

## 固体中における原子核反応 (常温核融合)<sup>1</sup>

静岡大学理学部物理学科

小島 英夫

e-mail: sphkoji@sci.shizuoka.ac.jp

### 1. はじめに

Cold Fusion (常温核融合) と呼ばれる現象が華々しく新聞の紙面を飾った 1989 年から 10 年が経とうとしている。最初の予想であった常温の固体中での  $d-d$  核反応が殆ど起こりえないことが理論的に明らかになり、実験データもその予想と異なることが明らかになった数年の間に、多くの科学者の関心は失われたようだ。しかし、この名称で一時の注目を集めた現象は、この 10 年間により多様なものであることが明らかになってきた。当初の予想に反して、この現象に関連した事象には、試料温度の上昇からトリチウムや中性子の発生だけでなく、ヘリウム 4 の発生、試料表面付近の元素の変換が含まれる、と考えざるをえないのが現状である。この現象の起こる場である物質も、Pd と Ti だけでなく、他の水素吸蔵金属から陽子伝導体、誘電体、超伝導体などに広がった。重水素だけでなく、軽水素でもこの現象は起こる。さらに驚くべきことには、極めて簡単な装置で幾つかの事象を起こすことが可能であり、「常温核融合」を技術的に追求する様々な試みが、専門誌、業界誌を飾っている。その全てを十把一からげに捨ててしまうべきでないのは勿論で、中には科学的に信頼のできる、注目すべき達成度を示すものも見られ、\$4000 程度の料金で研究用キットが売出されている。

このような常温核融合の研究の現状は、蒸気機関の研究の初期段階を思い出させる。J. ワットが蒸気機関の実用化に成功したのは 1769 年であった。それ以後蒸気機関は産業革命を推進する動力源に文字どおりなったのだが、同時にそれは熱とエネルギーに関する科学の発達を促がした。1824 年に N.L.S. カルノーは「カルノーの原理」を、1842 年に J.R. von マイエルはエネルギー保存則を、1850 年に J.E. クラウジウスは熱力学の第二法則を定式化した。1850 年代から現代までも、永久機関の夢を追う人々が絶えていないことを考えると、1850 年以前の状況が生き生きと眼前に浮び上がってくるのである。

蒸気機関と常温核融合の二つの例が、200 年近くの時間差で再現している様子とも見えるが、その科学の確立に要する時間は大幅に短縮されるはずである。

1989 年 3 月から 1~2 年のあいだに、常温核融合に対する社会的関心が失われた最大の理由は、物理学者の「すべては分っている」という思い込みによる未知の現象の既成概念による裁断ではなかったろうか。その一典型がアメリカの DOE レポート (1989.11) に明瞭に現れている、重陽子 ( $d$ ) の直接  $d-d$  反応を基準にして実験結果を裁断し、方針を指示する態度である。その後の国際会議 (ICCF1(1990) - 7(1998)) において、批判者が依り所にしていたのも、全く同じ  $d-d$  反応であった。

<sup>1</sup>この解説記事は、過日 (1998.6.25.) 東工大創造エネルギー専攻で行った講演の内容を、本誌の規定に合わせて文章化したものである。当日討論に参加して実験面での説明を補足して下さった、三菱重工基盤研の岩村康弘氏にお願いして、別稿に氏の実験を中心とした核変換の事実を解説して頂いた。

これらの討論を繰り返し聞かされて、「プロクルステスのベッド」のギリシア神話が入人間性に根差した普遍性を持つことを思い知らされたものである。

常温の固体の熱エネルギーが一粒子あたり  $\sim 0.03$  eV で、格子間隔が  $\sim 3$  Å であること、核エネルギーが一核子あたり  $\sim 5$  MeV で核力の作用距離が  $\sim 3$  fermi であることを考えると、結晶格子の中にある 2 個の重陽子の核反応に結晶が重要な役割を演じる可能性は非常に小さい、と思うのが物理学の常識というものであろう。しかしこの常識には落とし穴があって、そこに登場する役者が以上で尽くされていると考えるのは、早計である。

「自然環境に置かれた、水素同位体を多量に含む固体」という超複雑系で起こる現象には、われわれが未だ知らないものがあるとしても不思議はない、という謙虚さがあれば、常温核融合という不可解な現象が報告され、10 年にわたってますますその多様性を増してきていることを真面目に受け取り、その科学的解明に取り組むのは当然である。多くの科学者が研究を続けており、その中に若い人々が増えてきているのも、納得がゆくのである。

以下の章で簡単に紹介する常温核融合現象の多様な事象を、固体内で起きている原子核反応を探るプローブであると考え、謎解きの興味と同時に、新しい科学が生まれるのかもしれないという期待をお持ちいただけるだろう。

未開明のこの現象を一つの立場から解説するに際して、当初の思い込みとは無関係に、便宜上名称だけを引続き使用することをお断りしておく。また、紙面の制約から、多数に及ぶ参考文献を列記することを避け、筆者の著書<sup>1,5)</sup>、論文のうち総合的なもの<sup>2,3,6)</sup>および総説<sup>4)</sup>を掲げた。この解説での説明の不充分な点を含め、必要に応じて、そこで理論展開と文献目録とをご利用いただきたい。

## 2. 常温核融合の事実

常温核融合と名付けられた現象に含まれる事実は、その多様性を急速に増してきている。最初は、重水素 D を含む Pd と Ti において過剰熱 ( $Q$ )、トリチウム ( $t$ )、中性子 ( $n$ ) が測定され、その説明が  $d-d$  直接反応で可能かどうかだけが問題にされていた。しかし、その後の多くの研究者、特に電気化学者の努力により、常温核融合現象の起こる場は重水素系だけでなく軽水素系に広がり、測定にかかる事象も  $Q, t, n$  に限らず、ヘリウム-4 ( ${}^4\text{He}$ ) と核変換 (NT) に及ぶことがはっきりした。

### 2.1 固体内核反応の直接的証拠と間接的証拠

これらの事実は次のように整理することができる。すなわち、常温核融合現象に含まれる事象群は、固体内核反応の情報を直接担う事象と間接的に示す事象とに分類できる。前者には、核反応によって生じた粒子がそのままの姿で測定される事象が属し、中性子とガンマ線のエネルギースペクトルや核変換の結果生じた重い変換核の試料内分布がある。間接的証拠となる事象としては、他の機構では説明できない量の過剰熱の発生、中性子の量、荷電粒子の量、変換核の量などがある。

また種々の実験事実から、それらの現象(事象)が起こるための必要条件の幾つかも見えてきたと思われる。十分条件はなにか、についても考察したい。

### 2.2 直接的証拠

それでは、直接的な証拠から紹介しよう。

#### 2.2a ガンマ線スペクトル

固体内核反応の直接的証拠の中で、最も端的に核反応の存在を示すものである。不思議なことに、後述の間接的証拠に相当するだけのガンマ線量が観測にかからな

いのが一つの特徴であったが、ここ1~2年の間にガンマ線スペクトルの測定例がいくつか報告されるようになった。その結果は、他の方法による同位元素の同定と一致して、中性子と格子核の核反応による新しい核の生成を示している。

北大の能登谷達、ロシアのLipson et al.などの明瞭なデータがある。ただし、測定例が少ないことは事実で、何等かの理由で通常の核反応と異なる機構が働いている可能性がある。後述の核変換の特異性とも関係しているらしい。

## 2.2b 中性子のエネルギー・スペクトル

固体中で中性子を発生する核反応が起こったとき、中性子はその周囲の粒子と弱い相互作用をするので、エネルギー・スペクトル (ES) は必ずしも核反応を忠実に反映しない。しかし、荷電粒子に較べればその相互作用は弱いので、中性子の ES は核反応の存在とその特性を反映する証拠となる。

中性子の ES の測定には多くのデータがあり、 $d-d$  反応による 2.45 MeV のピークの存在が確かめられている。しかし、3 MeV から 8 MeV までにも幾つかのピークが散在し、数量的にはこれらの中性子の方が 2.5 MeV 周辺の中性子より多いことが分っている。中性子の数  $N_n$  は、後述の過剰熱を発生する核反応の数  $N_Q$  ( $\equiv Q(\text{MeV})/5(\text{MeV})$ ) に較べて最小で  $10^{-6}$  程度しかないことが知られている。

ES を明確に示したデータは USA の S.E. Jones et al. とイタリアの G. Bressani et al. のものがあり、他に阪大の高橋達、東工大の岡本達、中国の Long et al. が、上記の数量関係を確認している。

## 2.2c 変換核の空間的分布

広義には  $n, t, {}^4\text{He}$  も核変換 (NT) の生成物であるが、質量数  $A$  が 5 より大きい核の生成を便宜上核変換と呼ぶことにする。

当初予想された  $d-d$  反応からは予想外のことであるが、ここ数年の間に、電解系を中心に  $A \leq 200$  の質量数の大きな元素あるいは同位体が表面層で多量に生成されることが明らかになってきた。

NT で生成される核は大別して二種類に分けられる。

1) 第一のグループは、試料の中の核が中性子を吸収し、それが  $\beta$  崩壊あるいは  $\alpha$  崩壊して生ずると考えられる  $\text{NT}_D$  (NT by decay) である。したがって、同位元素比は自然存在比からずれており、表面領域に局在していることに特徴がある。

この種のデータには、R.T. Bush et al., G. Miley et al. (USA), 東工大の岡本達, I. Savvatimova et al. (R), 岩手大の山田達, 北大の能登谷達のものがある。

2) 第二のグループは、試料の中の原子核が核分裂を起こしたと考えないと説明のつかないもの  $\text{NT}_F$  (NT by fission) である。その核分裂が真空中で起こるためには、しきい値が数十 MeV であると考えられるものが多く、固体表面でそれが起こるとすると、常温核融合現象に何等かの特別な機構が存在することを示している。

この種のデータには、北大の大森, 水野達, 能登谷達, 三菱重工の岩村達, 中国の Qiao et al., USA の G. Miley et al. がある。

## 2.3 間接的証拠

ガンマ線と中性子の ES が核反応の直接的情報を与えるのにたいして、核反応の結果解放された核エネルギーが原子的過程により固体 (あるいは液体) の熱エネルギーに転化した結果である過剰熱, トリチウムやヘリウム-4 がエネルギーを失って系内で安定化したものなどは、核反応の間接的証拠となる。

### 2.3a 過剰熱 ( $Q$ )

豊富で比較的安全なエネルギー源を探求する目的で、常温核融合における過剰熱の発生には早くから注目が集まり、商業的利用にも関心が高まっている。一方、熱測定の高難しさは、過剰熱の定量的決定に曖昧さを残している。再現性の悪さとあいまって、これが常温核融合の測定の大難点であった。しかし最近の注意深い測定によって、20%までの相対的過剰熱の発生は、高い定性的再現性で発生するようになってきている。他方、100%を越す $Q$ の発生は非常に稀にしか起こらないらしい。ただし、CETI (USA) の Patterson et al. による PPC 装置は最大 2000% の  $Q$  が可成りの定性的再現性で発生するとされている。この装置が \$ 4000 で売出されているものである。

$Q$  の測定データは非常に多い。CF の発見者 M. Fleischmann et al. のものを始めとして、USA の M. McKubre et al., E. Storms et al., イタリアの Celani et al., Gozzi et al., 阪大の高橋達、東工大の岡本達、横浜国大の太田達が堅実なデータを蓄積している。なお、上記 2. 直接的証拠、で紹介した仕事も多くは熱測定を同時に行っている。また、以下で紹介するトリチウム、ヘリウム-4 のデータも  $Q$  と同時に測定されている。

### 2.3b トリチウム ( $t$ )

トリチウムは、実験系の液体あるいは気体中で検出されることが多く、その量  $N_t$  は過剰熱を生ずる核反応の数  $N_Q$  に匹敵することが多い： $N_Q \sim N_t$ 。したがって、2.2b で述べた中性子数  $N_n$  に対しては最大  $10^8$  倍になる： $N_t \sim 10^8 N_n$ 。

トリチウムの測定は、M. Fleischmann et al., Storms et al., ロスアラモス研の Claytor et al., ロシアの Romodanov et al., インドの M. Srinivasan et al., 阪大の高橋達によってなされている。

### 2.3c ${}^4\text{He}$

ヘリウム-4 が多量に検出されていて、その量  $N_{He}$  は過剰熱を生ずる反応数  $N_Q$  に匹敵する： $N_{He} \sim N_Q$ 。

${}^4\text{He}$  の測定データは、USA の Morrey et al., Miles et al., 阪大の荒田達のものがある。

当初考えられた反応  $d-d$  では、通常の条件下で  ${}^4\text{He}$  を発生する反応の分岐比は  $\sim 10^{-7}$  であり、したがって、

$$N_Q \sim N_t \sim N_n \sim 10^7 N_{He}$$

が予想される。これは、実験データのうちの典型的な場合の数値

$$N_Q \sim N_t \sim N_{He} \sim 10^7 N_n$$

と明らかに矛盾している。

この矛盾およびガンマ線の不在(上記)を解決するために、種々の理論が提案されているが、それらについては文献<sup>1,5)</sup>を参照されたい。

### 2.3d 放射性核の消滅

電解系の常温核融合実験において、電解質溶液に U や Th の化合物を溶かした場合に、数時間で放射能が激減する ( $\sim 50\%$ ) ことが観測されている。USA の Cincinnati Group は、この型の実験用キットを売出しており、その結果は Celani et al. が検証している。PPC での効果は特許となり、1997.6. の ABC ニュースでも放映された。この現象の科学的検証がなされ始めていると言える。

## 2.4 固体内核反応の必要条件

2.1 ~ 2.3 で説明した実験データは、それ自体が通常の真空中の核反応の常識では理解できない特徴をもっていた。さらに常温核融合現象には、もう一つの決定的な特徴がある。2.3a で 100% 以上の相対過剰熱の発生が非常に稀なこと、定性的再現性も非常に悪いことを述べた。この定性的再現性の悪さは、 $Q$  だけでなく、 $t$ ,  ${}^4\text{He}$ ,  $n$  および NT にもそのまま当てはまる。

DOE 報告でも、S/N 比を上げて実験することが示唆されているが、「 $d-d$  反応による常温核融合」の検証のために誰でも考えるだろうこのプログラムは、多くの研究所で実行された。結果は多くの場合「否」であった。

他方で、この 10 年間に種々の試みがなされ、常温核融合研究は着実に進歩している。そこには、常温核融合現象 (CF) の必要条件と十分条件を考えるデータが蓄積されてきている。これまでに明らかになった CF の必要条件を並べてみよう。

### 2.4a 重水素 D あるいは軽水素 H が固体内に存在すること。

水素同位体が固体内に吸蔵されるか、分子成分の一つとして多量に存在することが必要である。水素同位体は、重水素に限らず、軽水素でもよい。存在密度に下限があるらしいこと、不均一な密度分布が必要なようであることも分ってきた。

### 2.4b 熱中性子の存在

背景中性子を極限まで少なくした条件下での実験では、CF は起こらないことが明らかになった。Kamiokande 実験 (東大の石田の修士論文), S.E. Jones et al. の実験 (1994)。理研や原研での実験もこの分類に属するであろう。

他方、熱中性子の存在が CF を増強することが多くの実験で明らかにされている。イスラエルの Shani et al., イタリアの Bruno et al. と Celani et al., ロシアの Yuhimchuk et al. などのデータがある。

### 2.4c 母体金属-電解質金属の相性

電解実験系では、水素吸蔵金属 (あるいは合金) と電解質のアルカリ金属に最適の組み合わせ (相性) が存在する。Pd - Li, Ni - K, Na がよく使われる対であることは、経験的にその相性の良いことが分ったことを意味する。表面層の形成に関係した、化学的な適性であろうか。その理由は未解決である (4.3 参照)。

### 2.4d 非平衡状態

この条件はあまり定式化されていないが、水素同位体の固体内分布を変動させることに相当する外的因子の変化が CF を起こりやすくするようである。

以上の条件は、定性的ではあるが、かなりはっきりと認められている。

## 2.5 固体内核反応の十分条件

必要条件がすべて明らかになれば、十分条件も見極めがつくのであるが、今の所そこまでは行っていない。

われわれの整理で、試料の表面積  $S$  と体積  $V$  の比  $S/V$  が大きい方が再現性が高いことが認められている。 $S/V(\text{cm}^{-1})$  は、多くの実験で 5 ~ 500 である。この値が一桁の場合は再現性が非常に悪く (Fleischmann et al.), 4 桁の場合には可成り良い (PPC) ことが実験データから分る。表面層あるいは薄層構造に関係がありそうである (2.4c, 3.3 参照)。

## 3. 常温核融合の実験事実が語る物理

常温核融合の実験事実を既成の固体物理学や核物理学の常識で裁断することなく、その事実から固体内で起こっている物理現象を探り出そうとするならば、当面

最も有効なのは現象論的アプローチであろう。以下に筆者の考えた一つのモデル<sup>6)</sup>を紹介し、それを通して見えてくる固体-核物理学を考えてみたい。

### 3.1 TNCF モデルと任意パラメータ $n_n$

原子のボーアモデルを想起すれば明らかのように、モデルは現象を統一的に説明するための仮定（前提）の集まりである。その前提の既成理論との整合性は一応棚上げしておく。ただし、前提の数は少ない方がよい。

TNCF モデル (Trapped Neutron Catalyzed Fusion Model) では、常温核融合の種々の事象が、共通の原因で起こる可能性を探る立場に立つ（つまり、異なる事象に異なる原因を考えて満足しない）。次に、固体中に捕獲された準安定な中性子 TN の存在を仮定し、その密度を  $n_n$  と書く。TN の密度  $n_n$  を任意定数として、実験事実を説明するようにその値を決める。事象の数が 2 より多いときに一つの因子で整合した説明が可能であるとすると、そのモデルの有効性は高まる。

実験事実 2.4b を考慮して、TN は最初は背景中性子から補給されると考える。

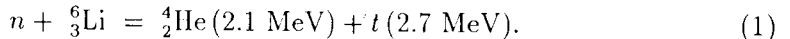
### 3.2 固体内核反応の候補

TN が準安定であるということは、試料体積内では捕獲中性子が格子上の核（格子核）と反応しない、と仮定することである。TN と反応するのは表面付近の核で、古典的な転回点では捕獲中性子の存在確立が高いことに相当し、実験事実 2.2c に対応する。固体中の TN が熱速度で運動しており、表面で反射され、表面層内での捕獲中性子と格子核の相互作用断面積は真空中の値に等しい、と仮定する。

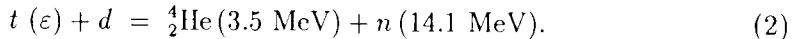
### 3.3 トリガー反応と増殖反応

種々の系で同様な反応系列を考えることができるが、本稿では Pd - D<sub>2</sub>O - Li 電解系に限って話を進めることにする。（電解系 Ni/H/K でも全く同種の解析ができる。）

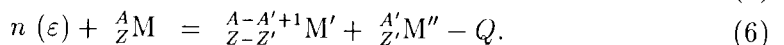
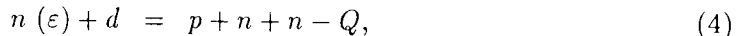
この系 (Pd/D/Li 系) では、電解の進行につれて Pd 電極表面に PdLi<sub>x</sub> あるいは Li の表面層（厚さ ~ 1 μm）が形成され、TN と <sup>6</sup>Li（自然存在比 7.5%）の間に次の反応が起こる（トリガー反応）：



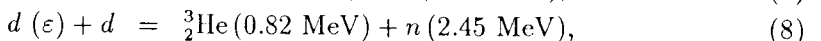
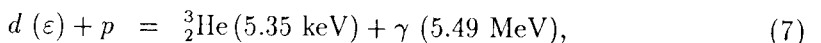
ここで生じた荷電粒子、とくに  $t$  は吸蔵されている  $d$  と反応する（増殖反応）：



（簡単のため  $t(\varepsilon)$  の飛程は 1 μm と仮定する。）この中性子は  $d$  あるいは格子核  ${}^A_Z\text{M}$  との弾性衝突により低エネルギー化し、次の反応により  $n$  を生じたり他の核を生ずる（増殖反応）：



反応 (3) で生じたエネルギー重陽子は、 $d - p$  および  $d - d$  反応を起こす：



反応 (1) と (2) からこのモデルで予想される生成物の量の間の関係が決められる：

$$N_Q \equiv Q(\text{MeV})/4.8(\text{MeV}) = N_{He} = N_t \sim 10^6 N_n.$$

これらの関係式は、2.3b と 2.3c で述べた実験データに一桁位の差で合っていることに注目したい。(ただし、実験データには非常に大きなバラツキがあることに注意しておく。簡単のため、 $d$  の飛程も  $1 \mu\text{m}$  と仮定している。)

測定されている中性子のエネルギーに  $3 \text{ MeV}$  以上のものが多いことは、反応 (2), (3) および (4) で定性的に説明できる。

### 3.4 実験データから決めたパラメータ $n_n$ の値

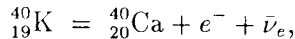
これまでに 50 個以上の実験データ群をつかって、それらの系における因子  $n_n$  を決めることができた。解析の結果<sup>3,5)</sup>を表 1 と 2 に示す。(表中の文献番号は、引用文献<sup>5)</sup>のものである。また、各実験結果の特徴も摘記されている。) その値は

$$n_n = 10^8 \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$$

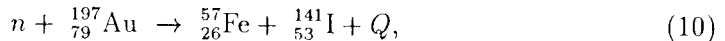
となる。この値は高すぎないか、という疑問があるが、反応 (4) や (6) で増殖した結果であることに注意したい。また、表面層での反応断面積が 3.2 のような考え方で仮定した真空中の値より大きくなる可能性がある、それに反比例して  $n_n$  は小さくなる (3.5 参照)。いずれにせよ、 $n_n$  がこの値以下のブロッホ中性子波がコヒーレントに存在すると常温核融合が起こり、最盛時にこの程度の値に達する、というのが TNCF モデルにおけるこの現象の説明である。

### 3.5 表面層格子核の不安定化

2.2c で述べた表面領域における核変換 NT に  $NT_D$  と  $NT_F$  があることを再考する。 $NT_D$  では、例えば  $^{40}\text{Ca}$  は、 $^{39}\text{K} + n \rightarrow ^{40}\text{K}$  が生じ、さらに



のように寿命が  $10^9 \text{ y}$  の崩壊が数週間以内に起これば説明できる。これは捕獲中性子と相互作用する放射性核の消滅と無関係でないだろう。また、 $NT_F$  での  $^{57}\text{Fe}$  は、



の反応が起こると考えると説明のできる。ここで  $Q = +97.9 \text{ MeV}$  である。この反応は数十 MeV のしきい値を持ち、真空中ではとうてい熱中性子によって起こすことは考えられない。Pd からの Zn の発生など、類似のデータが多い。

## 4. 固体-核物理学の展開

以上に述べたように、準安定な捕獲中性子 TN を仮定した TNCF モデルは、常温核融合 CF の幾つかの典型的な実験事実を定性的あるいは準定量的に説明することに成功している。また、予想外の事実の存在もはっきりしてきた。これらの事実を、CF が示す固体 (D,II) -熱中性子系の特徴の一断面を TNCF モデルが反映していると考え、この観点から、これまであまり手を触れられていない固体中の熱中性子の物理を垣間見ることにする。

### 4.1 中性子バンド<sup>7)</sup>と中性子 Cooper 対

電子、光子、中性子は、構造解析において同種の、しかし相補的な役割を果たしてきた。固体内の量子状態に関しては、中性子の寿命が 887.4 s と短いことから（であろう）、電子や光子のエネルギー・バンド構造にたいして、中性子のエネルギー・バンド構造（中性子バンド）は注目されなかった。

しかし、中性子バンドが生ずると、その格子核とのコヒーレントな相互作用は中性子の寿命を変える可能性があるのではなからうか。その現象論的な表現が、後述の中性子親和力（4.3 節）であるのかもしれない。

中性子バンドの特徴は、低密度の場合にも中性子クーパー対を形成するのに有利であり、熱中性子 - 格子核系の安定化に大きな役割をはたす可能性がある。

#### 4.2 中性子の安定化と格子核の不安定化

格子核との相互作用により  $\beta$ 崩壊の宿命を免れた準安定な捕獲中性子に、なんらかの摂動を与えるような不純物核あるいは表面層核は、TN との相互作用において自身の属性を変化させる可能性がある。表面層における放射性核の寿命の短縮および核分裂のしきい値の低下（あるいは消滅）は、その結果であるのかもしれない。

#### 4.3 中性子親和力

捕獲中性子 (TN) の安定化を現象論的に説明するために考えられた一つ概念が、次式で定義される格子核  $\frac{A}{2}M$ （次式では、核の質量をも表わす）の中性子親和力  $\eta$  である：

$$\eta \equiv - \left( \frac{A+1}{2}M - \frac{A+1}{2+1}M \right) c^2. \quad (11)$$

ここで  $c$  は光速である。一つの結晶内の全格子核にたいしては、この量の平均値  $\langle \eta \rangle$  を用いることにする。

すると、常温核融合現象を示す金属、合金、化合物は、すべて中性子親和力が正である；  $0 < \eta$ 。他方、電解質として用いるべきアルカリ金属は、中性子親和力がすべて負である；  $\eta < 0$ 。

このことは、上に定義した中性子親和力が何等かの物理的意味を常温核融合現象にたいして持っている可能性を示しているのではないだろうか。

#### 4.4 固体中の熱中性子

3.2 では捕獲中性子を古典的なイメージで取り扱ったが、4.1 以下で明らかにしたように、捕獲中性子の特徴はその量子論的な状態にあると思われる。他の粒子との反応において粒子性が現れるときに、古典的イメージが有効になるのであろう。波動性と粒子性の duality（量子性）の妙が現れているのが常温核融合現象である、と言えるのかもしれない。

### 5. 核反応生成物と放射性核の改変

TNCF モデルがどの程度の現実的意味を持つかは不明だが、直接  $d - d$  反応では全く理解できない常温核融合現象の多くの特徴を理解する足掛になりうる可能性はありそうである。また、これまで注意されなかった固体中の熱中性子の量子状態が興味の対象として取り上げられる契機になるならば、それも面白いではないか。さらにそれが、不可解な常温核融合現象に関係しているとすれば、固体-核物理学としての学問的興味がより広い応用分野に結びつくことになる。当面考えられる応用は二つに分けられる。

#### 5.1 固体内核反応の生成物の利用



核反応生成物の中で、熱はエネルギー源として使用されることが確実である。安全性と安定性に留意した固体内核反応装置の開発には、現象の科学的解明が不可欠であろう。商業的利用に急なあまり、安全性のチェックがおろそかにならないように希望しておきたい。トリチウムの生産施設としての常温核融合装置も、現在の世界情勢から必至である。トリチウム利用の管理が問題になるだろう。

## 5.2 放射性核の改変

有害な放射性核の放射能の  $NT_D$  および  $NT_F$  を利用した消去は、既に社会的に注目されているようであり、早い段階で実現する可能性が高い。

## 6. あとがき

常温核融合現象は、これまでの核物理学と固体物理学の常識からは想像も出来ない種々の事象を示してくれた。プラズマ核融合という競争相手に恵まれていたことも幸いして、長期の準備時間の後にやっとその科学が探求されようとしている、と言える段階に達したようである。中性子という忍者のような素粒子が陰の立て役者ではないか、という立場で現象全体を整理したのが以上の解説である。幾つかの仮定は、論者によっては納得できないものであろう。この現象の解明には、まだまだ大きな自由度が残されている。多くの科学者の英知を結集して、出来るだけ早く真相を解明し、可能な応用を開発したいものである。

科学的変革が大きければ大きいほど、パラダイムの転換にも時間とエネルギーを必要とする道理である。変革は新しい歴史の母である。常温核融合は新しい科学の誕生を告げる現象で、それは21世紀に花開くだろう、という予想が実験的に裏付けられつつあることを再度強調して、この解説を終わりたい。

最後に、この解説記事とその因になった講演の機会を与えてくださった、東京工業大学創造エネルギー専攻の北沢日出男教授に感謝の意を表したい。

## 参考文献

1. 小島英夫, 「常温核融合の発見—固体-核物理学の展開と21世紀のエネルギー問題」 大竹出版, 1997. 3.
2. H. Kozima, K. Kaki and M. Ohta, "Anomalous Phenomenon in Solids Described by the TNCF Model" *Fusion Technology* **33**, 52 (1998).
3. H. Kozima, "How the Cold Fusion Occurs (2)" *Rep. Fac. Science, Shizuoka Univ.* **32**, 1 (1998).
4. H. Kozima, "The Cold Fusion Phenomenon" *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources (Japan)* **6-1**, 68 (1998).
5. H. Kozima, *Discovery of Cold Fusion Phenomenon – Development of Solid State - Nuclear Physics and Energy Crisis in 21st Century*, Ohtake Shuppan Co., Tokyo. September, 1998. (to be published)
6. H. Kozima, "The TNCF Model for the Cold Fusion Phenomenon" *The Best Ever! (Proc. ICCF7)* (1998, Vancouver, Canada), 192 (1998). And also *Elemental Energy (Cold Fusion)* **26**, 4 (1998).
7. H. Kozima, "Neutron Band in Solids" *J. Phys. Soc. Japan* **67**, 3310 (1998).

Table 1: Pd/D(H)/Li System. Neutron Density  $n_n$  and Relations between the Numbers  $N_x$  of Event  $x$  Obtained by Theoretical Analysis of Experimental Data on TNCF Model ( $N_Q \equiv Q(\text{MeV})/5$  (MeV)). Typical value of the surface vs. volume ratio  $S/V(\text{cm}^{-1})$  of the sample is tabulated, also.

Authors	System	$S/V$ $\text{cm}^{-1}$	Measured Quantities	$n_n$ $\text{cm}^{-3}$	Other Results (Remarks)
Fleischmann et al. <sup>1)</sup>	Pd/D/Li	6 ~40	$Q, t, n$ $N_t/N_n \sim 4 \times 10^7$ $N_Q/N_t \sim 0.25$	$\sim 10^9$	( $Q=10\text{W}/\text{cm}^3$ ) $N_t/N_n \sim 10^6$ $N_Q/N_t = 1.0$
Morrey et al. <sup>1-4)</sup>	Pd/D/Li	20	$Q, {}^4\text{He}$ ${}^4\text{He}$ in $\ell \leq 25\mu\text{m}$	$4.8 \times 10^8$	$N_Q/N_{He} \sim 5.4$ ( If 3% ${}^4\text{He}$ in Pd)
Roulette <sup>1'''</sup> )	Pd/D/Li	63	$Q$	$\sim 10^{12}$	
Storms <sup>4)</sup>	Pd/D/Li	9	$t(1.8 \times 10^2 \text{Bq}/\text{ml})$	$2.2 \times 10^7$	( $\tau=250\text{h}$ )
Storms <sup>4')</sup>	Pd/D/Li	22	$Q$ ( $Q_{max}=7\text{W}$ )	$5.5 \times 10^{10}$	( $\tau=120\text{h}$ )
Takahashi et al. <sup>5')</sup>	Pd/D/Li	2.7	$t, n$ $N_t/N_n \sim 6.7 \times 10^4$	$3 \times 10^5$	$N_t/N_n \sim$ $5.3 \times 10^5$
Miles et al. <sup>18')</sup>	Pd/D/Li	5	$Q, {}^4\text{He}$ ( $N_Q/N_{He}=1 \sim 10$ )	$\sim 10^{10}$	$N_Q/N_{He} \sim 5$
Okamoto et al. <sup>12')</sup>	Pd/D/Li	23	$Q, NT_D$ $\ell_0 \sim 1 \mu\text{m}$	$\sim 10^{10}$	$N_Q/N_{NT} \sim 1.4$ ( ${}^{27}\text{Al} \rightarrow {}^{28}\text{Si}$ )
Oya <sup>12-5)</sup>	Pd/D/Li	41	$Q, \gamma$ spectrum	$3.0 \times 10^9$	(with ${}^{252}\text{Cf}$ )
Arata et al. <sup>14)</sup>	Pd/D/Li	7.5 $\times 10^4$	$Q, {}^4\text{He}$ ( $10^{20} \sim$ $10^{21} \text{cm}^{-3}$ ) $N_Q/N_{He} \sim 6$	$\sim 10^{12}$	(Assume $t$ channeling in Pd wall)
McKubre <sup>3)</sup>	Pd/D/Li	125	$Q$ (& Formula)	$\sim 10^{10}$	Qualit. explan.
Passell <sup>3''')</sup>	Pd/D/Li	400	$NT_D$	$1.1 \times 10^9$	$N_{NT}/N_Q=2$
Cravens <sup>24''')</sup>	Pd/H/Li	4000	$Q$ ( $Q_{out}/Q_{in}=3.8$ )	$8.5 \times 10^9$	(If Pd) exists)
Bockris <sup>43)</sup>	Pd/D/Li	5.3	$t, {}^4\text{He}; N_t/N_{He} \sim 240$	$3.2 \times 10^5$	$N_t/N_{He} \sim 8$
Lipson <sup>15-4)</sup>	Pd/D/Na	200	$\gamma(E_\gamma=6.25\text{MeV})$	$4 \times 10^5$	If effic. =1%
Will <sup>45)</sup>	Pd/D <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21	$t(1.8 \times 10^5/\text{cm}^2\text{s})$	$3.5 \times 10^7$	(If $\ell_0 \sim 10\mu\text{m}$ )
Cellucci et al. <sup>51''')</sup>	Pd/D/Li	40	$Q, {}^4\text{He}$ $N_Q/N_{He}=1 \sim 5$	$2.2 \times 10^9$	(If $Q=5\text{W}$ ) $N_Q/N_{He}=1$
Celani <sup>32''')</sup>	Pd/D/Li	400	$Q$ ( $Q_{max}=7\text{W}$ )	$1.0 \times 10^{12}$	(If 200% output)
Ota <sup>53)</sup>	Pd/D/Li	10	$Q$ (113%)	$3.5 \times 10^{10}$	( $\tau=220\text{h}$ )
Gozzi <sup>51''')</sup>	Pd/D/Li	14	$Q, t, {}^4\text{He}$	$\sim 10^{11}$	( $\tau \sim 10^3\text{h}$ )
Bush <sup>27)</sup>	Ag/PdD/Li	2000	$Q$ ( $Q_{max}=6\text{W}$ )	$1.1 \times 10^9$	( $\tau=54\text{d}$ , Film)
Mizuno 26-4)	Pd/D/Li (If Cr in Pd)	3.4	$Q, NT_D$ $\ell \leq 2 \mu\text{m}$	$2.6 \times 10^8$	$\tau=30\text{d}$ , Pd 1cm $\phi$ $\times$ 10cm
Iwamura <sup>17)</sup>	PdD <sub>x</sub>	20	$n$ (400/s), $t$	$3.9 \times 10^8$	$4.4 \times 10^6\text{t/s}$
Itoh <sup>17')</sup>	PdD <sub>x</sub>	13.3	$n$ (22/m), $t$	$8.7 \times 10^7$	$7.3 \times 10^{10}\text{t/s}$
Itoh <sup>17''')</sup>	PdD <sub>x</sub>	13.3	$n$ ( $2.1 \times 10^3/\text{s}$ )	$3.9 \times 10^8$	
Iwamura 17''')	PdD <sub>x</sub>	20	$Q$ (4 W) $NT_F$ (Ti, Cr etc.)	$3.3 \times 10^{10}$	( $NT_F?$ unexplained)
Miley <sup>65)</sup>	Pd/H/Li	150	$NT_F$ (Ni, Zn, ...)	$4.5 \times 10^{12}$	
Dash <sup>59)</sup>	Pd/D, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	57	$Q, NT_D$	$\sim 10^{12}$	Pt $\rightarrow$ Au
Kozima <sup>203)</sup>	Pd/D, H/Li	200	$n$ ( $2.5 \times 10^{-4}/\text{s}$ )	$2.5 \times 10^2$	Effic. =0.44%

Table 2: Ni/H/K System and Others. Neutron Density  $n_n$  and Relations between the Numbers  $N_x$  of Event  $x$  Obtained by Theoretical Analysis of Experimental Data on TNCF Model ( $N_Q \equiv Q(\text{MeV})/5$  (MeV)). Typical value of the surface vs. volume ratio  $S/V(\text{cm}^{-1})$  of the sample is tabulated, also.

Authors	System	$S/V$ $\text{cm}^{-1}$	Measured Quantities	$n_n$ $\text{cm}^{-3}$	Other Results (Remarks)
Jones <sup>2)</sup>	Ti/D/Li	8.1	$n$ (2.45 MeV)	$3.1 \times 10^{11}$	
Mills <sup>25)</sup>	Ni/H/K	160	$Q$ (0.13 W)	$3.4 \times 10^{10}$	
Bush <sup>27)</sup>	Ni/H/K Ni/H/Na	$\sim 160$ $\sim 160$	$NT_D(\text{Ca})$ $NT_D(\text{Mg})$	$5.3 \times 10^{10}$ $5.3 \times 10^{11}$	$N_Q/N_{NT} \sim 3.5$ ( $^{40}\text{K}\tau=0$ )
Bush <sup>27'')</sup>	Ni/H/Rb	$\sim 10^4$	$NT_D(\text{Sr})$	$1.6 \times 10^7$	$N_Q/N_{NT} \sim 3$
Savva- timova <sup>34''')</sup>	Pd/D <sub>2</sub>	100	$NT_D(\text{Ag})$	$9 \times 10^{10}$	
Alekseev <sup>44')</sup>	Mo/D <sub>2</sub>	4.1	$t$ ( $\sim 10^7/\text{s}$ )	$1.8 \times 10^7$	(If MoD)
Romoda- nov <sup>44''''</sup>	TiC/D	4.1	$t$ ( $\sim 10^6/\text{s}$ )	$\sim 10^6$	(D/Ti $\sim$ 0.5 assumed)
Reifensch- weiler <sup>38')</sup>	TiT <sub>0.0035</sub>	$7 \times 10^5$	$\beta$ -decay reduction	$1.1 \times 10^9$	( $T=0 \sim 450^\circ\text{C}$ )
Dufour <sup>7)</sup>	Pd,SS/D <sub>2</sub> Pd,SS/H <sub>2</sub>	48	$Q, t, n$	$9.2 \times 10^{11}$ $4.0 \times 10^9$	(D(H)/Pd $\sim 1$ is assumed)
Claytor <sup>9)</sup>	Pd/D <sub>2</sub>	400	$t$ (12.5 nCi/h)	$1.6 \times 10^{13}$	(If D/Pd $\sim 0.5$ )
Srinivasan <sup>16)</sup>	Ti/D <sub>2</sub>	1500	$t$ ( $t/d \sim 10^{-5}$ )	$1.9 \times 10^8$	(Aged plate)
De Ninno <sup>6')</sup>	Ti/D <sub>2</sub>	440	$n, t$	$1.2 \times 10^6$	(D/Ti=1,1w)
Focardi <sup>23)</sup>	Ni/H <sub>2</sub>	8.2	$Q$	$3.0 \times 10^{12}$	(If $N_p=10^{21}$ )
Oriani <sup>52)</sup>	SrCeO <sub>3</sub> /D <sub>2</sub>	22	$Q \sim 0.7\text{W}$	$4.0 \times 10^{10}$	$V=0.31\text{cm}^3$
Notoya <sup>35''')</sup>	Ni/D,H/K	3.4 $\times 10^4$	$Q$ (0.9 W), $t$	$2.4 \times 10^{13}$	(If 1/2 $t$ is in liquid)
Notoya <sup>35-4)</sup>	Ni/D,H/K	same	$NT_D(\text{Ca})$	$1.4 \times 10^9$	(Sintered Ni)
Yamada <sup>54)</sup>	Pd/D <sub>2</sub>	185	$n, NT_D(\text{C})$	$2.0 \times 10^{12}$	
Cuevas <sup>55)</sup>	TiD <sub>1.5</sub>	134	$n$ (102 n/s)	$5.4 \times 10^{11}$	
Niedra <sup>56)</sup>	Ni/H/K	80	$Q$ (11.4 W)	$1.4 \times 10^9$	5km $\times$ 0.5mm $\phi$
Ohmori <sup>22''')</sup>	Au/H/K	200	$Q, NT_F(\text{Fe})$	$\sim 10^{11}$	(Au plate)
Li <sup>57)</sup>	Pd/D <sub>2</sub>	185	$Q$	$1.6 \times 10^{12}$	(Pd wire)
Qiao <sup>57')</sup>	Pd/H <sub>2</sub>	185	$NT_F(\text{Zn})$	$3.8 \times 10^{10}$	(40%NTin 1y)
Bressani <sup>58')</sup>	Ti/D <sub>2</sub>	$< 10^3?$	$n$ ( $\epsilon$ )	$10^5 - 10^6$	(Ti shaving)
Miley <sup>65')</sup>	Ni/H/Li	50	$NT_D(\text{Fe,Cr}, \dots)$	$1.7 \times 10^{12}$	

## 重水素連続拡散型電解装置の多層構造電極 (Pd/CaO/Pd) 上で検出された元素の同位体比変化と 過剰熱・X線の発生について

三菱重工業(株) 基盤技術研究所

岩村康弘、伊藤岳彦、坂野充、後藤信朗、豊田一郎

e-mail: iwamura@atrc.mhi.co.jp

### 1.はじめに

1993年から、我々のグループは「常温核融合<sup>(1)</sup>」を新エネルギー源として利用することを目標に、研究を行ってきた。最初に、真空容器内で重水素を含んだPdを急加熱する実験を行い、この分野で一般的にいわれているD/Pdに加えて、重水素の拡散の速さが重要であるという結果を得た<sup>(2)(3)</sup>。その後、我々は実験後のPd電極を様々な方法で分析し<sup>(4)(5)</sup>、Pd中の不純物が核反応の誘発にとって本質的な役割を果たしていると推測した。その結果、現在、固体内で核反応を誘発するための条件として以下を想定している<sup>(6)</sup>。

- ①高いD/Pd
- ②十分な重水素の拡散フラックス
- ③PdとD以外の第三物質の存在

そこで、上記の①と②の条件を満たすために、新しいタイプの重水素の連続拡散が可能な実験装置を開発した<sup>(6)</sup>。また、条件③を満たすために、PdとCaOの複合層、Pdの薄膜からなる、多層構造電極を考案した<sup>(7)</sup>。このCaOは我々が提案しているEINR(Electron-Induced Nuclear Reaction)モデル<sup>(8)</sup>に基づいて導入された。

本稿では、連続拡散電解装置を用いた行った実験結果のうち、多層構造でないPdのみを用いた場合と多層構造Pdを用いた場合の結果について述べる。

### 2.実験手法

図1は、連続拡散電解装置の断面図である。1モルのLiOD重水溶液と真空チャンバーがOリング(KARLEZ)とPd板によって仕切られている。重水素原子はPdの電解液側から、電気ポテンシャルによって押し込まれ、反対の真空側から放出される。このような構成にすることによって、電流によって重水素の拡散の状態を制御することが可能となる。

過剰熱は、フローカロリメトリー法によって評価される。重水(純度99.9%以上)とLiOD(純度99%以上)はISOTEC社製である。電解液側は、陰極のPd(田中貴金属製、

25mmX25mmX1mm, 純度 99.9%以上)と陽極の Pt メッシュ ( $\phi$  0.5mm, 純度 99.98%以上, ニラコ社製)、リコンバイナーと過剰熱評価のための冷却管から成っている。電解液上部と真空容器の圧力は圧力計と BA ゲージでそれぞれ計測している。実験の開始時には、電解液の上部は 1 気圧のアルゴンを満たしている。

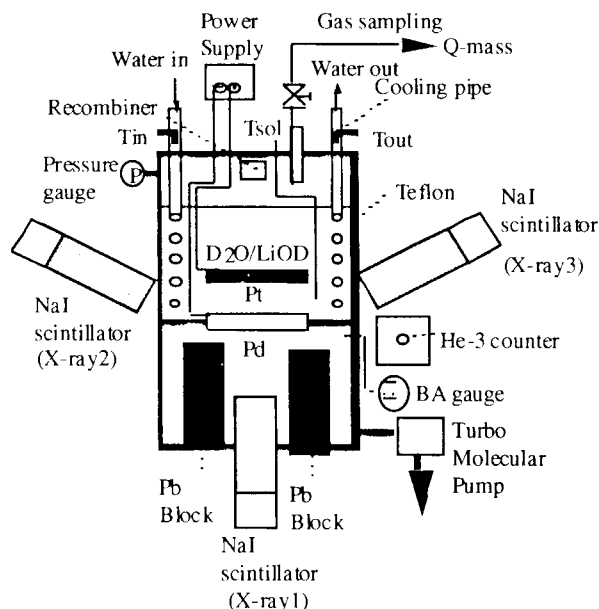


図1 連続拡散電解装置の概略

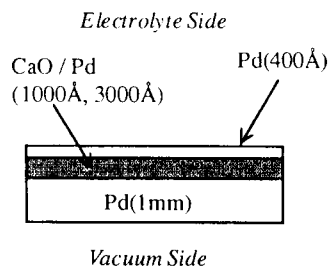


図2 多層構造電極

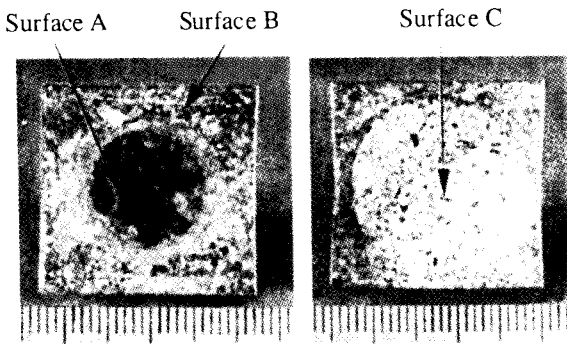
リコンバイナーは白金メッシュを  $H_2PtCl_6$  溶液でメッキすることにより、作成している。リコンバイナーの効率は、質量分析器 (AQA-360, ANELVA) によって電解液上部の  $D_2$  と  $O_2$  を分析することによって計算しており、通常リコンバイナーの効率は 99%以上である。さらに、リコンバイナーの温度を常にモニターすることにより、動作状態をチェックしている。冷却管は、銅のパイプの上に  $10\mu m$  の金をメッキしたものをを用いている。純水の冷却液の流量は入口と出口の 2 点でモニターされている。また、冷却水の入口と出口の温度はそれぞれ 2 つの熱電対で計測されている。装置内の液温、ガス温度、周囲の温度等も常にモニターされ、これらの温度がコンシステントかどうか常にチェックされている。電解液側はテフロン製の容器で作られており、電線等の部品は、テフロンチューブを通すあるいはテフロンコーティングを施している。実験装置や計測装置は、クリーンルーム内に設置されており、室内では温度や湿度は一定である。また、核計測関係のシステムは、参考文献(7)に述べてある。

Pd サンプルの処理法は以下である。Pd 板をアセトンで洗浄し、 $900^\circ C$  で 10 時間真空中 ( $10^{-7}$  torr 以下) でアニールする。その後、常温まで炉冷し、Pd 表面の不純物をとるため、重水で 100

秒間エッチングする。通常の Pd サンプルの実験の場合は、ここで容器内に設置する。図2に示す多層構造電極の場合は、CaO と Pd の同時スパッタにより、1000 Å から 3000 Å の混合層を形成し、その後 400 Å の Pd 薄膜をつける。この混合層は、表面から近い所に形成しているが、これは核反応が表面付近で起きると考えているからである。

### 3.結果と考察

図3は、通常の Pd サンプルを用いた場合（多層構造電極材を用いない場合）の実験のサンプルの写真である。このサンプルの場合、1 W程度の過剰熱が1日発生している。ただし、中性子やX線は発生していない。電極側の黒い円は重水素が通過した部分に対応しており、これはすなわち Pt メッシュの形になっている。多層構造電極の場合も実験後の様子はこの写真とほぼ同じである。反対に、Pd サンプルの真空側は、重水素の経路と無関係に、実験前とほとんど変わっていない。



(a) Pd 電極の電解液側 (b) Pd 電極の真空側

図3 実験後の Pd 電極の様子

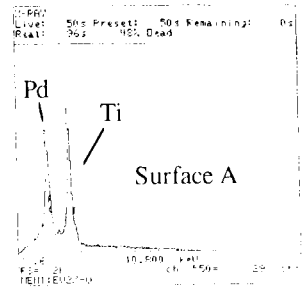


図4 黒い円の部分のEDX分析の結果

図4は、この黒い円の部分（SurfaceA）のEDX(Energy Dispersive X-ray Spectrometry)による分析結果である。Pd 以外に Ti のピークがはっきりと見えている。この Ti は、WDX(Wavelength Dispersive X-ray Spectrometry)、AES(Auger Electron Spectrometry)、ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry)等の方法によっても確認されている<sup>7)</sup>。しかし、図3の Surface B,C では Pd 以外には他の元素は検出されなかった。この、Ti の量は、ICP-MS によって 21  $\mu$ g と評価されるが、容器内の溶液、Pd 陰極、Pt 陽極の不純物の総量の最大値が 22.3  $\mu$ g であった。ICP-MS の結果、溶液中には Ti よりも桁違いに多い Pt や Cu 等の不純物が存在しているが、これらの元素は検出されていない。装置内の不純物の Ti だけが選択的に Pd 陰極の黒い部分に集積することが、通常の物理化学的プロセスによって起きることが可能であろうか？しかも、同様の溶液、電極を用いても Ti は常に検出されるわけではないのである。また、

実験後のPd電極は、クリーンルーム内のデシケータの中に保存しており、Tiの原子が付着する確率は極めて低い。従って、このTiは何らかの核反応によって生成された可能性が高い<sup>(7)</sup>。

次に、多層構造電極を用いた実験結果を表1にまとめた。EV54を除いた全てのサンプルは多層構造電極に属するものである。表の中で、 $\sigma_x$ は各々の検出器のバックグラウンドの標準偏差を示している。また、過剰熱については、バックグラウンドとして考えている軽水系(Pd-H<sub>2</sub>系)の過剰熱として計算される値の標準偏差を $\sigma_H$ とし、その3倍を越えたときに過剰熱が発生していると判断した。過剰熱の計測は冷却水の入口と出口の温度差で評価している。表1から分かるように、多層構造電極を用いた場合は過剰熱とX線が全てのケースで検出されている。X線はX2とX3から同時に検出されており、これはPd電極の電解液側界面からX線が発生していることを示している<sup>(6),(7)</sup>。中性子については、ピークで $22\sigma_n$ の中性子がEV50の時に1回観測されている。

表1 多層構造電極を用いた場合の実験結果

Sample	Structure of Cathode	Excess Heat	X-ray	Detected Elements	mass57/mass56
EV50	Pd 400Å CaO/Pd 1000Å	Generation (max 3.2W)	X1 : Background X2,X3: Simultaneous Detection X2(6.6 $\sigma_{X2}$ ),X3(6.2 $\sigma_{X3}$ )	Si, Fe, Cu	0.036 0.038 0.065
EV51	Pd 400Å CaO/Pd 3000Å	Generation (max 1.5W)	X1 : Background X2,X3: Simultaneous Detection X2(6.4 $\sigma_{X2}$ ),X3(7.8 $\sigma_{X3}$ )	Fe, Cu	0.24
EV52	Pd 400Å CaO/Pd 1000Å	Generation (max 1.9W)	X1 : Background X2,X3: Simultaneous Detection X2(7.6 $\sigma_{X2}$ ),X3(8.8 $\sigma_{X3}$ )	Fe, Cu	0.66 0.26 0.22 0.29
EV53	Pd 400Å CaO/Pd 3000Å	Generation (max 1.8W)	X1 : Background X2,X3: Simultaneous Detection X2(14.4 $\sigma_{X2}$ ),X3(16.6 $\sigma_{X3}$ )	Fe, Cu	0.45 0.37 0.66
EV61	Pd 400Å CaO/Pd 1000Å	Generation (max 2.3W)	X1 : Background X2,X3: Simultaneous Detection X2(6.4 $\sigma_{X2}$ ),X3(6.7 $\sigma_{X3}$ )	Fe, Au, Cu	0.097
EV54	Pd only (light water)	None (<3 $\sigma_H$ )	X1,X2,X3:Background	Fe	0.030 0.030
Fe Standard Material	—	—	—	—	0.023 0.023 0.022

表の中に、実験後の多層構造Pd電極の黒い円(surfaceA)の部分のEPMAによる分析結果が示されている。Tiに比べると、Fe、Cu、Si等は不純物量が多く、黒い円上で検出された物質の量を軽く越えてしまう。幾つかの文献<sup>(8),(10)</sup>でFeが同位体比が変化することが報告されている。そこで、SIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)を検出されたFeに適用した。

表1の中に、質量数比(mass57/mass56)を示している。幾つかのサンプルについては一つのサンプルにつき複数の点で分析している。Feの標準サンプルでは、mass57/mass56の値は

0.023 であり、これは  $^{57}\text{Fe}/^{66}\text{Fe}$  の比率が 0.023 であることを示している。ところが、実験後 Pd 上で検出された Fe は、標準サンプルの値に近い EV54 のような例もあるが、EV52 のように一桁以上も大きい場合がある。

図5と図6に質量数の深さ方向分布を示す。なお、SIMS の分析は材料科学技術振興財団で行った。EV53 は、多層構造電極で熱やX線を放出した場合であるのに対し、EV54 は軽水を用いた実験で熱やX線は発生していない。EV53 の質量数比は深さ方向に変化しているが、EV54 は深さ方向にほぼ一定である。ここには紙面の関係で示していないが、Fe の標準サンプルの質量数比は、当然のことだが深さ方向に一定である。

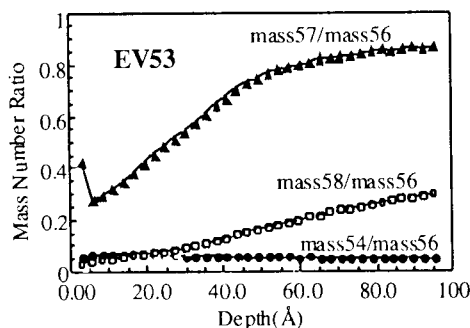
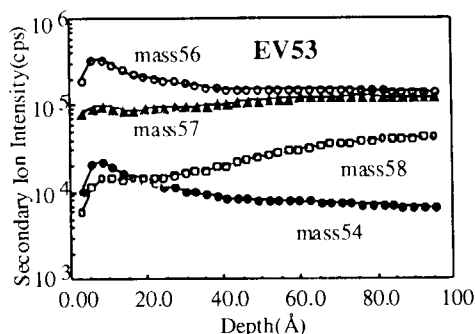


図5 Fe の同位体比に関連した質量数比の深さ方向分布 (EV53:多層構造電極)

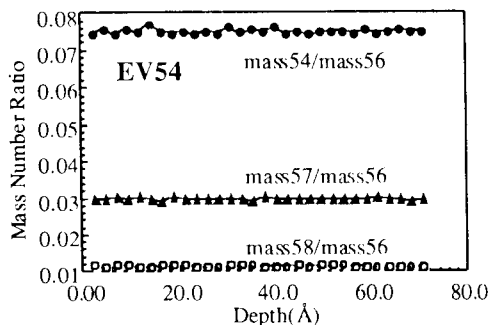
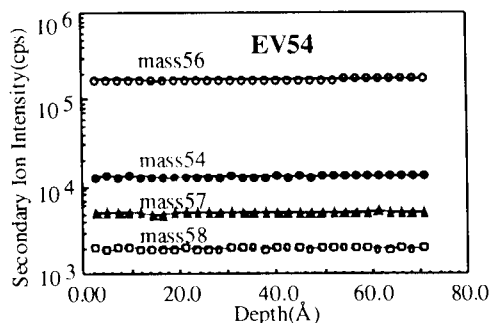


図6 Fe の同位体比に関連した質量数比の深さ方向分布 (EV54:軽水実験)

次に、これら質量数比と同位対比の関係について議論する。質量数 54,56,57,58 の物質としては、以下の候補がある。

mass54:  $^{54}\text{Fe}$ ,  $^{54}\text{Cr}$

mass56:  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{41}\text{Ca}^{16}\text{O}$ ,

mass57:  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{56}\text{FeH}$ ,  $^{40}\text{Ca}^{16}\text{OH}$

mass58:  $^{58}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{56}\text{FeD}$ ,  $^{40}\text{Ca}^{16}\text{OD}$

CaOH 等の化合物は不安定で考慮しなくてもよい場合が多いが、 $^{57}\text{Fe}/^{66}\text{Fe}$  の過大評価を避けるため、敢えて考慮することにする。ここで、mass57/mass56 と  $^{57}\text{Fe}/^{66}\text{Fe}$  の関係を議論する。

mass57/mass56 は以下の式で与えられる。



$$\frac{\text{mass}57}{\text{mass}56} = \frac{{}^{57}\text{Fe} + {}^{56}\text{FeH} + {}^{40}\text{Ca}^{16}\text{OH}}{{}^{56}\text{Fe} + {}^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}}$$

$$= \frac{{}^{57}\text{Fe}}{{}^{56}\text{Fe} + {}^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}} + \frac{{}^{56}\text{FeH}}{{}^{56}\text{Fe} + {}^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}} + \frac{{}^{40}\text{Ca}^{16}\text{OH}}{{}^{56}\text{Fe} + {}^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}}$$

もし、EV50 の分析値である 0.036 を mass57/mass56 に代入すると、次の関係式を得る。

$$\frac{{}^{56}\text{FeH}}{{}^{56}\text{Fe} + {}^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}} < 0.036, \frac{{}^{40}\text{Ca}^{16}\text{OH}}{{}^{56}\text{Fe} + {}^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}} < 0.036$$

$$\therefore \frac{\text{mass}57}{\text{mass}56} < \frac{{}^{57}\text{Fe}}{{}^{56}\text{Fe} + {}^{40}\text{Ca}^{16}\text{O}} + 0.036 + 0.036 < \frac{{}^{57}\text{Fe}}{{}^{56}\text{Fe}} + 0.072$$

$$\therefore \frac{{}^{57}\text{Fe}}{{}^{56}\text{Fe}} > \frac{\text{mass}57}{\text{mass}56} - 0.072$$

従って、もし Ca の効果が多層構造電極で同一であるとする、EV52 の  ${}^{57}\text{Fe}/{}^{56}\text{Fe}$  の値は少なくとも 0.15 より大きく、EV53 の場合は 0.30 より大きいことになる。上記の議論を踏まえて、表1を見ると EV51,52,53 といったサンプルの  ${}^{57}\text{Fe}/{}^{56}\text{Fe}$  の値は明らかに自然界の値に比べて大きい。通常の物理化学的プロセスによって、同位対比が場所に依存して変化する Fe が生成されるとは考え難い。これらのサンプルを用いた実験では、過剰熱やX線が検出されたことを考え合わせると、多層構造電極上で核反応が起こったことを強く示唆する結果であると考えられる。

最後に、本稿を書く機会を与えてくださった東京工業大学創造エネルギー工学の北沢教授、静岡大学理学部の小島教授に深く感謝致したいと思います。

## References

- (1) M.Fleischmann and S.Pons, *J.Electroanal.Chem.*,261,301(1989)
- (2) Y.Iwamura, T.Itoh and I.Toyoda, *Trans.Fusion Technol.*, 26, 4T, Part2, 160(1994)
- (3) T.Itoh et al, Proc. of ICCF-5, Monte Carlo, Monaco, April 9-13, 1995, p.189.
- (4) T.Itoh et al, Proc. of ICCF-6, Toya, Japan,October 13-18, 1996, p.410
- (5) Y.Iwamura et al, Proc. of ICCF-5, Monte Carlo, Monaco, April 9-13, 1995, p.197
- (6) Y.Iwamura et al, Proc. of ICCF-6, Toya, Japan, October 13-18, 1996, p.274
- (7) Y.Iwamura et al, *Fusion Technol.*, 33, 476(1998)
- (8) T.Mizuno et.al, Proc. of ICCF-6, Toya, Japan,October 13-18, 1996, p.665
- (9) T.Ohmori et.al, Proc. of ICCF-6, Toya, Japan, October 13-18, 1996, p.670
- (10) G.H.Miley et.al, Proc. of ICCF-6, Toya, Japan,October 13-18, 1996, p.679