

McKubre, M.C.H. *Cold Fusion (LENR) One Perspective on the State of the Science (Japanese version)*. in *15th International Conference on Condensed Matter Nuclear Science*. 2009. Rome, Italy: ENEA.

English version: <http://lenr-canr.org/acrobat/McKubreMCHcoldfusionb.pdf>

ICCF15 プロシーディングス（議事録）の序文

常温核融合（LENR）という科学の状況への私の視点

M.C.H. McKubre

SRI International, Menlo Park, California.

要約

最近、凝集体核科学（CMNS）が一般の注目を集めている。低エネルギー核反応、または格子増大核反応（LENR）とも呼ばれるこの分野を、専門用語を使わずに説明することがますます大事になってきた。これらの新しい知見に対してどのような異議や懐疑的な意見があるかを明らかにするのは、非常に重要で、かつ時宜にかなっている。基本的な3つの疑問に答えなければならない：何が分かっていると思っているのか？ なぜそう思うのか？ 広い科学界にはなぜ常温核融合への疑念がまだ存在しているのか？

このICCF-15のプロシーディングス（議事録）への序文では、重水素と金属の新しい物理現象の実験によって、伝統とは異なる知見を明確にするためにSRIで行われた実験研究について述べる。この研究は、ENEA フラスカーティ、エネルギーテク社、MITの密接な協力を得て行われた。

1. はじめに

この科学の状況を考察するように学会の主催者に頼まれた。これは、のべ1000人年に相当する仕事の概要を30分の発表、すなわち数ページにまとめることを意味する。言うまでもなく不可能な依頼なので、私自身の見解を手短に述べることにする。時間が限られるため、この分野の多くの重大な副次的な課題については述べていない。

これまで我々が何の現象を研究してきたかを理解するのが重要である。1989年3月23日にフライシュマン、ポンズとホーキンスは[1]次の結果を報告した。

- i. 異常な熱発生が起こった。
- ii. 強力な電気分解によってパラジウムの陰極に重水素を浸透させた結果、その熱が発生した。
- iii. 電気分解は長時間にわたって行う必要があった。

下線を引いた語は、重要であるにもかかわらず、よく見落とされるから強調しておきたい。報告された効果は熱発生だった。これを熱量測定法によって研究する。

下線を引いた言葉に注目していただきたい。長時間にわたってパラジウムの陰極に強力な電気分解によって浸透させられた重水素。これは電気分解の実験だ。物理学の分野では、電気化学に詳しい人は稀だ。浸透した重水素がパラジウム中に拡散する時間よりも何倍も長い時間が経ってから熱が発生した。

この熱発生は、化学エネルギーでもなく、既知の格子貯蔵効果でもなく、核反応に該当する強さで起こった。しかし、透過放射線 ($\alpha, \beta, \gamma, n^0$) や格子放射化は (殆ど) 発生しない。この反応の顕著な特徴は、莫大な量のエネルギーが生成されることである。このエネルギーは化学反応に起因するよりもはるかに大きく、そのような化学反応の物理的な証拠はない。私たちは、この熱発生は化学反応のエネルギーの数百倍または数千倍であることを観察した。これらは、フライシュマン・ポنز効果 (Fleischmann-Pons Effect; 以下 FPE) の特性であり、現在の視点から、いくつかの疑問に答えよう:

1. 私たちは何が分かっていると思っているのか?
2. なぜそれが分かると思っているのか? 本当に証明できるだろうか?
3. 科学界にはなぜ広く常温核融合への疑念がまだ存在しているのか?
4. どのように進展させることを提案するか?

2. 何が分かっていると思っているのか?

過剰熱の存在は実験で確かめる問題であって、理論的な論争や先入観とは無関係である。過剰熱が検出された実験は数多く、過去 18 年間に国際常温核融合学会で発表されている。このうち、フライシュマンとポنزの実験がおそらく最も研究され、興味を持たれているので、これについて議論する。

長年にわたって、SRI で行われた研究では[1]、フライシュマン・ポنزの実験で観察される過剰熱を得るためには、どんな条件が必要とされるのかを明確にするために実験を行った。(さまざまな過剰熱の実験があつて、他の種類の実験には違う条件もありうることを念頭に置いてもらいたい。) 次の必要条件が認められた: (i) 陰極は D / パラジウム比 = 約 0.9 以上の水素濃度比率に達する必要がある; (ii) 高い濃度状態を 2 ~ 4 週間持続する必要がある; (iii) ^{いきち} 閾値以上の電流が必要である; 及び (iv) 熱のバ

ースト（突発）のためには比較的高い濃度状態が必要である。そして、環境条件（作動パラメーター）の変化が過剰熱発生のきっかけとなることが分かった。おそらく、過剰熱と重水素が金属の中へ流動する流量（フラックス）は関連している（流動は金属に入る方と出る方のいずれも効果的である。）

SRIのFPEの研究活動には、これまで60人年以上を費やしてきた。まず、高いD/Pdの水素濃度比率を達成し維持するために、電気化学的界面を制御するのに要する触媒毒および添加剤の役割の決定的な重要性に着目した。陰極負荷と過剰熱の生産の相関関係を研究し、FPEの開始閾値をイムラ・日本[2,3]と同時に報告した。より良い全自動で高精度な熱量計を設計し、組み立てて、フライシュマンとポンズの過剰熱発生を再現しようと試みた。目的はまずその効果の存在を確認すること、そして効果が起こる物理的な条件をよりよく理解することだった。

この研究の暫定的な結論として、フライシュマン・ポンズ過剰熱効果を発生させる可能性のあるパラメーター空間を定義でき、実験に基づいて、次の式として算出できた：

$$P_{xs} = M (x-x^{\circ})^2 (i-i^{\circ}) |i_D| \quad [1]$$

ここで $x = D/Pd$ 比率で、 x° は開始閾値で通常 ~ 0.875 、 i は電流密度の開始閾値で i° の値は通常 $75 < i^{\circ} < 450 \text{ mA cm}^{-2}$ の範囲内であって、重水素の界面フラックスは $i_D = 2-20 \text{ mA cm}^{-2}$ である。時間閾値 i° の認識も重要であって、少なくとも重水素の拡散時定数の10倍も長い。

3. なぜそれが分かると思っているのか？

式(1)の項の評価[1]は、数多くのレポートと分析の対象となった。特にSRI、ENEAとエネルギーテク社のものだが、広範な実験データを含んでいる。この分析はこのプロシーディングスの中でより詳細に分析されている（文献4参照）。SRIと他の研究所からも非常に多数の実験報告があるのに、この効果がまったく存在しないとか、効果が（未知の）エネルギー貯蔵とか、または（未知の）化学反応の結果である[5]とか、主張するのはもはや合理的ではない。今の時点で、フライシュマン・ポンズ効果は「再現不可能」であるとの主張は、筋の通らないものであって、非科学的である。効果を得るのに不可欠な環境条件（パラメーター）をすべて整えれば、必ず効果は再現している。

4. 広い科学界にはなぜ疑問がまだ存在しているのか？

子供の養育に例えてこの質問を考えるのが適切ではないかと思う。最初は敵意をいだいてはいなかったが、困難な出産のせいで、急速に敵意が芽生えた。次に、双方のコミュニケーションのまずさに大いに問題がある。感情や野心から切り離された本当の科

学の進歩を世間に知らせることができない。CMNS コミュニティ以外、研究の内容や21年の間に研究がどのように変わってきたかを徹底的に調べる人が殆どいない。最後に、これはそう重大でもなくて、やや想像力によって補っているが、研究費の不足がある。材料科学の面では非常に複雑な問題だから、（そして、この研究は潜在的に重要であると思うから）十分な研究費が必要だ。この子供は、出生時に虐待を受け、殆ど放棄されたが、豊田稔に助けられた、今、誤解や財政的に抑えられはしたが、21歳となった。私は資金の制約の問題については論じない。（ある部分では）敵対的な拒絶反応の問題とコミュニケーション不足の問題を解決したら、研究費の問題はとたんに消えるだろう。

権威ある機関の少数のグループによって初期に報告された過剰熱を否定する結果を人々は重視した。上記の議論を踏まえて、これらの実験や他の初期の実験は、環境条件を満たすように行われたかを確認することが有益だ。おそらく、最も引用された初期の否定的な結果は、ルイスら[6]カリフォルニア工科大学のグループによるもので、「本測定で得られた D/Pd 比の化学量 0.77, 0.79, 0.80 は、重水素を吸収させた陰極の D/Pd 比を表しているとされた」と報告した。MIT の Albagli ら[7]の初期の否定的な結果も広く引用される。彼らは「平均吸収率は重水素 (D) の場合 0.75 ± 0.05 で水素 (H) では 0.78 ± 0.05 である」と述べている。カリフォルニア工科大学と MIT の否定的な結果は図 1 に示してある。この図は、SRI の初期の過剰熱発生の肯定的な実験の回数を水素吸収率の関数としてヒストグラムに表したものだ。

ベル研究所のフレミングら[8]は否定的なレポートの中で更に低い水素吸収率を見積もっている。この論文では、著者は「重水素の吸収の程度は、同じ期間のオープンセルの場合と同等であった。より長い電気分解実験で吸収された量は、 PdD_x ($0.45 < x < 0.75$) だった。」と述べている。

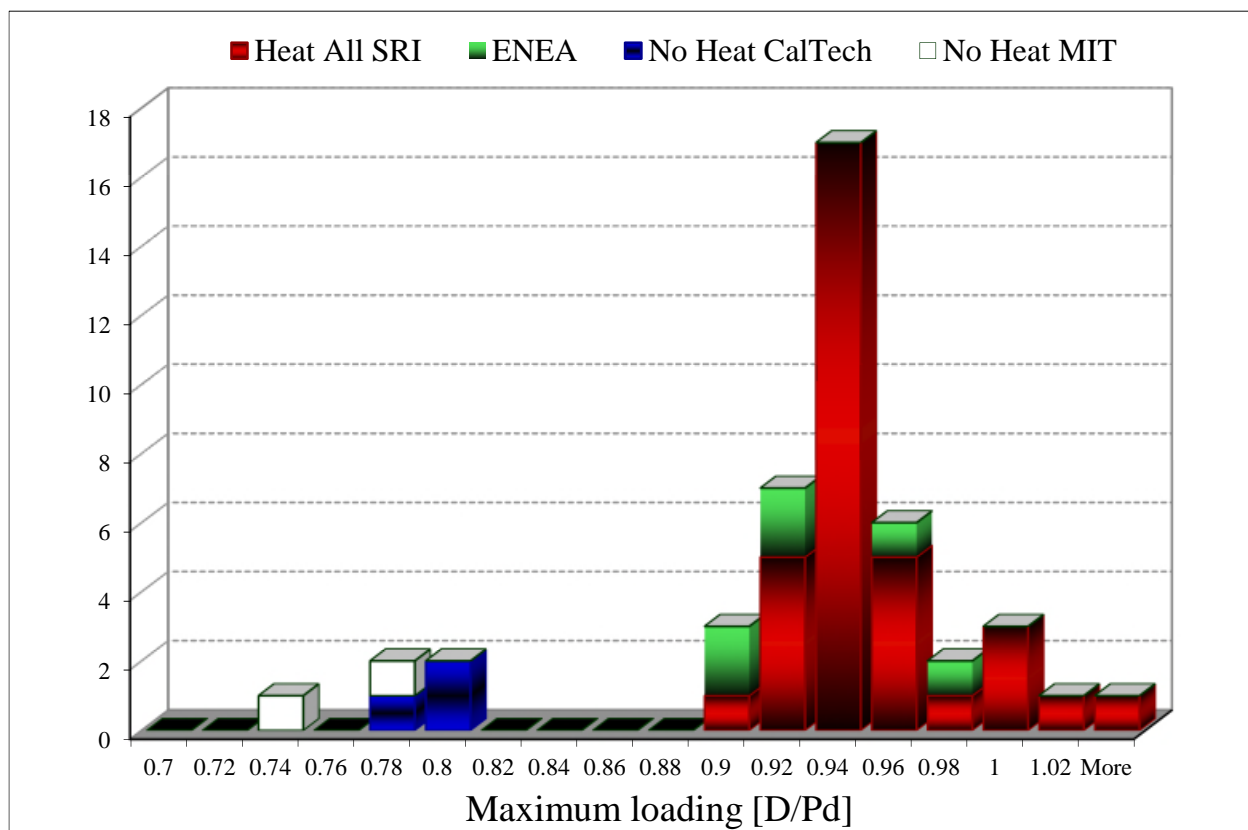


図 1. SRI と ENEA のいくつかの初期の実験結果。陰極の最大水素吸収率の関数として測定可能な過剰熱を検出した実験回数ヒストグラムである。同様に MIT の否定的な実験結果を入れた。報告された水素負荷量：0.75±0.05（参考文献[7]）、同じくカリフォルニア工科大学の否定的な実験結果で報告された負荷率 0.77、0.78、と 0.80（参考文献[6]）も入れた。

今日の知識から判断しても、そして図 1 に明らかに見られることだが、上記のどの研究グループのどのセルからも過剰熱が発生するはずがない。水素濃度が不十分だったと著者たちが明確に報告した。それだけではなく：実験の期間は普通 300 時間続かなければ不十分である。電流密度があまりにも小さすぎた。重水素の流動を測定しなかった。式[1]の基準を満たされたとは示されなかった。少なくとも二つは確実に満たさなかった。後から考えると、著者は「未知の未知」、そしておそらく「見苦しいほど性急な判断」の犠牲者だったことは明らかである。これは 1989 年の状況では無理からぬことだ。重要なのは、これらの実験は、ありのままに何であったか分かった上で、何でなかったかも判断し、認識すべきである。この実験は、FPE が起こる条件を教えてくれる実験結果のデータベースの一部であり、効果が存在しないことの証明の一部ではない。証拠の不在は不在の証拠ではない。

さて、今日の顕著な批判は何であるか？ 質問のいくつかを予想して、解決の方法を提案しよう。基本的な質問：

- 「実験及び結果は再現性がない」
 - いくつかの実験チームが結果を出せなかった
 - 異なる研究室で異なる結果が得られた
 - 類似した試料を同じ研究室で使ったにも関わらず一貫性のない結果が得られた。
- 「結果が不正確である」
 - 入力電力の誤測定
 - 出力電力の誤測定
 - 過剰熱は測定の誤差の範囲内
- 「熱は本物だが、未知の化学反応か格子貯蔵エネルギーの効果である」
 - 電気分解の生成物を過大評価する
 - 電極外の電解液に起こる化学反応
 - エネルギー貯蔵と放出（全体の過剰エネルギーの数パーセント）
 - ハイドリノか他の異常な「高エネルギー」化学反応
- 「核反応の生成物が見つからない」
 - 定量的にみて高エネルギーの生成物が見られない
 - D_2 と周囲空気の中での 4He の測定は難しい

「多くの実験結果は再現性がない」

見かけ上の非再現性は広く認められ、いくつかの論文はこのトピックについて[9-11]書かれた。忘れがちなのは、殆どの再現性の高いと言われる効果は系統誤差であることだ。結果の非再現性によって非存在の証拠にはならず、むしろ逆であることを示している。簡単に言えば、効果を引き起こす重要な条件が十分に制御されていないことを示している。

初期の軽薄で不真面目な説明や、あるいは真面目だと主張した説明では、大学のフットボール・チームの記録とか（またはチームがないとか）¹ 各国民の性質を FPE 結果と関連させて説明している。真面目な批判もある。同じ実験を同じ実験室で同時に行っても、異なる FPE の結果を得ることを明確に認識しなければならない。これらの実

¹訳注：「フットボール・チーム」とは Nathan Lewis のしゃれだった。Douglas Morrison はフットボールの記録が悪ければ悪いほど科学研究がうまくできると本気で思っていた。フットボールチームがない大学こそ物理学で正しい結果が出せるという訳だ。「各国民の性質」とは Morrison の「Regionalization of results」理論（結果の地域のばらつきの理論）で、北ヨーロッパとアメリカの東海岸の大学と研究所ならうまく研究ができて、南ヨーロッパとか日本の研究者たちは生まれつきの無能者だと主張した。

験は、通常の測定とは大きく異なる結果を示す。SRIで行われた初期のFPEの研究では、再現性のパラメーターを調べた。12セルのセットを用意し、注意深く同一になるように準備し、同時に作動させて、FPEに適切であると考えられる電気化学的及び物理化学的パラメーターの時間変化を監視した。

出所が確かな一本のパラジウム線を使用し、同一の長さで13本に切り分けた。線は、普通は長さ3~5センチ、直径1~3 mmのものを使用する。表面の損傷や異物を除去し、表面に5接点を溶接し（陰極の電流用を1つと軸方向の抵抗測定用に4つ）、焼きなまし、異物除去のために表面をエッチングして、12個のセル内に取り付けた。残りの1本の線は対照資料として取っておいた。これらの処理は全て同じ人によって一括処理した。12個のセルを、単一の供給先からの電解液で満たし、次いで同じ恒温槽中に3×4のマトリクス状に並べ（同じ電流が流れるように）電気的に直列に接続して運転した。

測定対象は、電流（1箇所）、セル電圧、対照電極によるカソード電位、温度と電気抵抗（D/Pd 水素濃度比率）であり、すべての値が同じ記録装置で計測されている。陰極の界面インピーダンス（抵抗）は断続的に測定した。わざわざ同一にした実験を12行っただのに、それぞれが異なった挙動を示した。熱発生のみならず、有意で注目すべき相違が観察された：セル電圧と基準電位の両方の電流 - 電圧 - 時間プロファイル；時間ごとの抵抗率によって測定される重水素を吸収する各電極の能力と「意欲」；最大の水素濃度；界面インピーダンスに反映される界面の運動と質量輸送過程。一連の実験に電極を12個ずつ試したが、どの値も、すべての試験の12の電極すべてで異なっていたのだ！このマトリクス実験は非再現性の起源を理解して、それを制御する試みとして、数回繰り返された。2種類の微量不純物の違いが一因であることが観察された。一つは有害な不純物で、避けるべきだと学んだ。もう一つのは量を制御すれば、水素濃度を高めるのには有益な不純物だった。

電気化学的手段では、（微量化学種を変えても、）結果のばらつきを制御できなかった。実験の変動性の第2の主要因は、パラジウム金属陰極の入手先と状態だった。図2は、（熱量計中かどうにかかわらず）重水素濃度を達成したセルの数を金属のソース供給先やロット番号により棒グラフにしたものである。エンゲルハード社ロット#1（プロット上のE # 1）で示されるSRIで最初に使用された材料は、驚くべきことに、すべての実験の32%で最大積載D/Pd > 0.95、36%で > 1.0、および14%（陰極3つ）で > 1.05 を達成した、高い濃度を維持できる電極、つまりE # 1材料の82%は、適切に刺激された場合、FPEを示す過剰熱を出せる電極である。残念ながら、この明白な

成功は問題も明らかにした。同じメーカーの他の材料でも、エンゲルハード社ロット#1の吸収能力に遥かに及ばないと分かったのだ。²

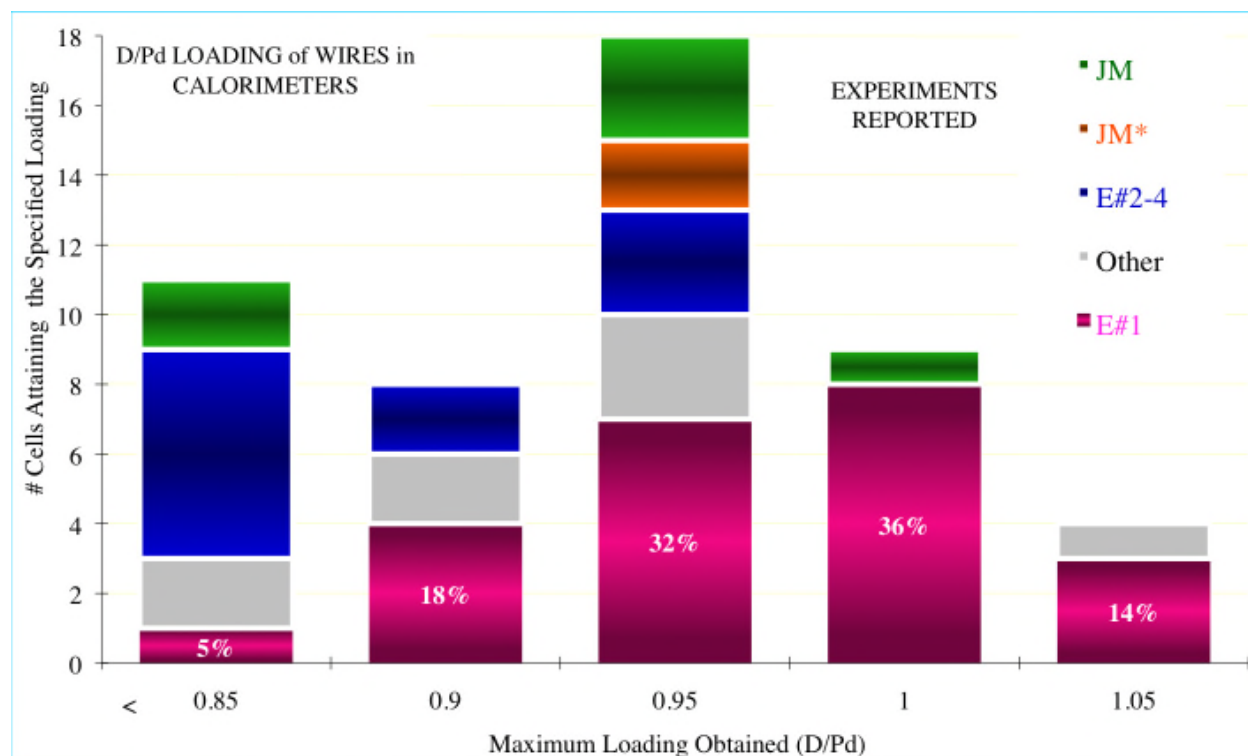


図 2. 製造元対 1 M LiOD の電解液に Pd 陰極の重水素を負荷する能力を実証しているヒストグラム。JM=ジョンソン・マッセイ社、JM*は特別なロットで 1989 年以前の作り方で材料を複製した、E=エンゲルハード社。

幸いに、一貫性のある材料には、一貫性のある挙動が見られる。同じ材料ロットから作られた電極は、別の研究所で、別の熱量計で測っても、同じように過剰熱を生み出す。最近我々は ENEA (フラスカティ) の Violante 氏のチームと Dardik 氏と Lesin 氏らのエネルギーテック社のチームと共同研究をしてきて、同様の一般的な材料で比較研究を行った: ENEA によって設計・作成された、長さ 80 mm、幅 7 mm、厚さ 50 μm の Pd 箔を使った。図 3 は、エネルギーテック社の現在の手順 (プロトコル) に従って、SRI と ENEA の二つの異なる熱量計で得られた結果の比較を示す。³

²重要だが同じくらい当惑させられた、実験 E#1 は私たちが今まで実験した中では最も不純物の割合が高く、99.7%というメーカーの純度規格に遥かに及ばなかった。

³エネルギーテック社の実験のユニークな特徴は、SuperWaveTM と呼ばれるフラクタル正弦波電流刺激を使用することである。SRI でテストされた全ての変調方式の中で唯一、この波形は、高い D/Pd 率と高い界面重水素フラックスを同時にもたらす。方程式の項を見れば[1]、両方とも過剰熱のために必須である。

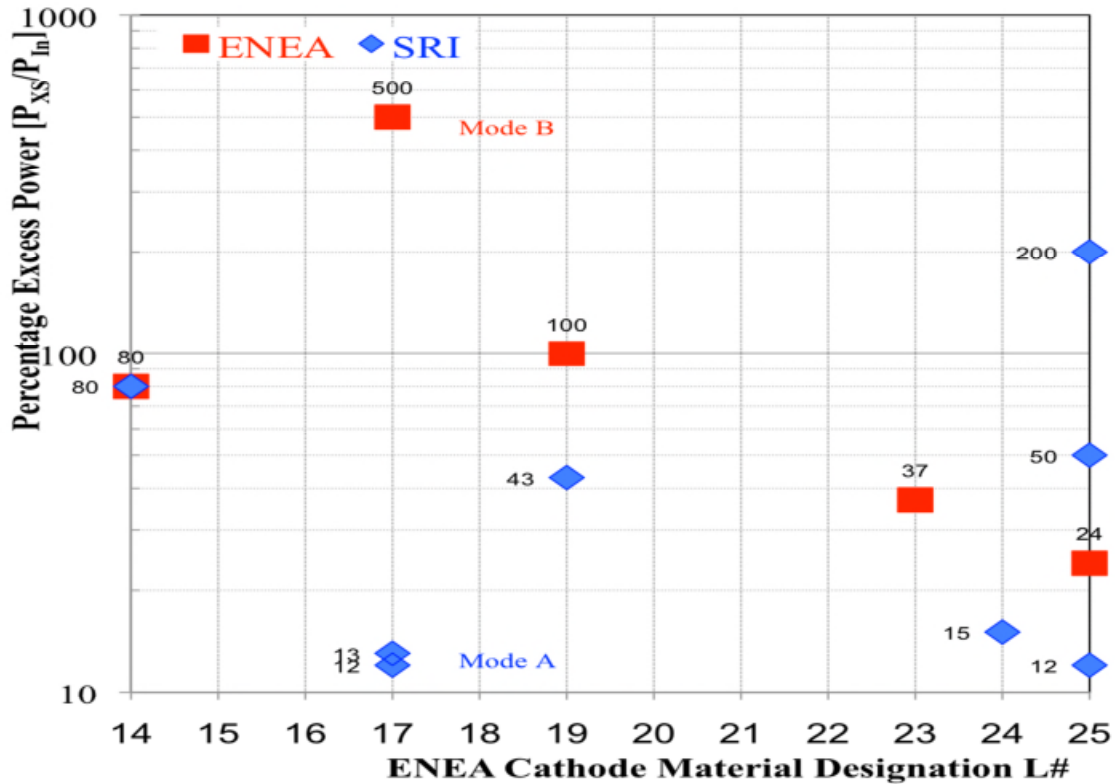


図 3. ENEA（フラスカティ）で密閉セルに質量流量熱量計で得た結果と SRI（メンロパーク）でオープンセルの熱流熱量計で独立に行われた実験で同じ材料ロットから得られた結果の比較。[12,13]

図 3 の横軸に示されている番号は、ENEA が定めた材料の異なるロットと異なるソース、圧延および焼鈍条件を示している。ENEA の "L" 番号シリーズ L14、15、16、17 である。材料の特定のロットとの二つの実験は、SRI と ENEA での L14 は、（互いの実験結果を知らずに）互いに完全に独立して 80% の過剰熱で割った入力電力の対比を生じた。別の素材を使用し、L17、SRI は 13% と 12% の過剰熱を観測し、ENEA は 500% を観測したが、2 実験所での過剰な熱の生産は異なるモードで登場した。L19 材料は ENEA における SRI の 43% ~ 100% であることが示された。一般的な要点は、材料の同一ロット型は二つの異なる実験所での過剰熱の結果ほぼ同じレベルに達する。挙動の一貫性はいくらかあるが、ロットとロットの違いによって挙動が非常に異なる。図 3 のデータ点のないロット番号は、SRI でも ENEA でも過剰熱を生じなかった。（ただし、すべてのロットが両方の場所で試されたわけではない。）

「結果が不正確である」

最近になって入力電力の誤計測の問題を提起する人がいる [14]。一般的に直流電流の刺激についても、特にエネルジェテック社所有の SuperWave™ 変調された電流波形について疑念を呈している。この批判の基礎を理解することは非常に困難であって、なぜそ

れが 21 年も持続したりまたは浮上するのだろうか。電流、電圧、抵抗、および時間の測定は、技術者や科学者に最も身近な一部だ。産業は（今までの）あらゆる FPE 実験で使用される波形より、はるかに複雑な電力とエネルギーの波形の正確な測定に依存する。一般的に電気化学セルは一定電流で電圧が変化するように操作する。電力の正確な決定は、このように、スカラーではなくベクトル演算であり、簡単な予防策さえすれば正確に測定できる。

ナイキスト・サンプリング法則によると、最高の周波数成分の 2 倍でサンプリングをしたら、アナログ信号を完全に再構成できる。そのような測定における主な関心事は、未測定の高い周波数成分は入力信号にないと確認することだ。一般に、このことは電流（および電圧）電源出力帯域幅を制限することによって、極めて簡単にできる。意図しない高周波成分が含まれている SuperWave™ 超波エネルギーでは、この測定の問題に対する解決策は複雑に見えるが、実験的に非常に簡単である。電流 - 電圧ペアは 50 KHz で計測し、その後乗算される。次いで平均するだけで入力電力を得ることが出来る。この手順のいくつかの実験的チェックがエナージェテック社、SRI および ENEA[15,16]によって使われている。

- a. 用いている電流および電圧の測定速度（50 kHz）は、適用 SuperWave™ 最高周波数よりも 500 倍高い。
- b. 10 倍高い測定周波数（500 kHz）を試して使用したが、入力エネルギーに有意な差を観察しなかった。
- c. 高速の商用電力メーター（横河電機 WT210/230）は、100 キロヘルツのサンプリングレート（計数速度）で使用されている。結果は +/-0.5% 以内で一致した。
- d. SRI と ENEA の高周波オシロスコープとスペクトラム・アナライザは、ナイキスト限界よりも高い周波数で使用され、カロリー測定上の問題がなく、過剰熱の証明に使用されてきた。
- e. 我々の標準的な再現方法（プロトコル）に従って、[6]、SRI でエナージェテック社のデータ収集システムを使用しての実験は、完全に致した結果を示し、まったく新しいデータ収集方法およびシステムに置き換えられた。[12,13]

もう一つ明らかな要素がある。熱量計は、他の測定器よりうまく総量の絶対エネルギーを測定できる。殆どの場合、殆どの熱量計は、出力=入力という熱の基線（ベースライン）で操作する。もし本当に非常に低いサンプリング周波数が問題ならば、常に、入力システム誤差として誤った値が観測されると予想する。

この研究に色々な種類の熱量計が利用されてきたのに一貫した効果を発揮することが示されているので、測定された出力電力およびエネルギーで有意なシステム誤差があるとは非常に考えにくい。入力電力の評価と同様に、出力を解決するために必要な変数（質

量、時間、抵抗、温度差)は、典型的に最も簡単な測定の一部である。研究者たちが本当に21年間一貫してこれらの変数を誤って測定を繰り返していた、そしてその21年間にこの分野に新しく入ってきた多くの人々は本当に同じ誤った方法を習ってそればかり真似て繰り返したという主張を合理的に維持することは非常に困難である。

最後の論争は、系統的な測定誤差が普遍的に存在しているのはその大きさである。SRIで我々は、90 σ すなわち測定の不確かさの90倍大きい過剰熱効果を観察してきたし、過剰熱が3 σ 以上($P_{xs} > 3$)の状態は百回以上観察したことがある。効果はつかの間のものではなく、何時間も、場合によって何日か何週間も長く続いたこともあって、ある実験では1ヶ月以上続いたケースもあるので、測定システムをチェックするために十分な時間を与えた。出力は、入力と比べて小さくはなく、 $P_{out} / P_{in} > 2, 3, 5$ の比率も観察しており、最も高い継続的な値は17時間に亘って平均25[17]だった!

「FPE 効果は化学反応あるいはエネルギー貯蔵によるものだ」

いくつかの要因は、多くの場合、FPEの過剰熱は本物で正しく測定されていても、このような核反応は知られていないため、その原因は、核以外でなければならないことが示唆されている。これらのいくつかは次のとおりである。

1. 電気分解の生成物を過大評価する
2. 電極以外の電解液に起こる化学反応
3. エネルギー貯蔵(観察できない程度の遅い反応)と放出(早い反応急速に起こる)
4. ハイドリノかその他の異様な化学反応

FPEは、化学またはエネルギー貯蔵の現象だろうか?簡単に言うと、断じてそうではない!核反応と化学反応のこれらの2種類の異なるエネルギーに簡単な計算を実施する能力と意志を持っていれば、誰でも簡単にFPEが化学またはエネルギー蓄積効果によるものではないことを確認できる。その上に、例えそのような反応だったら、それこそ興味深く、潜在的に非常に有用であろう。化学種の量があまりにも少ない。このような故意に開いている熱量計セル内に予期しない、又は目撃されていない D_2 と O_2 の再結合などのエラーが連続的に起こっているとしたら、ある実験の場合に熱効果と同様の規模のエネルギー容量がある。しかし、この疑念は、次の2つの理由によって納得できない。

- i. FPEは、閉鎖されているセルでも、着実に測定されていて、その反応は開いているセルと同じ形と大きさである。閉鎖されているセルでは再結合は始終起こっているわけだから、そのエネルギー量は計算に見落とさずに含まれている。
- ii. 添加される水の量はファラデー損失によって電解液からなくなる水を補うため、(日常的に)容易に正確に測れる。もし、観測されていない再結合に

よってセルが過剰エネルギーを出しているように見えたら、セルに添加する重水の量が少なくなるわけだ。研究者はこれに気が付くか過剰充填をする。⁴

FPE 実験では、エネルギー非過剰が長期間にわたって起こるし、多種多様なエネルギー入力があって過剰熱がない場合が多いので詳細なエネルギー・バランスを計算することが複雑になることがある。バランスの計算は絶対的な統計的な確実性で達成されてきた研究結果があるけれども、初期の結果はあまり満足できなくて、（例えば）この効果が有用なエネルギー源になるという印象を与えない。エネルギー・バランスのこの疑問は[5,10,12-14]多くのコメントがあったが、実験 L64 [17]によってエネルギーテック社の研究者たちが圧倒的にその疑問を解決した。この実験その物は比較的短時間で済んだ。過剰熱のバーストが始まる前の時間が殆どなかった。出力（パワー）は、入力よりも際立って大きかった。出力エネルギーは、電気として消費したエネルギーよりも著しく多かったので、この結果は説得力がある。このプロセスにおけるエネルギー貯蔵の時間がなかった。

エネルギーテック社の実験 L64 は ENEA（フラスカティ）のパラジウム、長さ 80 mm、幅 7 mm、厚さ 50 μm 箔を使って、同社の SuperWave™電流刺激で、実験の最初の 20 時間に、刺激の入力の電気力が 1 W 以下だったのに対して、最大過剰熱は二回も >34 W を超えた。パワー・バランスよりエネルギー・バランスがさらに驚くべきことに最初の 20 時間での入力エネルギーが 40 kJ で出力が 1.14 MJ のうち、過剰熱が 1.1 MJ となった。入力の電気力よりも 27.5 倍の熱エネルギーが出てきた。この最初の熱のバーストのエネルギーだけを計算すれば 4.8 KeV/Pd 原子となるので、既知の化学によって説明できるエネルギーより数千倍多い。20 時間経ってから、二番目の熱のバーストが起きて電解液を沸騰させた。二番目のバーストは少なくとも 3.5 MJ を発生して、⁵バースト 1 と 2 の合計は 20 KeV/Pd 原子以上となる。エネルギーテック社は、やや、これほど印象的ではないが、似ている結果をいくつか他に得ている。

⁴開放電気化学セルを補充（再充填）するのに必要な水の量を容易にかつ正確に流れた全電荷量から、電解によって消費される化学種のモル数に関するファラデーの法則を用いて計算できる。

⁵エネルギーの合計に重水の気化熱は含まれていなかったから、過小評価である。

「核反応の生成物が見つからない」

最初は「実質は何か？」という調子の避難として、「核反応の灰がないじゃないか？」とはよく聞かれた。生成物はあるはずだし、あれば簡単に観察できるし、ましてその生成物は危ない放射線も含む筈だ。⁶それが全然ないから、FPEの存在を否定するのだった。SRIで我々は核生成物質と灰を非常に広い範囲で検索するために様々なレベルで努力してきた。

いくつかの顕著な批判と続いてコメントは以下に記載されている。

1. 熱発生に伴うと予想される高エネルギー放射線がない。
2. 観測された核反応生成物は過剰熱を十分説明できない。
3. ヘリウム (^4He) は定量的な生成物と思われているが、次の問題があると主張される：
 - a. ヘリウム生成は理論的に不可能
 - b. 測定が困難
 - c. 十分な量は見つかっていない

第一の質問は、最初に、そして最も直接的に、[18]1989年にジュリアン・シュウインガーが答えた。「熱核融合の状況は、常温核融合の状況とは違う」。これによって、彼は、Pd(D)量子干渉性超構造では、反応機構、速度、および生成物の分岐比が変化すると予想され得ることを示唆した。現在では、多くの提案が活発な議論されており、[1つ提案された経路は 19,20 を参照]重要な進展がみられるが、どのような物理的メカニズムが効果の原因なのか、意見は一致していない。したがって、何が生成物としてあり得るのか曖昧だが、仮定された生成物が観測されていない事を理由として、FPEの存在を否定する合理的な根拠はない。

FPEの反応のいくつかの核生成物は定量性は不十分だが、明らかに過剰熱を伴う。トリチウムとヘリウム3は、FPE実験の特別な状況下で、過剰熱と非同期に現れる生成物だ [5]。ある研究所からは、過剰熱を十分に説明できるほどの「大規模な核変換の量」が観測された（またはそれを満たす以上の量）と報告されているが [5];これらはまだ検証する必要がある。

以前から SRI では、熱反応と定量的に釣り合う生成物は ^4He で、高エネルギーの副産物は殆ど発生しないという仮説を検証するための実験を行ってきた。ところで、この

⁶ 「核反応の灰」における「灰」とは、化学反応の灰と比べた技術的に不正確な類推だ。化学燃焼では、灰が反応に関与しない残りの材料である。不揮発で酸化された酸化物の残りである。常温核融合の分野の用語では、「核反応の灰」とは、反応生成物を意味するようになってきた。これは間違っていて、「灰」のような化学燃焼生成物の CO_2 と H_2O を記述するのと同じことになってしまう。このようにして、常温核融合のヘリウムは、時々「核反応の灰」と呼ばれているが、核反応生成物と呼ぶ方が正確だろう。

仮説の出どころは SRI ではなかった。早くも 1991 年にマイルズとブッシュ[21]が独自の自己洗浄式のヘリウム収集システムを開発した。電気分解の排ガス D_2 と O_2 を使用してセルから大気へのヘリウムを除外した。彼らは、熱とヘリウム生産の相関関係がランダムな結果であった可能性を 1:750,000 の確率と計算し、どうみても議論の余地がない。

マイルズとブッシュはまた、初期に非常に印象的な定量化された反応の Q 値を得た。総合的に反応は $d + d \Rightarrow {}^4\text{He} + 23.8 \text{ MeV}$ (格子) のようなものなら、反応はヘリウム原子を $2.5 \times 10^{11} {}^4\text{He s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ の率で発生する。マイルズとブッシュは、これと比較して平均 $1.4 \pm 0.7 \times 10^{11} {}^4\text{He s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ を観測したので、仮定値の 54% だった。後で SRI でブッシュがこの結果を再現した研究[22]では、平均 $1.5 \pm 0.2 \times 10^{11} {}^4\text{He s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ (「予測値」の 58%) を測定した。

他に多くの研究者は気相の ${}^4\text{He}$ を FPE による熱発生と同時に、または熱発生の直後の ${}^4\text{He}$ に測定したことがある[5]。一般的に、測定されたヘリウムの量は D + D 反応で発生する予測の総量⁷の 50% から 75% である。⁸ この結果は重要な実験と理論に対する疑問を促す。「見つからなかったヘリウムがあるだろうか？」あるとすれば、「なぜ見つからないか？」仮に反応が予測された通りのものだとすれば、反応が Pd 陰極表皮層で発生した場合、 ${}^4\text{He}$ の約半分は陰極から外へ出てきて、もう半分は中へより深くもぐって、金属格子に閉じ込められると推定する。この仮説に説得力を与えた結果がある。15 の研究では、FPE のエネルギー生産後の陰極の金属の中に予想外の ${}^4\text{He}$ を発見した。しかし、いかなる実験でも、気相ヘリウムの欠乏を説明できるほどの閉じ込められた ${}^4\text{He}$ 量は測定されていない。

${}^4\text{He}$ の行き先を考える時には、FPE 陰極の表面は、実験以前にパラジウムが十分に結晶化されていたとしても、過剰熱を発生した後は十分には結晶化されていないことを覚えておくべきだ。電解後の陰極表面は、例えば、LiOD の場合だと相当量の Li が組み込まれるし、電気的活性のある金属表面は、数ミクロンの厚さの層で覆われる。この層は、電解質の要素、あるいは、セルの壁や両電極や他の部分から偶然に浸出した元素 (または意図的に加えられた元素) からできた水酸化物である。特にこの「泥」の層は ${}^4\text{He}$ の放出を抑制または遅延させるので、正確な質量収支を測定するには、この層を壊す仕事が必要だと予測するのが妥当である。ヘリウムを 100% 回収するのは不可能だか

⁷マイルズとブッシュのある初期の実験では、 ${}^4\text{He}$ を $2.5 \times 10^{11} {}^4\text{He s}^{-1} \text{ W}^{-1}$ の率より多く測定していたが、実験誤差[23]に起因すると判断した。公開された文献では DeNinno とその共同研究者のみが、量的に十分な ${}^4\text{He}$ の証拠[24]を公表している。

⁸局所エネルギーと角運動量の保存に関する理由により、これは正味のプロセスであっても、この反応が、他の物質と関係しない単一ステップで発生するものではないことは明らかである。しかし、熱力学は経路独立であるので、経路を知らなくても、正確に全体的な発熱プロセスのエネルギーが計算できる。

ら、この質量収支は全体量を過小評価することになるが、回収技術の向上に伴って漸近的に真の質量収支に近づくだらう。

財源の制約から、ヘリウム漏れのない熱量計で、セル体積の中[に残されたヘリウムを中]から（何らかの手段で） ${}^4\text{He}$ を捕捉する[セルから除去する]発熱の実験に成功した例は2つしかない。一つはSRI[25]で、もう一つはENEA（フラスカティ）[15]で行われて、両方とも、 $2.5 \times 10^{11} {}^4\text{He S}^{-1}\text{W}^{-1}$ の約±10%内で、 $\sim 24 \text{ MeV}/{}^4\text{He}$ のQ値の反応で ${}^4\text{He}$ が生成されたとする説を支持する。これは検証すべき重要な結果である。

5. まとめと結論

ここで提示した証拠と論議、そしてはるかに広範囲をカバーして説得力のある別の本と論文[5,10]に基づいて、フライシュマン・ポズ効果は物理学の新たな効果であることは明らかである。新しいメカニズムの記述と説明が必要だ。この新しい効果は、解明を待っている数多くの他の凝縮物質の核プロセスに関係している可能性が非常に高い。

効果が一旦解明されれば、まったく奇妙に見えなくなるだろう。きっと明白に見えて、振り返ってみると、初めからずっと分かっていたはずだと思うだろう。これは熱を発生する反応で、化学反応ではなく核反応と合致し、時間的にも定量的にも熱が ${}^4\text{He}$ の生成に伴う反応だ。この新しいフライシュマン・ポズ効果とは核反応の「灰」を伴っており、特に ${}^3\text{H}$ と ${}^3\text{He}$ が重要だ。他の同位体が存在する強力な証拠も存在している[5];他も続いて出てくるかもしれない。

どのように進歩させれば良いだろうか？ 主に理論を通じて進歩させるべきだ[と思う]：定量的な予測ができる基本的な物理学的な説明を求めるべきだ。科学的方法によって最適に進歩できるだろう。そのためには、より広範な科学界と付き合う必要がある。私たちは、城壁の中に安心して座って閉鎖的な集団で話し合いをするだけではどうにもできなくて、より広範な科学界に熱意を引き起こさなければならない。このICCF15会議の主催者は、その必要性を認識し、そのプロセスを促進したことに対して賞賛されるべきだ。

進歩させるもう一つの方法は、製品を開発する事だ。ここでは、本当の意味で「代替」可能なエネルギーに対して高まりつつある公的および政治的な関心を利用できるかもしれない。FP効果は、実際に有用なエネルギーを生成する。エネルギーテク社の実験L64のセルは、単一のバーストで、電力としてセルに入れたより25倍以上の熱を発生した。この熱は、水を沸騰させるのに十分な温度だった。このような効果には、実用的な価値がある。言うまでもないことだが、実験を製品にして市場に売り出すまでには、明らかとは言えないステップをいくつか必要とする。しかし、このようなプロジェクト

によって、科学理論を解明しない内に FP 効果の工学的な理解を得る有効な手段になるかもしれない。

謝辞

この序文に要約した実験結果や考察に特に貢献してくれた SRI チーム以外の 4 名の方々に感謝したい。Peter Hagelstein と Jed Rothwell は重要な概念の開発と用語を評価してくれた。Vittorio Violante と Irving Dardik は優れた技術革新材料の処理と FPE (やその他の効果) のプロセスの動的特性の基礎的な理解に貢献して、この分野の進歩を支えてきた。

文献

1. M. Fleischmann, S. Pons and M. Hawkins, *J. Electroanal. Chem.*, **201**, p.301 (1989); Errata, **263**, p. 187 (1990). See also M. Fleischmann, S. Pons, M.W. Anderson, L.J. Li and M. Hawkins, *J. Electroanal. Chem.*, **287**, p. 293 (1990).
2. K. Kunimatsu, N. Hasegawa, A. Kubota, N. Imai, M. Ishikawa, A. Akita and Y. Tsuchida, “Deuterium Loading Ratio and Excess Heat Generation during Electrolysis of Heavy Water by a Palladium Cathode in a Closed Cell Using a Partially Immersed Fuel Cell Anode”, in **Frontiers of Cold Fusion**, H. Ikegami, Ed., proceedings of the 3rd International Conference on Cold Fusion, Nagoya, Japan, p. 21, October 1992.
3. M.C.H. McKubre, S. Crouch-Baker, A. M. Riley, S. I. Smedley and F. L. Tanzella, “Excess Power Observations in Electrochemical Studies of the D/Pd System; the Influence of Loading”, in **Frontiers of Cold Fusion**, H. Ikegami, Ed., proceedings of the 3rd International Conference on Cold Fusion, Nagoya, Japan, p. 5, October 1992.
4. M.C.H. McKubre, “Excess Power Observations in Electrochemical Studies of the D/Pd System; the Operating Parameter Space”, submitted for publication in proceedings of the 15th International Conference on Cold Fusion, Rome, Italy, October 2009.
5. E. Storms, **The Science of Low Energy Nuclear Reactions**, World Scientific, Singapore, 2007.
6. N.S. Lewis, C.A. Barnes, M.J. Heben, A. Kumar, S.R. Lunt, G.E. McManis, G.M. Miskelly, R.M. Penner, M.J. Sailor, P.G. Santangelo, G.A. Shreve, B.J. Tufts, M.J. Youngquist, R.W. Kavanagh, S.E. Kellogg, R.B. Vogelaar, T.R. Wang, R. Kondrat, and R. New, *Nature*, **340**, 525 (1989).
7. D. Albagli, R. Ballinger, V. Cammarata, X. Chen, R.M. Crooks, C. Fiore, M.P.J. Gaudreau, I. Hwang, C.K. Li, P. Linsay, S.C. Luckhardt, R.R. Parker, R.D. Petrasso, M. O. Schloh, K.W. Wenzel, and M.S. Wrighton, *J. Fusion Energy*, **9**, 133 (1990).
8. J.W. Fleming, H.H. Law, J. Sapjeta, P.K. Gallagher, and W.F. Marhon, *J. Fusion Energy*, **9**, 517 (1990).
9. M.C.H. McKubre, F. L. Tanzella, P. Tripodi and V. Violante “Progress towards replication”, in The 9th International Conference on Cold Fusion, Condensed Matter Nuclear Science. 2002. Tsinghua Univ., Beijing, China, X. Z. Li Ed., Tsinghua Univ. Press.
10. P.L. Hagelstein, M.C.H. McKubre, D.J. Nagel, T.A. Chubb, and R.J. Hekman, “New Physical Effects in Metal Deuterides”, Proceedings of the 11th International Conference on Cold Fusion, Marseilles, France, November 2004, J.P. Biberian Ed., World Scientific, p. 23 (2006).
11. M.C.H. McKubre, “The Importance of Replication”, accepted for publication in proceedings of the 14th International Conference on Cold Fusion, D.J. Nagel Ed., Washington, D.C., USA, October 2008.
12. M. C. H. McKubre, F. L., Tanzella, I. Dardik, A. El Boher, T. Zilov, T., Greenspan, C. Sibilina, and V. Violante, “Replication of Condensed Matter Heat Production”, in **Low-Energy Nuclear Reactions Sourcebook**, J. Marwan Ed., ACS Symposium Series 998, Oxford University Press, 2008, p. 219.
13. M. C. H. McKubre, and F. L. Tanzella, “New Physical Effects in Metal Deuterides”, Final Report on DARPA contract HR0011-05-C-0089, SRI Project P16816, 2006.
14. R. Garwin in CBS newsmagazine *60 Minutes* report on cold fusion "COLD FUSION IS HOT AGAIN", April 19, 2009. <http://www.cbsnews.com/stories/2009/04/17/60minutes/main4952167.shtml>

15. M. Apicella, E. Castagna, L. Capobianco, L. D'Aulerio, G. Mazzitelli, F. Sarto, A. Rosada, E. Santoro, V. Violante, M. McKubre, F. Tanzella, and C. Sibilìa, "*Some Recent Results at ENEA*", Proc. 12th International Conference on Cold Fusion, Yokohama, 2005, Ed. A. Takahashi, K. Ota, and Y. Iwamura, World Scientific; page 117.
16. M.C.H. McKubre and F. L. Tanzella, "*Mass Flow Calorimetry*", accepted for publication in proceedings of the 14th International Conference on Cold Fusion, D.J. Nagel, Ed., Washington, D.C., USA, October 2008.
17. I. Dardik, T. Zilov, H. Branover, A. El-Boher, E. Greenspan, B. Khachaturov, V. Krakov, S. Lesin and M. Tsirlin, "*Excess Heat in Electrolysis Experiments at Energetics Technologies*", Proceedings of the 11th International Conference on Cold Fusion, Marseilles, France, Nov. 2004, J.P. Biberian Ed., World Scientific, p. 23 (2006).
18. J. Schwinger <http://www.lenr-canr.org/acrobat/SchwingerJcoldfusiona.pdf>
19. P.L. Hagelstein and I.U. Chaudhary, "*Excitation transfer and energy exchange processes for modeling the Fleischmann-Pons excess heat effect*", submitted for publication in proceedings of the 14th International Conference on Cold Fusion, D.J. Nagel, Ed., Washington, D.C., USA, October 2008.
20. P.L. Hagelstein and I.U. Chaudhary, "*Energy exchange using spin-boson models with infinite loss*", submitted for publication in proceedings of the ACS Symposium on New Energy Technology, San Francisco, March, 2010.
21. M. H. Miles, B. F. Bush, G. S. Ostrom and J. J. Lagowski "*Heat and Helium Production in Cold Fusion Experiments*", in Second Annual Conference on Cold Fusion, "**The Science of Cold Fusion**", 1991, Como, Italy: Societa Italiana di Fisica, Bologna, Italy.
22. M.C.H. McKubre, S. Crouch-Baker, A. Hauser, N. Jevtic, S. I. Smedley, F. L. Tanzella, M. Williams, S. Wing, B. Bush, F. McMahon, M. Srinivasan, A. Wark and D. Warren "*Energy Production Processes in Deuterated Metals: Volume I*", EPRI, Palo Alto, CA, TR-107843-V1, 1998.
23. M. H. Miles, "*Correlation of Excess Enthalpy and ⁴He Production: A Review*", Proceedings of the 10th International Conference on Cold Fusion, Cambridge, MA, USA, August 2003, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb, Eds., World Scientific, (2006).
24. A De Ninno, A. Frattolillo, A Rizzo and E. Del Guidice, "*⁴He Detection in a Cold Fusion Experiment*", Proceedings of the 10th International Conference on Cold Fusion, Cambridge, MA, USA, August 2003, P. L. Hagelstein and S. R. Chubb, Eds., World Scientific, (2006).
25. M.C.H. McKubre, F. L. Tanzella, P. Tripodi and P. L. Hagelstein "*The Emergence of a Coherent Explanation for Anomalies Observed in D/Pd and H/Pd System: Evidence for ⁴He and ³He Production*", in 8th International Conference on Cold Fusion. 2000. Lerici (La Spezia), Italy: Italian Physical Society, Bologna, Italy.