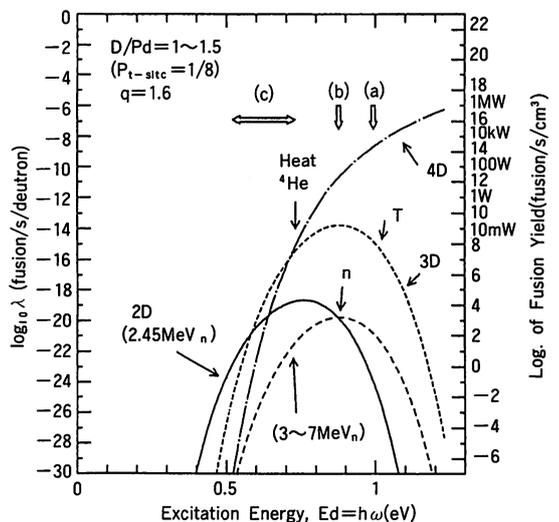


図-1 多体核融合モデルの計算結果

の自由電子がt-サイトに瞬時密集することにより，“super screening”が起こるのでとは考えている。このモデルの理論・定式化は、非正常多体問題となって相当難しく、ロシアのレベデフ物理学研究所等との共同研究が計画されている。各段階で、問題を定常問題におきかえ、第“0”近似的に大体の答を出したものを図-1に示す。

PdDx格子で、重水素フォノンのエネルギーの関数として、通常反応(d-d反応)と3体(d-d-d)4体(d-d-d-d)の反応が競合する描象が得られている。1eV以上のフォノンエネルギーでは、4体反応が主体となり、生成物は2コのα粒子(⁴He: 23.8MeV)で、中性子発生はd-d反応(2.45MeV)とd-d-d反応の二次反応(3~10MeV)として⁴He発生率に比べて10⁻¹²~10⁻¹³下の量になる。トリチウムは主に3D→t(4.75MeV)+³He(4.75MeV)の反応で生じ、発熱が1w/cc以上のレベルのとき、n/T比は約10⁻⁶となる。1w/cc以上の発熱は3Dと4D反応によっており、2D反応の寄与は殆どない。100w/cc以上の高熱

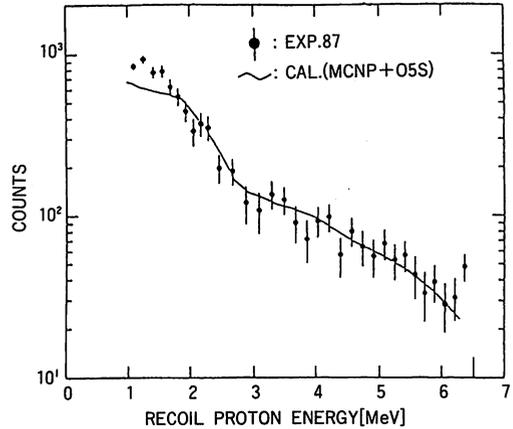


図-4 NE213反跳陽子スペクトル

出力は、4D反応が主となることにより生じ、灰は⁴Heとなる。

3. 実験結果

3.1 中性子とトリチウム

Jonesのまとめによると、中性子発生をポジティブに出した30例以上の結果でその発生量は0.1~10³n/s/ソースのベルト内に入っている。図-1の結果は、中性子発生量が~10⁴n/s/ccで頭打ちとなることを示し、矛盾しない。

我々が、この4年間行ってきた重水/Pdパルス電解系の実験は、4種類に分けられる(A. B. C. D')がCシリーズの実験で得られた中性子及びトリチウムの測定結果を図-2~図-5に示す。図-2は、BGレベルをこえる中性子が電気分解(電流L/Hモード)と 관련하여発生することを示している。この期間の全中性

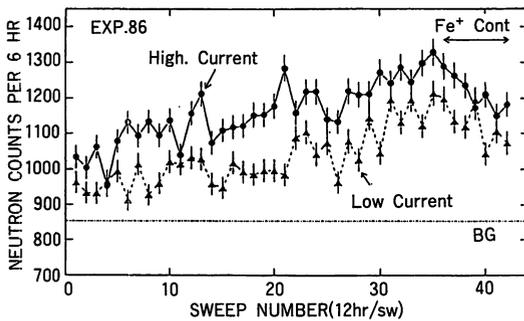


図-2 L/Hモード電解による中性子発生

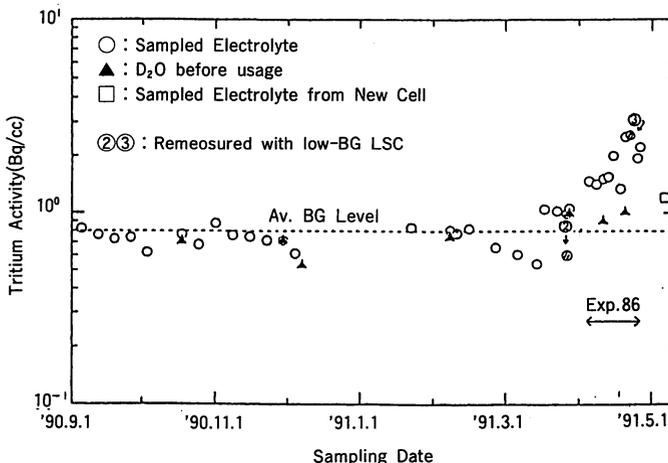


図-3 トリチウムの発生

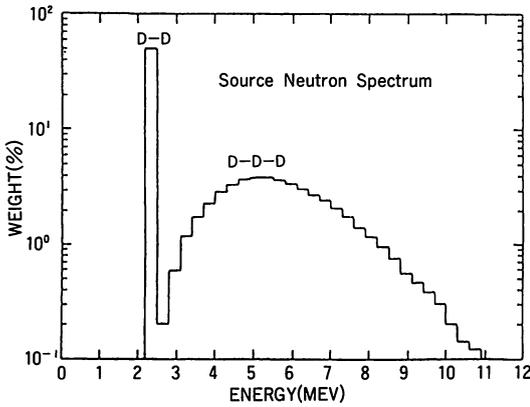


図-5 計算(図-4の実線)に用いた中性子スペクトル

子発生数は約 10^6 であった。一方、この期間と一致してトリチウムの発生が図-3に示すように認められ、全トリチウム発生量は $10^{11} \sim 10^{12}$ となった。したがって、 n/T 比は $10^{-6} \sim 10^{-7}$ となる。この結果は、多体核融合モデルによる予測 10^{-6} に近い。この実験で得られた、NE213の反跳陽子スペクトルを図-4に示す。実験は計算結果と良く一致しているが、計算に用いたスペクトルは、d-d反応の2.45MeV中性子とd-d-d反応二次中

性子(3~10MeV)が1対1の割合としたもので、(図-5)、図-1の1w/cc出力レベルに対応する計算に近い。このような二成分中性子スペクトルの観測は、ICCF3で東工大(岡本)、INFN(Bressani)、中国、ロシア、等からも発表され、かなり確認が進んでいる。

3.2 過剰熱と中性子

過剰熱と中性子の相関を観測出来た例は、まだ非常に少なく、筆者ら⁷⁾やGozzi¹⁰⁾(ローマ大)のものが代表的である。図-6に筆者らの結果を示す。この実験(Exp. D)の後、筆者ら自らによる再現実験(Exp. D2)で、発熱量は前回の約1/4、中性子量は約2倍という結果を得ている。米国(LANL, ミネソタ大, Texas A&M大, 等)、イタリア(INFN, ENEA)の再現実験では、同じ方法で、入力約20%に至る発熱が観測されている。

図-6の結果によると、過剰熱は、20wレベルの持続的成分(2ヶ月連続)と大きな変動分(100Wレベルの2つの“バースト”⁷⁾)よりなっている。これは、Fleischmann・Ponsの1989年の結果に似ている。

中性子発生は、発熱と無関係ではなく、“逆”相関にあるように見える。即ち、発熱が上昇すると中性子

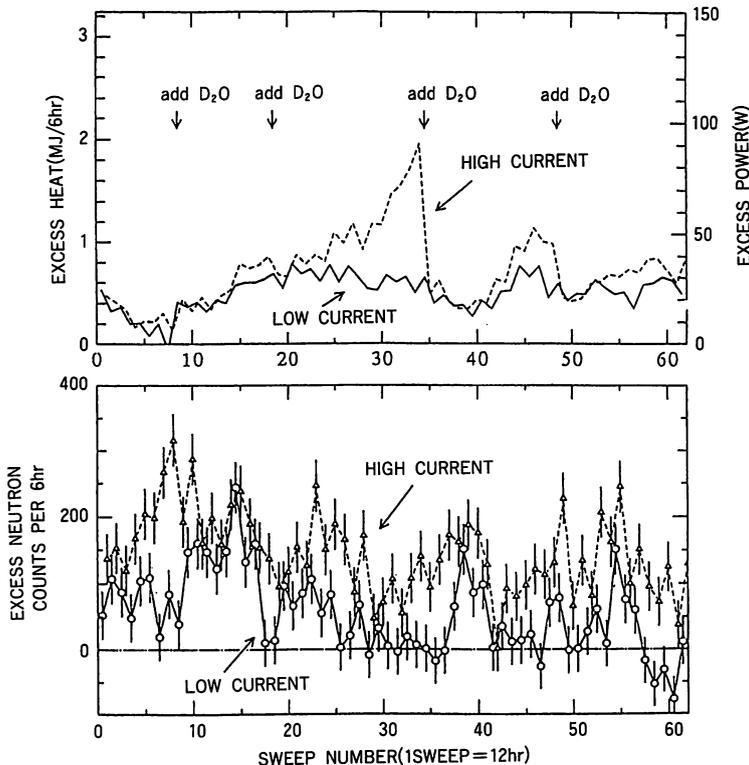


図-6 D2O/pd系L/Hモード電解による過剰熱と中性子の発生

数が減る。これは、図-1のモデルの予測に合っている。実験の発熱を $4D \rightarrow 2\alpha + 47.6\text{MeV}$ によるものとするると 10^{14}f/s が 1W に対応するから、 $n/{}^4\text{He}$ 比は約 10^{-13} となり、モデルの計算結果に近い。

再現実験で大きな発熱 (100w レベル) が仲々出ない理由は定かでないが、Exp. Dのセル電圧が異常に高かったことがわかっている。使用後Pd板の表面 (1 μm) をSIMSで分析したところ、Liとほぼ等量のAlとCaが見つかった。セル中のガラスより溶けて表面についたものと思われる。McKubre⁹⁾ は、電解液にAlを少量添加し電流をランプ状に増すと、D/Pd比が0.9をこえ発熱すると報告している。

3.3 荷電粒子と ${}^4\text{He}$

NTTの山口は、真空系ガス吸蔵法⁴⁾でPd板表面にMnOxをつけると大きな効果があり、過剰熱 (10w/ccレベル) と同期して、 ${}^4\text{He}$ が大量発生したと報告している。Miles³⁾ も過剰熱量に対応する $\sim 10^{16}$ 原子数レベルの ${}^4\text{He}$ を重水/Pd電解系で検出したと述べている。この ${}^4\text{He}$ と熱の発生が、普通は生じないと考えてよい $d+d \rightarrow {}^4\text{He}^* \rightarrow {}^4\text{He} + 23.8\text{MeV}$ の何らかのプロセス (フォノンへのエネルギー伝達) があつたとしても、d-d反応ではとても説明出来ないレベルであることは2節でのべた。

興味があるのは、表面につけたMOS (メタル酸化物“半導体”) の効果である。我々は、240keVの重陽子を真空中でTiやPd薄膜にインプラントして、裏側に抜けて出る荷電粒子を観測している¹⁰⁾。裸のTiやPd膜では3 MeVの陽子 (d-d反応による) のみが観測される。Ti (20 μm) やPd (13 μm) の両表面に0.1~1 μm 程度のAlOx膜をつけると、3 MeVの陽子ピークより上方でd-d反応では出ないはずの3.5~5 MeVと8 MeVの複数のピークが発生する。 ΔE 法により8 MeVのものはヘリウム (${}^3\text{He}$ か ${}^4\text{He}$) と同定

した。今のところ8 MeV粒子は、 $3D \rightarrow \alpha$ (7.9MeV) + d (15.9MeV) によると見ているが、更につめた実験が必要である。

4. おわりに

常温核融合研究は、電解系で過剰熱が発生することが確立されつつある。反応再現条件もかなり明らかにされたが、まだ充分ではない。今後100%再現する条件及び発熱量増大と持続の条件が探究されるものと思われる。最大の謎は、発熱の“源”が何かである。本論では、仮説多体反応モデルにより結果の多くが説明されうることのべたが、これと断定するのは早すぎる。直接の証拠がないからである。

我々は、生成粒子のスペクトロスコーピーが謎を解くカギであると考えていて、荷電粒子 (特に α 粒子のエネルギーの特定)、中性子、x線等の検出とスペクトル測定をメインテーマとして計画している。しかし、その前に反応が確実に起きる実験系 (セル) を見いださねばならない。再現条件とスペクトロスコーピーを同時に達成するのは、チャレンジングなことである。

文 献

- 1) 高橋亮人: 日本原子力学会誌, 35(1) (1993), 65
- 2) 高橋亮人: 核融合研究, 68(4) (1992), 360
- 3) M. H. Miles, et al.: Proc. ICCF 3, Nagoya, 1992
- 4) E. Yamaguchi, et al.: *ibid.*
- 5) M. C. H. McKubre: *ibid.*
- 6) K. Kunitatsu: *ibid.*
- 7) A. Takahashi; et al.: J. Appl. Electromam. Mat. 3 (1992) 221
- 8) A. Takahashi; et al.: Proc. ICCF 3, Nagoya, 1992
- 9) R. Notoya, et al.: *ibid.*
- 10) T. Iida, et al.: *ibid.*
- 11) M. Fleischmann, S. Pons: *ibid.*
- 12) Y. Fukai: *ibid.*
- 13) D. Gozzi: *ibid.*