



常温核融合研究：最近の進展

高橋 亮 人

(大阪大学工学部)

(1992年7月29日受理)

Cold Fusion Research : Recent Progress

Akito Takahashi

(Received July 29, 1992)

Abstract

Recent progress of "cold fusion" research is reviewed. Accumulated experimental results in these three years since March 1989 are classified as 1) weak neutron emission, 2) tritium generation with anomalous n/T ratio, 3) charged particle emission with anomaly, 4) He-4 generation, 5) large excess heat generation and 6) anomalous enhancement of D/Pd ratio. Results of 1) through 4) suggest the existence of unclarified nuclear reactions in Pd (or Ti) /Deuterium systems. Relation between excess heat and nuclear products is yet to be clarified. Subjectives of further research are mentioned.

Keywords :

cold fusion, recent progress, large excess heat, neutron, tritium, charged particle, D/Pd ratio,

1. はじめに

いわゆる「常温核融合」の研究は、1989年3～6月の期待と興奮状態での追試実験(殆ど失敗)と現象存否の論争を経て、急速に下火になった。この経緯は、色々なところで書き物となっているのでここではとりあげない。Fleischmann-Pons¹⁾とJones²⁾の発表以来3年余りとなる。この間、世界中で約600名程度の“あきらめない”研究者達が地道に研究を続け実験データが蓄積されてきた。この間、主な国際会議が3回行われ、報告集³⁻⁵⁾が出版されている。また、Storms⁶⁾による最近のレビューがある。

1992年にはいり、正月にはSRI社(スタンフォード・リサーチ・インターナショナル)で爆発事故があり3名が死傷と報道されて関係者の注目を集めた。1月末には名古屋で行われた電磁場における非線形現象国

際会議で阪大高橋グループより大量で連続的な余剰熱発生の報告がなされ⁷⁾欧米にも報道されて、再び常温核融合は相当な注目を集めることとなった。7月には、通産省資源エネルギー庁が1993年度より年間数億円の子算規模で常温核融合の組織的研究にのりだす方針であることが報道され、内外からの問い合わせで大変であると聞く。

研究の最近の進展により、パラジウム陰極を用いる重水の電気分解セルで「異常発熱現象」が生ずることがほぼ確認された段階に至ったといえる。しかし、問題が根本的に解決されたわけではなく、むしろ謎が深まったと言った方が良いでしょう。もし、この異常発熱が何らかの核反応(“新しい核融合反応”を含めた)によるエネルギー発生であることが明らかになれば、はかりしれない意味を持つことは言うまでもない。しかし、特殊な化学発熱の可能性も完全に否定されたわけではない。実験の再現性があまりにも悪いため、系統的データを得ることが難しく、背後にある物理的・化学的メカニズムが明らかに出来ないでいる。ごく少量であるが核反応生成物(中性子、トリチウム、荷電粒子、ヘリウム等)が発生することもほぼ確かとなってきている。しかし、結果が既知の核反応過程(d-d 反応等)で全く説明出来ない異常さである。余剰熱を定常的に発生できる実験条件の探究、余剰熱と核反応生成物の関係の究明、の2項目を主目標にして研究活動が盛り上がりはじめているかに見える。

以下ではまず、コモ会議(1991年7月)までの主な結果をまとめて、何らかの異常な反応が起きているらしいことをのべる。次に異常発熱現象について最近の主な結果と問題点について論じ、SRIの事故にも若干ふれる。最後に本年10月の名古屋での国際会議に向けて動向とその後の方向に触れたい。

2. 気まぐれな反応の異常な結果

重水素を吸蔵した金属中에서도核反応が起こるとすれば(まず見える程は起こらないはずであるが、百歩譲って起こるとして)、d-d 核融合反応であろう……と誰しも最初は考える。ならば核反応生成物としては、2.45MeV の中性子と0.8MeV のヘリウム-3、かほぼ同じ確率で3MeV のプロトンと1MeV のトリトンが出ることになるはずである。数keV 以上における二つの反応チャンネルへの分岐比(n/T 比と同じ)はほぼ1.0である。常温ではこの“前提”からはずれた結果が出ることを我々が許さないならば、この3年間に常温核融合の研究者達が出した実験結果は、“故意の念出”か“不自覚のエラー”による幻のデータ群がなす「病的科学」である(CERN のD. Morrison による)と結論しなければならない。はたしてこの“前提”は、起こりうる自然現象をあまねくチェックした“神の手”による許可を得たものであるかどうかが問題なのである。

この3年間の研究結果は、ユタ³⁾、プロ⁴⁾の会議をへてコモ会議の報告⁵⁾に集約されている。また Storms の良く知られたレビュー⁶⁾がある。これまでの実験結果の要点は次の通りである。

- 1) 中性子が少量発生することがある。発生はランダムなものが多いがバースト状の発生もみられる。ガス系の実験ではバースト状の観測例が多い。平均発生レベルは、 $0.1 \sim 10^3 \text{ n/s}$ /ソースのベルトに30例以上が分布し、上にはずれた結果はごく小例である。中性子スペクトルは2.45MeV の成分が確認されている

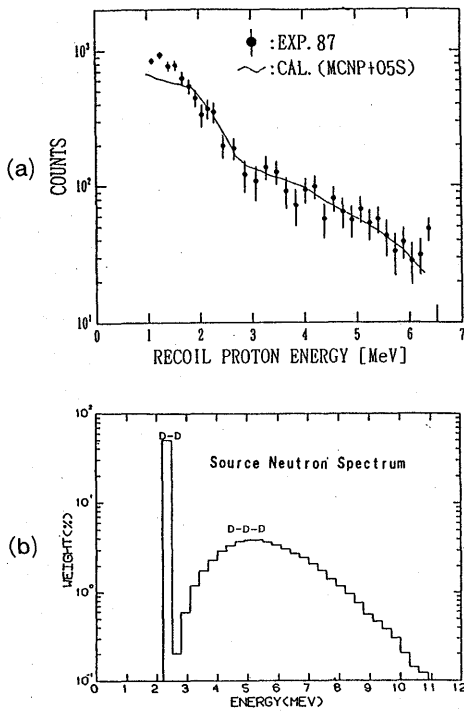


図1. (a) 重水/Pd 電解セルでNE213検出器により観測された反跳陽子スペクトル。実線は(b)の中性子スペクトルを仮定した反跳陽子スペクトルの計算結果である⁹⁾。

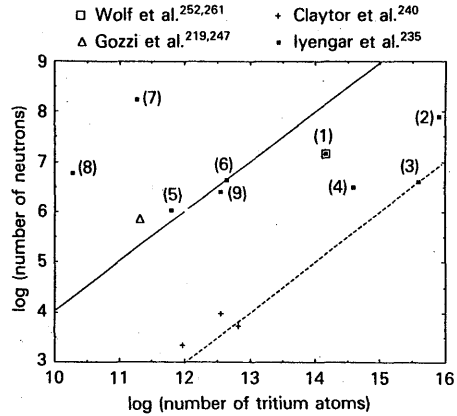


図2. 重水/Pd 電解セルで観測された n/T 比。実線は 10^{-6} のラインを示し、点線は 10^{-9} のラインを示す。他は文献6)を参照。

(数例). 3~7MeV に成分がでる⁹⁾(2~3例)が、この結果は“前提”からはずれる(図1)。中性子測定法については、この3年間で各グループとも改良・確立をはかり、現在では、神岡のような地下に行かなくとも有意の測定結果がでている。これは、もちろん、“反応系の工夫”が“高精度”測定に優先することを物語っている。

2) トリチウムの発生の確認が増えている。(約20例)。発生は気まぐれで、中性子の発生と“関連”(同時発生の確認ではない)がみられることが多い。問題は、中性子とトリチウム(トリトン)の発生数の比(n/T比)があまりにも異常なことであり、図2にStorms⁶⁾がまとめた図を示すが、 $n/T \approx 10^{-3} \sim 10^{-9}$ に分布して出る。この結果も“前提”に真向から挑戦している。トリチウム測定法については、様々なチェックが行われるようになり、化学クエンチやコンタミネーションといった初期の“不覚エラー”はみられなくなっている。日本では、北大(水野)⁸⁾、阪大(高橋)⁹⁾、東工大(岡本)¹⁰⁾の各グループがn/T比について $10^{-5} \sim 10^{-6}$ という結果を得た。

3) 荷電粒子発生については、アメリカ、ソ連を中心に3MeVのプロトンを観測したとする報告がかなりある。バースト状の発生が、ガス系又は真空ビーム系の実験で報告されている。又、アメリカ海軍研(NRL)のChambersらは、TiとPd膜を用いる真空ビーム系の実験で約5MeVのトリトンを観測したと報

告している。阪大高橋研の同様な実験でも、5MeV 弱の粒子が再現性良く観測されてる。これらの結果も“前提”から大きくはずれている。NTTの山口らは、独創的Pd膜/酸化膜を用いての真空ガス系実験で荷電粒子バーストを観測しただけでなく、 ^4He も発生すると報告している¹¹⁾。

- 4) “前提”からすると出ないはずの ^4He が発生したという報告がある。アメリカ海軍兵器研(NWC)のMilesら¹²⁾は、余剰熱を観測した電解セルより補集したガスとPd陰極について、質量分析を行い、補集ガス中で 10^{14} 個レベルの ^4He を確認、 $\text{D} + \text{D} \rightarrow ^4\text{He} + \gamma$ (23.8MeV)を仮定して、発生熱量と対応しているとしている。Texas A & M大学のBockrisらもトリチウムと ^4He を同時観測出来たとのべている。中性子やトリチウムがほとんど発生せず、熱が出て灰に ^4He が残った、ということになるから、本当であれば、大変クリーンな核エネルギー源の可能性を示す大変な結果である。Milesらは、Pd陰極中からは ^4He を検出できず、その理由は反応がPd陰極のごく表面近くで起こったためであると推測している。
- 5) 異常発熱=余剰熱の発生については、当初のFleischmann-Ponsに続いて、SRIのMckubreらがコモ会議¹³⁾で、阪大の高橋らがISEM-Nagoya⁷⁾で入力2倍以上の大量発熱を報告した。いずれもPd陰極を用いる重水の電気分解セルでの実験である。入力20~30%程度の余剰熱の発生は、10例以上の報告がある⁶⁾。余剰熱発生の有無は常温核融合の意義(応用利用の)を左右する重大事項であるので次節でもう少し詳しく述べる。
- 6) 金属重水素化合物固体内で何らかの核反応が生ずるとすれば、重水素吸蔵条件との関係はどうなっているのだろうか？何が反応をトリガーするのであろうか？“常温核融合”の反応条件と再現性・制御性にかかわる基本的糸口である。コモ会議の最大の収穫は、D/Pd(原子数比=重水素吸蔵率)が0.85以上(体積平均)になるとトリチウムの発生及び(あるいは)余剰熱の発生がみられるという因果関係がみえてきた点にある。Pd陰極を用いるふつうの電気分解ではD/Pd比は0.8が限度とされてきた。D/Pd比を1.0に近づける(又はそれをこす)方法は何か、研究者の努力は今ここに集中している。

3. 余剰熱の大量発生

Fleischmann-Ponsの最初の論文¹⁾で、不意で大量の余剰熱発生による爆発の危険性が指摘されている。1991年末までの多くの追試再現実験では、熱どころか中性子もまず出ないという結果から、このコメントは忘れられていたかにみえる。1992年1月初のSRIの常温核融合電解セル爆発のニュースは、ひょっとすると“核爆発”かもしれないという思いをかなりの数の専門家達に与えた。水素ガスの爆発にしては、破壊力が大きすぎるのではとみたのである。しかも爆発したセルは一気圧で運転されていたという。半年に及ぶSRIの事故調査・解析の結論は、セル上部のガス道が内部のテフロン板でプラグされ(偶然に)白金触媒($\text{D}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{D}_2\text{O}$)が働かず約30気圧の $\text{D}_2 + \text{O}_2$ 混合ガスが出来て、何らかの引火でガス爆発し約300気圧が生じてセル(ss製)を破壊したとするものである。したがって、“常温核融合”による核爆発ではないことになる。触媒を用いる密閉セル系の実験では、ガス層の酸素分圧を測定することにより *in-situ* でPd陰

極へ重水素吸蔵量が測定できる。D/Pd比を1.0に近づけることが常温核融合反応生起の条件らしいことになってきたから、SRIで行っているような密封セルの実験は重要である。いずれにしても事故を教訓にして、実験者は安全対策を充分に行う必要がある。

D/Pd比を高めるためには、出来るだけ対称な条件でPd陰極にDをロードするのが良いと考えられる。北大水野の研究⁸⁾によると電解電流を長周期でON-OFFするとD/Pd比が0.8をこえて上昇する傾向がある。また、“常温核融合”は近表面の反応らしい。そこで我々は、薄い(1mm)Pd板を陰極に用い面対称の位置(両側10mm)にPt線を平行にまいて電極セットを作成することとした。コモ会議ですでに発表している結果⁹⁾、即ち、20分周期のノコギリ波電流が中性子発生数を増加させることからD吸蔵の異常増加に効果あると考えた。ON-OFF運転の代わりに、6時間の低電流運転と6時間の高電流運転を周期的に繰り返す方法(L-H運転)を用いることにし、ノコギリ波で1週間予備運転し以降L-H運転に切り換えるシナリオで、1991年12月末より実験を始めた。その結果、約1ヶ月経過して、入力100%に至る余剰熱を得た。図3に結果の一部を示す。その後2ヶ月目に突如温度の異常上昇が起こり、Pd板面で膜沸騰が生じた。その時は

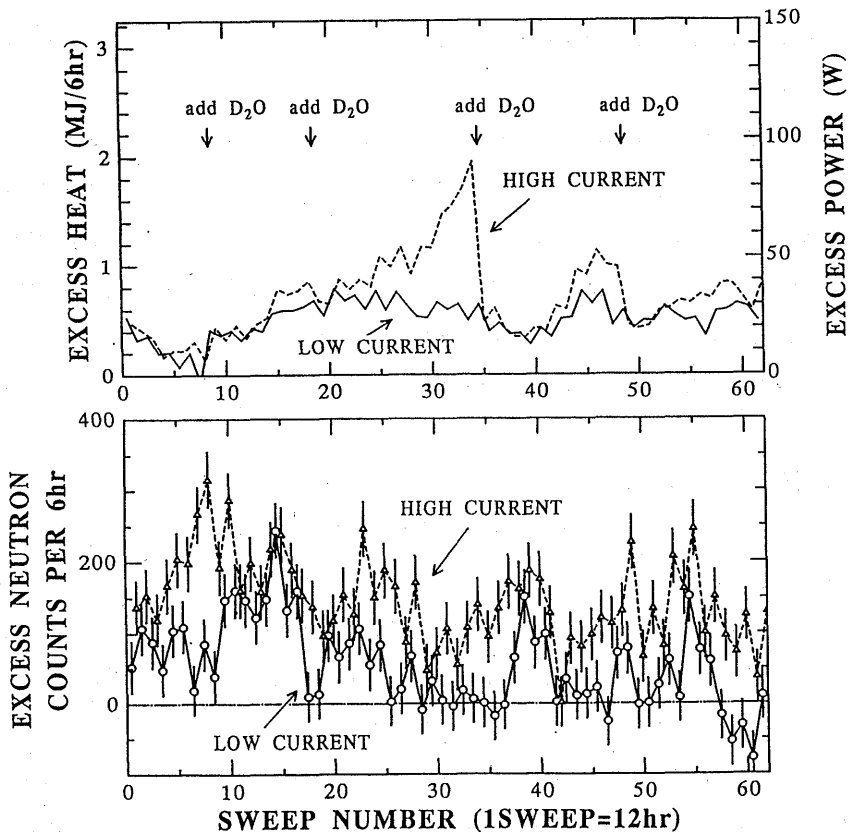


図3. 重水/Pd電解セルのL(Low Current)-H(High Current)運転で得られた余剰熱の変化と中性子発生数の変化⁹⁾¹⁴⁾.

最大で入力7倍の余剰熱を観測した。SRI事故の精神的影響で、ここで反応を下げる努力に転じ無事発熱は収まったが、今から考えるともう少し続けていたらと惜まれる。2ヶ月のランで全投入電力が250MJであったのに対し、全発熱出力は410MJとなった¹⁴⁾。出力が入力を大きく上廻ったわけであり、この余剰発熱(160MJトータル)を何らかの化学反応に帰するのは大変難しい。図3に示すように、ごく少量(1n/s/ソース程度)の中性子発生が観測されたが、不思議なことに余剰熱が増加すると中性子発生数が減少する傾向にある。一体何が起こったのであろうか？

我々は、発熱を全く予期していなかった(中性子数を増加させることだけを考えていた)ので、セルの温度測定は中央一点のみで行い、カロリメトリーが全く初等的であったため、内外より多くのご批判をいただいた。セルの温度制御は内に入れたガラス管コイルにより温度制御(20℃)した軽水で強制冷却するシステムで行われたため、軽水の入口、出口の温度差によるカロリメトリーと比較して、セル中心の温度上昇(発生熱量とはほぼ直線関係となる)測定は相当精度が高く±0.4ワット程度の精度を持つカロリメトリーが可能であることが、その後の詳しい実験で明らかになった。結果的に、図3の余剰熱を算出した較正法は相当正確であることが分かっている。高い流量での強制冷却により、早い(30分以下の)完全熱平衡時間が与えられる。ソース(発熱源)とシンク(冷却)のヒートバランスにより、発熱パワーレベル(ワット)とセル温度(電解のバブルによる対流かきまぜ効果によりセル内で非常に一様)上昇分との間にリニアな関係が得られ、当初思っていたほど悪くない熱測定が可能である。このようなことを長々と書いた理由は、信頼出来るカロリメトリーと“常温核融合”の発熱生起条件を一体化した実験条件が最も重要であると考えからである。

阪大高橋方式⁹⁾¹⁴⁾は本年1月の発表以来内外で注目され、追試実験がアメリカ、イタリア、日本等で今数多く行われている。結果の一部は、名古屋の国際会議(10月末)で報告されることになるであろう。今までのところ、この方式で20~30%の余剰熱がかなり多くのグループで観測されている。“打率”がかなり上がったという印象ではある。しかし、100%以上の大量発熱(100ワットレベル)は、我々の再実験を含めて、今のところまだ再現されていない。何かキーパラメータを忘れているようである。

Storms⁶⁾がまとめている図4によると、余剰熱の大きさとPd陰極への電流密度の大きさは関係があるらしい。顕著な余剰熱の発生には100mA/cm²以上の電解電流が必要のように見える。余剰熱とD/Pd比との関係もデータが少しは出かけている(SRI)が、0.9をこすと立ち上がってゆく傾向にある。図3の実験に我々が使ったPd板の体積膨張率を実験後測定したところ約15%で、D/Pd比で0.95程度に相当する。不思議なのは、厚さ方向が12%増加し、水平方向が約3%増加で、鉛直方向の増加は0.2%のみであったことである。厚さ方向への指向性はなぜでたのか、発熱との関連はあるのかが不明である。我々は99.99%の純パラジウムを用いた。Fleischmann-Ponsは10%程度の銀(又はセリウム)とパラジウムの合金が良いとしている。材料のことはまだ分からないに等しいのである。

7月20日の北海道のMITIのミーティングでFleischmann-Ponsはビデオを披露した。約10日間の長さの実験ランで最後の約10分間でセルが完全沸騰した。余剰熱は入力6~7倍、トータル20~30MJ出たと

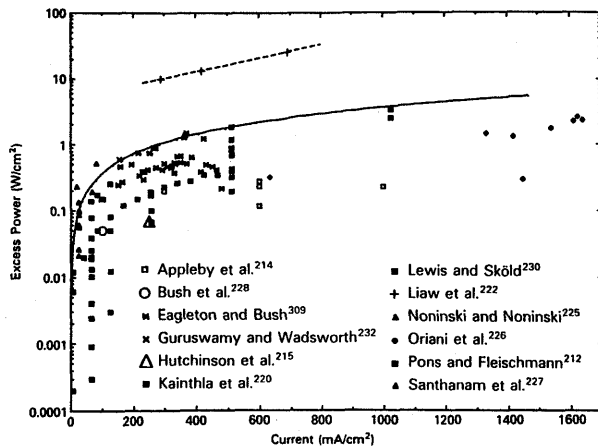


図4. 重水/Pd 電解セルで得られた余剰熱の電解電流密度(パラジウム表面面積当たり)の関係⁶⁾.

報告した。4回同じことを繰り返したが材料をうまく運べば100%再現するとも報告した。ビデオで見たと
ころ、熱源がパラジウムであり、盛んな膜沸騰が生じ電解液全体が激しく沸騰していることは全く疑う余地
がない。名古屋で発表される詳しいデータを望みたい。

なお、NTTの山口はガス系でも大量の発熱を観測した¹¹⁾。

4. 今後の方向

大量の発熱があること、中性子もトリチウムも出ることが、ようやく“事実”となってきた。しかし、
これらの結果はあの“前提”からすると全く受け入れられないことばかりである。はたして、背後にはどの
ようなメカニズム・物理が秘められているのであろうか？この解説では、理論モデルの進展にはわざと触れ
なかった。“事実”を重ねてからでも遅くないからである。高エネルギーの核反応はランダムでストカ
スティックな現象として生じ、原子結合や固体物理的効果(電子結合力)は無視できる。極低エネルギーで、固
体の原子集団・電子集団のダイナミックな運動と“コヒーレント”に連動した、しかも高エネルギーでは起
こりえないようなタイプの核反応が本当に存在するのであろうか。Schwingerモデル³⁾、Preparataのスー
パーラジアン⁵⁾、我々の多体核融合モデル¹⁴⁾、Hagelsteinのコヒーレントな弱い相互作用⁴⁾、その他；
すべて仮説にすぎないが、上記の想念から出発している。メカニズム解明を助けるために、進展した理論モ
デルが今必要となってきている。

今後の実験研究の方向として、私は次のようなことを考えている。

1) 再現性ある発熱条件の探究

L-H, ノコギリ波等の非定常電気分解法の成果にヒントを得て、D/Pd比を高める条件と発熱の関連を
明らかにすること。そのためには、D/Pd比の *in-situ*(オンライン)同定法を特にオープンセルで確立
する必要がある。電極構造(面对称, ギャップ, 板厚, 他), Pd(又は合金)製造法との関連, を明らかに

する必要がある。Pd 表面での生成層(Li, Pt, Si 等による)の役割は何か？(D/Pd 比を高める拡散フィルター(blocking layer)が出来るのではと言われている。)液中不純物はどのようにそれに影響しているのか？カロリメトリーの向上のためのクロスチェックシステムの確立，等々，沢山の細かい事がある。実験パラメータのマトリックスをつぶしていくのは大変である。この研究のターゲットは，発熱を増加させる条件の発見と核生成物(中性子，トリチウム，He-4)との関係を明らかにすることにある。燃料電池型のセルで同じように発熱すればエネルギー利得は大きく向上し応用上の意味は大きい。高熱効率での運転を考えると密閉セルによる研究にミッションがみえる。

2) 生成粒子観測によるメカニズムの探究

真空・ガス系の実験が重要な手段となる。生成荷電粒子のスペクトロスコピーに成功すれば，どのような核反応が起こったか同定出来るので，学術的意義は非常に高い。問題は，どのような反応膜を用意して，ガス・ビーム等でどのようにDをロードし，どのようにトリガーして，“常温核融合”反応を起こすかである。NTT 山口氏の方法，NRL と阪大で行っている方法はその出発点であろう。

また，生成ガスの質量分析も重要である。中性子もトリチウムも出ず熱のみが出る核融合反応がもしあるとした場合の，核物理的帰結はHe-4が生成する(熱と等量に)のがわかりやすい。ヘリウム分析が重要であるゆえんである。灰にはその他He-3があるかもしれないし，2次反応等で核変換元素もあるかもしれない。

この2項目だけでも，かなりの予算，研究者数，国際協力，等が必要と考えられる。特に研究者数は今よりもずっと多い方が良くであろう。読者のご関心とご援助を願う次第である。

参 考 文 献

- 1) M. Fleischmann, S. Pons : J. Electroanal. Chem. **261** (1989) 301.
- 2) S.E. Jones *et al.* : Nature, **338** (1989) 737.
- 3) *Proc. First Annual Conf. Cold Fusion*, Salt Lake City, March, 1989.
- 4) *Proc. Anomalous Nuclear Effects in Deuterium Solid Systems*, Prove, 1990, AIP Conf. Proc., 228.
- 5) *The Science of Cold Fusion, Proc. 2nd Annual Conf. Cold Fusion*, Como, 1991, Italian Physical Society, publ.
- 6) E. Storms ; Fusion Technology, **20** (1991) 433.
- 7) A. Takahashi : *Nuclear Products by D₂O Pd Electrolysis and Multibody Fusion*, Proc. Int. Symp. Nonlinear Phenomena in Electromagnetic Fields, Nagoya, Jan. 1992.
- 8) T. Mizuno *et al.* : *Confirmation of the F-P Effect*, Proc. Int. Symp. Nonlinear Phenomena in Electromagnetic Fields.
- 9) A. Takahashi, *et al.* : *The Science of Cold Fusion, Proc. 2nd Annual Conf. Cold Fusion*, Como, 1991, Italian Physical Society, publ. pp. 93.
- 10) M. Okamoto, *et al.* : 平成3年度科研「常温核融合の総合的研究」報告書 p.179.
- 11) E. Yamaguchi, T. Nishioka *Proc. Anomalous Nuclear Effects in Deuterium Solid Systems*, Prove, 1990, AIP Conf. Proc., 228, pp.354.
- 12) M.H. Miles *et al.* : *The Science of Cold Fusion, Proc. 2nd Annual Conf. Cold Fusion*, Como, 1991, Italian Physical Society, publ. pp.363.
- 13) M.C.H. Mckubre : *The Science of Cold Fusion, Proc. 2nd Annual Conf. Cold Fusion*, Como, 1991, Italian Physical Society, publ. pp.419.
- 14) A. Takahashi *et al.* : *Excess Heat and Nuclear Products by D₂O Pd Electrolysis and Multibody Fusion*, to be published in Int. J. Electromagnetics in Materials **3** (3) (1992).