

フライシュマンとポンスの熱量測定

ジェド・ロスウェル (Jed Rothwell)

LENR-CANR.org

2020 年 8 月、改正 2020 年 10 月

English version: <https://www.lenr-canr.org/acrobat/RothwellJreviewofth.pdf>

概要

これはフライシュマン (Fleischmann) とポンス (Pons) による実験での熱量測定の紹介である。彼らは 1989 年から 1993 年まで、熱量測定の 3 つの方法を利用した一連の論文を発表した。等周温熱量測定、相変化、冷却曲線分析だ。これらの実験は、セルが 100 W を超える過剰熱を生成し沸騰して、その後、入力電力なしで数時間高温にとどまる実験で最高潮に達した。1996 年に、ポンスは別の一連の実験を報告した。この実験では、還流熱量計を使用して、最大 101 W の反応が最大 70 日間継続的に持続した。

この紹介は一般読者向けである。等周熱量 (isoperibolic)、相変化、その他の熱測定の方法の定義や、校正の実行方法、およびフライシュマンとポンスの機器と方法の高度な機能のいくつかについて説明する。

一部の懐疑論者は、熱量測定が信頼できないから物議を醸していると主張する。懐疑論者の異議を検討する。

熱量測定はこの実験の中心である

熱量計は熱を測定する機器である。熱を測定するさまざまな異なる方法を含む熱量測定は、常温核融合の研究に不可欠である。

熱量測定がなぜそれほど重要だろうか？なぜなら、フライシュマンが言ったように「熱はこの反応の主要な特徴である」からだ。熱を検出しない場合は、常温核融合反応はおそらく起こっていない。原則常温核融合の核製品がヘリウムだ。ヘリウムの量は少なく、検出が困難である。¹ 常温核融合が放射能を発生することはめったにない。

これはプラズマ核融合とは全く異なる。典型的な常温核融合実験と同じくらいの熱を生成するプラズマ核融合反応は、遮蔽されていない観測者を殺してしまうほど多くの透過放射線も生成する。したがって、放射線検出器を使用した確認は、熱量計を使用し

¹ DD 反応では 1 g の重水素を融合すると、345,000 MJ の熱が発生する。ヘリウムはいくつかの研究で確認されている。非常に少量だし、ヘリウムは大気中に遍在しているため、確認しにくい。

た場合よりも数百万倍も簡単である。これは懐疑論者によって最初の異議であり、未だにそれは最も一般的なものである。以下で説明する。

熱は常温核融合にとって最も重要であるもう一つの理由がある。常温核融合は熱そのものがこの反応が化学反応ではなく核反応であることの証拠である。熱は、「過剰熱」または「過剰エンタルピー」と呼ばれる。電気化学の手法で常温核融合をおこすと、通常、ある程度の入力電力があり、出力熱が入力を超えるから「過剰熱」と呼ぶ。場合によっては、入力電力はなく、出力熱のみもある。

フライシュマンとポンスが最初の論文で指摘したように、この反応は容積あたりのエネルギー出力がどの化学反応よりもはるかに多い。

エンタルピーの生成は、パラジウム電極の 10 W cm^{-3} を超えることがある。これは、120 時間を超える時間維持され、その間、 4 MJ cm^{-3} を超える電極体積の熱が放出された場合がよくある。これが核プロセス以外の原因である可能性があるとは考えられない。[1]

石油は一般的な化学物質の中で最も熱を発する。熱量は 0.034 MJ/cm^3 である。² つまり、最初に報告された常温核融合実験では、同じ体積の化学燃料の 118 倍の熱が発生した。³ その後の実験では、最大 300 MJ が発生した。これは、化学反応の約 10,000 倍のエネルギーであって、言い換えれば実験装置が置かれているテーブルを燃やした場合と同じくらいの熱量だ。⁴ 常温核融合は化学反応よりもはるかに多い熱量を生成するだけでなく、セル内に化学燃料がなく、実験が始まるときに重水素化物を形成する以外に化学変化は起こらない。この水素化物にはごくわずかな位置エネルギーしかない。

ある批判者は、熱の測定は核反応を検出する有効な方法ではないと主張する。これは誤りだ。この人々は、粒子検出器を使用する現代の方法に慣れている。放射能が熱量測定で最初に探求されたことを忘れている。フライシュマンは、次のことを指摘した。キュリー夫妻を含む当時放射線を研究している科学者はラジウムからの熱は化学の限界を超えていて、ラジウムには化学変化が全くないため、これは化学反応ではないと分かった。マリー・キュリーは、次のように説明した：

ラジウムは、自発的そして継続的に熱を放散するという驚くべき特性を持っている。ラジウムの固体の塩は、塩に含まれるラジウムのグラムごとに 1 時間あたり 100 カロリーの放出があるほどの量の熱を発生させる。言い換えれば、ラジウムは氷の中に置かれたら 1 時間でそのラジウムと同じ重さの氷を溶かす。ラジウムがこ

² 石油の燃焼に必要な酸素を無視しているため、1 立方センチメートルあたりのエネルギーが低下する。石油は 44 MJ/kg を発生して、密度は 0.78 g/cm^3 である。特殊なロケット燃料は最もエネルギー密度の高い化学物質だが、石油はこれに近い程度グラムあたりのエネルギーを生成する。

³ 常温核融合は質量あたりで測定するとさらに多いが、これは複雑だ。パラジウムは反応に関与しない。変更がない。パラジウムの中の重水素は融合してヘリウムになる。上記で述べたように、最良の推定では、プラズマ核融合と同じ量の熱が生成される： $345,000 \text{ MJ/g}$ 。重要点は、非常に小さい物体は、化学反応よりもはるかに多くの熱を生成する。数週間燃えるマッチのよう物だ。

⁴ テーブル全体ではない。参照 [5] は、158 日間で 294 MJ を生成した実験について報告した。29 kg の木を 29 kg 燃やして発生する熱量だ。木製の実験台の重量は約 36 kg である。

のように継続的に作用することを熟考すると、既知の化学反応では説明できないため、生成される熱の量に驚かされる。ラジウムは明らかに変化していない。したがって、それが変換を受けると仮定する場合、その変化は非常に遅いと結論付けなければならない。1時間以内に、既知の方法で変化を検出することは不可能だ。

ラジウムは熱を放出するため、常に周囲よりも高温になる。ラジウムが熱を失うのを注意深く防げば、温度計でこの現象を確認できる。－ センチュリー誌、1904⁵

熱量計自体も実験に不可欠な部分であるため、熱量測定は常温核融合を行う際に理解しておくべき重要な課題である。反応を増強する、または阻害する役割を果たす。パラジウムで電気化学常温核融合実験は成功のカギは適切な種類のパラジウム材料を用意し、それを正しく準備し、重水素の吸収比を高くするだ。[2] これらのことを習得し、反応を引き起こすことに成功すると、多くの場合、温度を上げることでそれを後押しできる。より高い温度を可能にする目的で設計された熱量計が必要だ。ところが、ある熱量計の種類、特に等温タイプは、温度が上昇しないように働き、反応を抑制してしまう。ゆえに、フライシュマンとポンスが重要であると考ええる正帰還増幅 (positive feedback) も抑制してしまう。

熱量測定の方法

最初の実験では、フライシュマンとポンスは等周熱量測定を行った。(等周熱量測定、isoperibolic calorimetry、は以下に詳しく定義する。)

その後、別の一連の実験で、熱が十分に確立されてから、電解力に増加して、はるかに高い熱が発生させた。これにより、セル内の水が約 20 分で蒸発し、セルが乾燥したままになる。この実験で熱量測定を次の 3 つの方法を行った：

1. 水が沸騰前に等周熱量測定。
2. 水が沸騰している間に相変化熱量測定。
3. 水が全部蒸発した後に冷却曲線分析。

数年後、ポンスは連続沸騰を伴う等周逆流熱量計を開発した。

フライシュマンとポンスはこれらの方法を多くの論文で発表した。等周熱量測定の方法についての論文：

⁵ 「1時間でそのラジウムと同じ重さの氷を溶かす」とは相変化氷熱量測定を意味する。キュリーがエネルギーをラジウム 1 グラムあたり 100 カロリー/時間と決定した方法だと思う。100 カロリー/時間は 0.116 W (116 mW) である。サンプルは 0.129 g の塩化ラジウム (RaCl₂) で、76 重量%のラジウム (0.1 g のラジウム) だから 12 mW となる。キュリーはそれが 1 時間あたり ~0.1 g の氷を溶かすのを観察したと私は思う。それは 33 J、または $33 \text{ J} / 3600 \text{ s} = 0.009 \text{ W}$ (9 mW) となる。懐疑論者は、そのようなミリワット程度の熱は測定できないと主張することがあるが、1898 年にキュリー夫婦や他の有能な科学者が自信を持ってこれを測定できたことを疑う人はいない。当然のことながら、常温核融合の熱を測るときしばしば装置に入力電力が加えられるが、入力電力は非常に正確に測定され、常温核融合の発生熱からは差し引かれる。

参照 [3] Fleischmann, M., et al., [*Calorimetry of the palladium-deuterium-heavy water system*](#). J. Electroanal. Chem., 1990. 287: p. 293.

相変化つまり沸騰した実験について説明する論文：

参照 [4] Fleischmann, M. and S. Pons, [*Calorimetry of the Pd-D₂O system: from simplicity via complications to simplicity*](#). Phys. Lett. A, 1993. 176: p. 118 ⁶

(以下、この論文を度々参照するので題を略して「簡単な方法」と呼ぶ)

蒸発後に使用される冷却曲線方法の詳細はこちら：

参照 [5] Pons, S. and M. Fleischmann. [*Heat After Death. in Fourth International Conference on Cold Fusion*](#). 1993. Lahaina, Maui: Electric Power Research Institute 3412 Hillview Ave., Palo Alto, CA 94304

連続沸騰の等周還流熱量計：

参照 [6] Roulette, T., J. Roulette, and S. Pons. [*Results of ICARUS 9 Experiments Run at IMRA Europe*](#). in Sixth International Conference on Cold Fusion, Progress in New Hydrogen Energy. 1996. Lake Toya, Hokkaido, Japan: New Energy and Industrial Technology Development Organization, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.

「逆流」とは、水蒸気が冷却され、凝縮されて水になり、セルに戻ることを意味する。

フェーズ 1 で使用される等周熱量測定

フライシュマンとポンスは、主に等周熱量測定を行った。第一近似⁷では、この方法は、狭い温度範囲で安定した反応に適用すると、理解しやすい。ところでフライシュマンとポンスがそれをはるかに困難で複雑な反応で使用したことに注目していただきたい。彼らには複雑にする理由があった。

等周熱量計とは、通常、水で満たされたセル（試験管）である。図 1 は、フランスの IMRA 研究所でフライシュマンとポンスによって開発された「イカルス号」のセルを示している。フライシュマンは、このセルを 1 つ日本の札幌新水素エネルギー（NHE）研究所に、その使用方法の詳細な説明とともに届けた。マイルズ（Miles）は後にこの研究室の客員研究員になり、このセルを実験に使用した。結果は、マイルズ、フライシュマン、およびイマム（Imam）によって分析された。[7-9]

⁶ ここにリンクされた論文のバージョンは、ICCF-3 の議事録で出版された。内容は Phys. Lett. A と同じだ。

⁷ 複雑な解析を容易にするため単純化する方法。

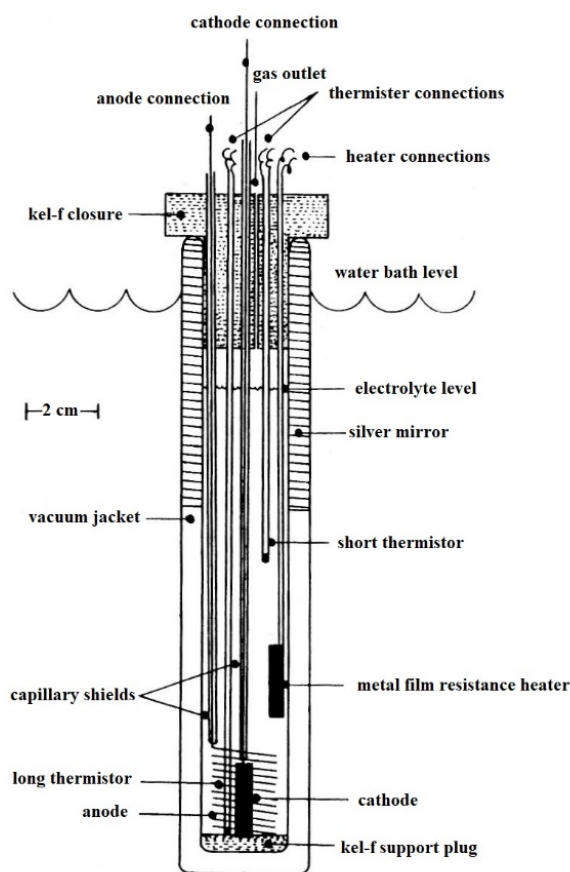


図 1. ICARUS- 2 フライシュマンとポンスが使用した等周熱量計のセル。上部の真空ジャケットの内側に銀メッキの鏡があり、下部に透明なガラスがある。この図はおおよそその縮尺。参照[10]から

熱を測定するには、まず校正から始める。セルに電気ヒーターを入れ、固定電力レベルにして、セルが到達する温度を確認する。その後、重水電解液にパラジウム陰極を入れる。校正中に、同じ電力レベルでセルがより熱くなるかを確認する。もしそうなら、それは常温核融合にとって過剰熱が発生している。セルは通常、恒温水槽に入れられるか、場合によっては温度制御された空気中に置かれる。フライシュマンとポンスは、しばしば「ブランク・テスト」と呼ばれる電気分解の対照実験を行った。⁸ パラジウムの代わりに白金電極を重水で試して校正した。[11] 白金は常温核融合を起こさない。

図 3 は、単純な熱量計のデーターを示している。周囲の空気で冷却する試験管（セル）である。試験管には、水、抵抗ヒーター、およびサーミスタ温度計がある。（参照付録 A.）セルと周囲の空気と同じ温度で開始。ヒーターは、電力の 1.1 W でオンになっている。実験が始まってから約 140 分後にセルの水の温度は上昇して横ばい状態に達

⁸ 対照実験（control experiment）では条件を変えて現象が起こらないようにする。「変える」と言っても変化を少なくして、なるべく本実験に近い状況にする。

する。その安定した時には、周囲の空気（右軸）よりも 4.5°C 暖かい。200 分で、電力を 1.7 W に増加し、温度は 270 分にセル内の温度は外気より 7.2°C 高くなる。

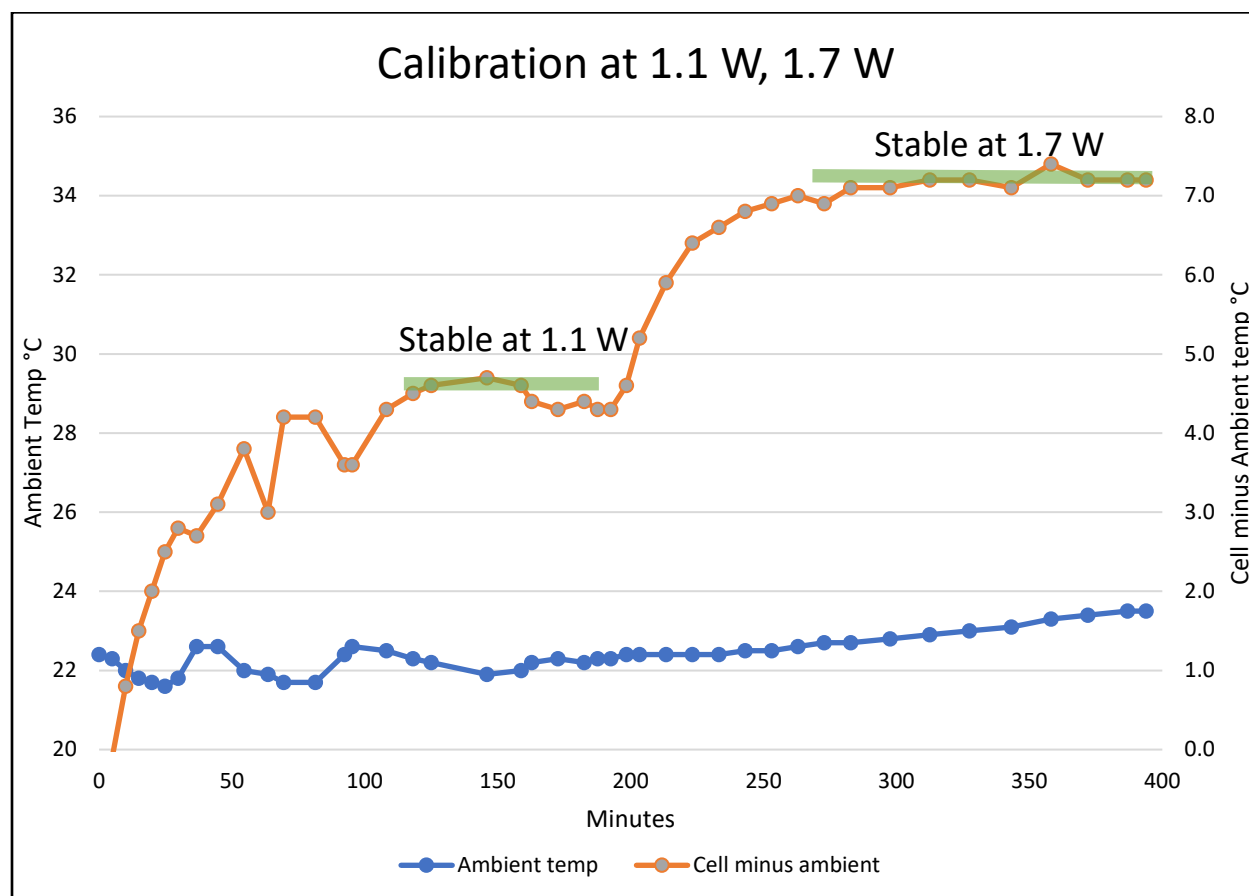


図 2。1841 年に行った有名な実験のシミュレーション。（付録 A） 制御されていない周囲空気中の原始的な熱量計での 1.1 W および 1.7 W での校正。

4.5°C と 7.2°C の安定した温度差が校正点だ。これらは、他のテストからの 3 つのポイントと合わせて、検量線（図 3）に追加される。検量線は線形で、両軸の原点 $(0, 0)$ を通る必要がある。それ以外の場合、熱量計に問題がある。

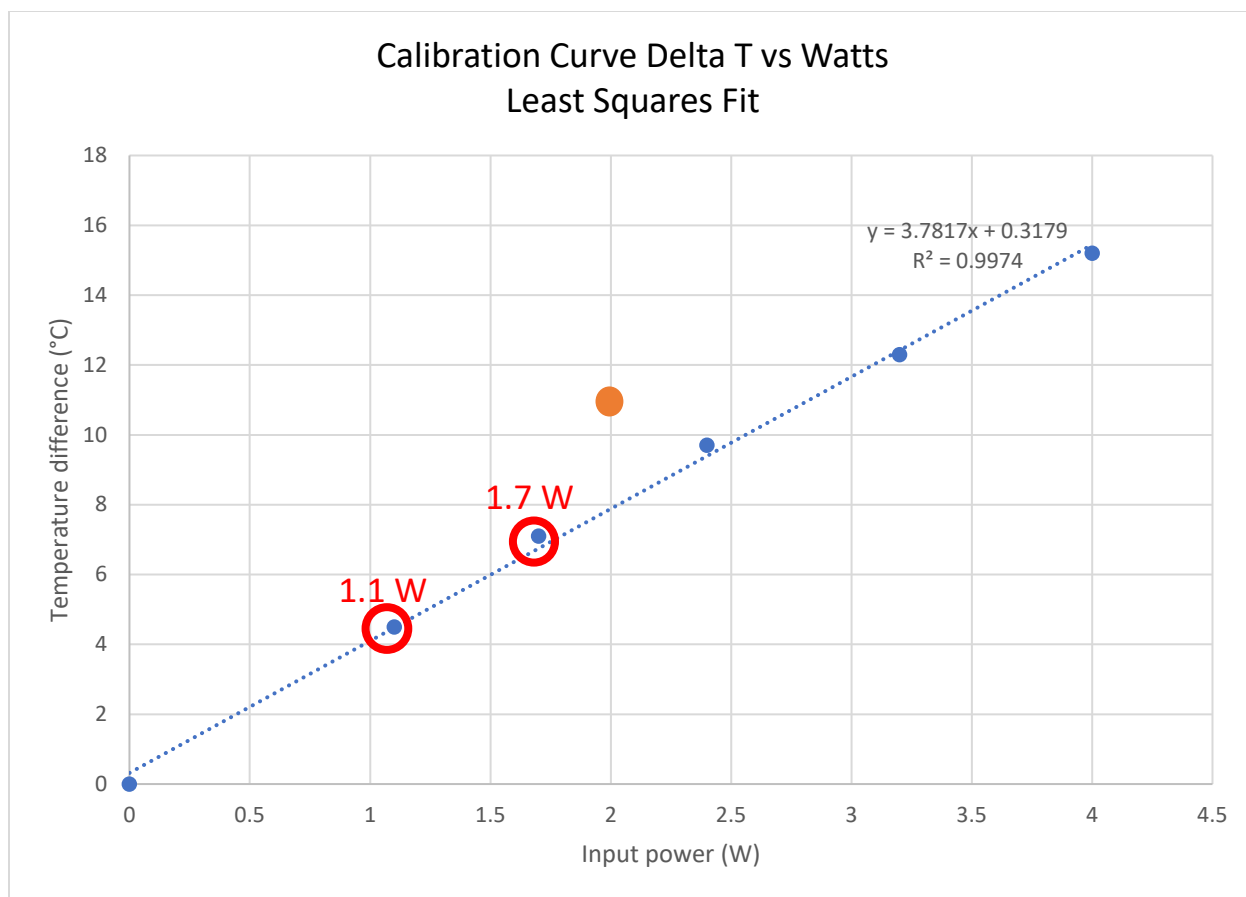


図 3。図 2 の 2 つのポイントと他のテストの 3 つの高いポイントを使用した検量線。● = 2.0 W の入力と 2.8 W の出力を使用した、検量線の上の架空の結果。0.8 W の過剰熱。グラフ提供 : D. Nagel、George Washington 大学

セルからの熱損失は、温度と出力レベルの範囲内で制御され、一貫している必要がある。適切に構成された熱量計では温度は $\sim 20^{\circ}\text{C}$ の範囲内では、応答は線形である。電力の 1 ワットごとに、温度は同程度に上昇する。検量線を書く (図 3)。熱伝達係数 (校正定数とも呼ばれる) を導出する。図 3 の場合、熱伝達係数は 1 ワットあたり 4.0°C 、または摂氏 1 度あたり 0.25 W である。例えば常温核融合試験中に 2.0 W を入力し、温度が 11°C 上昇するとする (図 3、オレンジ色の点) は検量線から離れた上部にある。熱伝達係数から、セルが合計 2.8 W ($11^{\circ}\text{C} \times 0.25\text{ W}/^{\circ}\text{C}$) を生成していることがわかる。つまり、 2.0 W の入力電力と 0.8 W の過剰熱がある。

各セルには異なる校正定数がある。定数は主にセルがどれだけ断熱されているかに依存する。断熱材が多いほど、熱 1 ワットあたりの温度変化が大きくなる。定数は、実験中に予想される熱の上下の範囲内を含む、いくつかの異なる入力レベルでの校正を行うべきだ。

適切に設計された熱量計は、同じ熱が入力されるたびに同じ温度に戻る。妥当な時間、おそらく 1 時間程度でその温度に達するはずだ。断熱性が高すぎるセルは、数時間または 1 日かかる場合があり、扱いにくい。校正と実験の両方に時間がかかりすぎる。

熱量計は、特定の範囲の入力と温度で機能するように設計される。その範囲より上または下では、正しく動作しない可能性がある。図4はマイルズからの曲線で、入力が予想される範囲（この機器では約 0.6 W）を下回る例を示している。より低い入力では、セルの蓋からの熱損失が多いので、曲線は急激に上がる。[12]

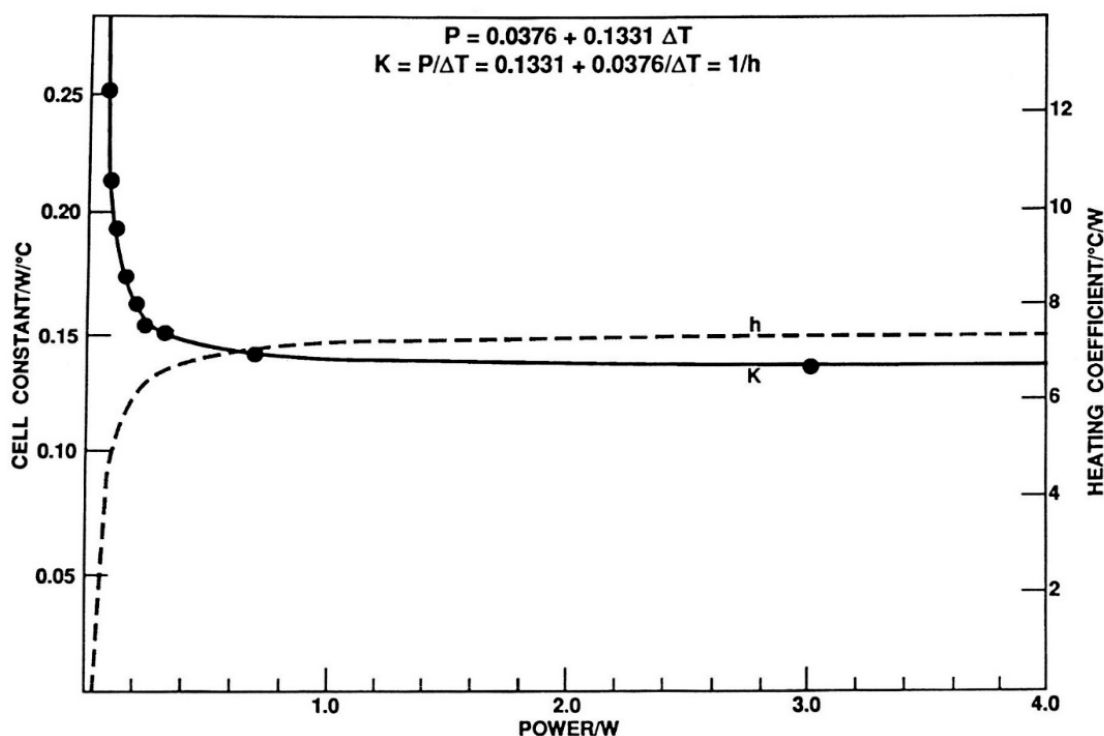


図4. 低い入力では蓋から熱の損失が多いのでこれまで一定を保っていた反応が急に上がる。K：見掛けのセル校正定数、h：熱伝達係数。

低い出力の場合に装置雑音も問題になることがある。0.1 W の差を測定できる熱量計でも、例えば 1.0 W と 1.1 W の差を確実に測定できても、雑音が干渉するため、0.0 W と 0.1 W の差を正確に測定できない場合がある。

要約するためにここでヘミンジャー (Hemminger) とホーン (Hohne) の教科書[13]から等周熱量測定 of 厳密な定義を紹介して、私のコメントを青色で加える。

「等周熱量」の測定という用語は、測定システムの温度が異なる可能性のある一定の温度環境での熱量計の使用を指す。測定システムと周囲の間の熱抵抗 (R_{th}) は、等温熱量計 (isothermal) では非常に小さく、等周熱量計では有限の大きさである。そして、断熱熱量計では無限に大きいため… 測定システムと周囲の間に定義された有限の熱抵抗 (R_{th}) が存在するため、熱交換は、 T_M [測定システムの温度] と T_F [セル外の周囲の温度] のみに明確に依存する。等周熱量計の操作では T_F は一定であるため、熱流束は T_M のみの関数になる。この関係は一般的に線形です。校正によって決定できる。注目すべき点は、平衡が確立されるまで、測定システム (T_M) の温度が周囲との熱交換によって変化することだ。この過程が済むまで、一定の時間間隔

が必要だ。一定の動作時間の後、測定システム（たとえば、長寿命の放射性サンプル）で一定の熱が発生すると、一定の温度 T_M が生じる…

つまり、サンプルが安定した熱量を生成する場合、測定システムの温度はしばらく上昇し、その後、平坦域に達する。校正中、この平坦域は1つのデータ点になる。

等周温の方法は、長寿命の放射性サンプルなどの安定した長期間の反応が効果的である。

断熱熱量計とは、断熱性の高いセルである。図3に示すように、熱流束は「一般に線形」だが、以下で説明するように、フライシュマンとポンの熱量計では線形ではない。

反応による熱は、セル内で可能な限り保持される。熱は、セルの中の物（水など）の比熱×温度上昇で測定する。セルはすぐに冷えるため、この手法は少量のサンプルの急速燃焼などの迅速な反応にのみ使用できる。これらの機器は、「爆弾熱量計」と呼ばれる。常温核融合反応が始まるまで数日、または数週間かかるため、断熱熱量計は使えない。

図3に示すように、熱流束は「一般に線形」だが、以下で説明するように、フライシュマンとポンスの熱量計は線形的ではない。

…正確な測定のために、熱損失をできるだけ低く保つことは絶対に必要というわけではない。それより重要なことは、これらの熱損失が繰り返して測っても、測定システム[セルの中]と周囲の温度差に依存することである。この場合、それらは（電力での）校正によって正確に決定できる。もちろん、熱損失が大きいと、熱量計の感度がかなり低下する。

私が上で説明したように、セルからの熱損失は、温度と出力レベルの範囲内で制御され、一貫している必要がある。「感度」とは、1ワットあたり1°C上昇する熱量計は、1ワットあたり5°C上昇する熱量計ほど正確には熱を測定できないことを意味する。

電気化学、デュワー容器

フライシュマンとポンスの等周熱量測定の詳細を説明する前に、この実験に関連する電気化学のいくつかの側面を紹介する。

常温核融合実験では、電気分解により重水⁹を分解する。重水素はパラジウムの陰極に行き、酸素は白金の陽極に行く。陰極は重水素を容易に吸収するが、白金は酸素をあまり吸収しない。重水素ガスと酸素ガスのほとんどが表面を泡立たせる。清涼飲料の小さな二酸化炭素の泡のように見える（図5）。

重水をリチウム塩と混合して導電性にする。この混合物は電解液と呼ばれる。



図5。ビベリアン（Biberian）とロンチャント（Lonchampt）による実験で電気分解を行っている「イカルス」号のセルのクローズアップ。ビベリアンの厚意による。

フライシュマンとポンスは、いわゆるオープン・セルを使用した。重水素と酸素の遊離ガスとしてセルから外気に出る。これにより、入力電力の一部が放出され、残りの電力は電解液を加熱する。総入力電解電力が $V \cdot I$ （電圧×電流）であり、重水電解の場

⁹ 重水は重水素からなっている水（ D_2O ）である。水素には陽子が1つしかない。重水素は、1つの陽子と1つの中性子を持つ水素である。三重水素（トリチウム）は2つの中性子を持つ水素だ。水素と重水素は安定している。三重水素は崩壊する。重水は地球上のすべての水の6000分の1である。普通の水より密度が高いため、純粋な重水を凍らせて普通の水に入れると沈む。ゆえに、「重水」と名付けられた。

合、セルの熱は $(V-1.54) \times I$ である。ここで、1.54 は重水の熱的中性電位だ。マイルズによる次の例がある：

総電力： $10.12 \text{ V} \times 0.50 \text{ A} = 5.06 \text{ W}$

セル内の加熱： $(10.12 \text{ V} - 1.54) \times 0.50 \text{ A} = 4.29 \text{ W}$

セルを離れる重水素および酸素ガスによって除かれた熱： 0.77 W

つまり、重水素と酸素ガスが燃料である。それらを燃やした場合、 0.77 W の熱を起こす。重水素ガス分子は空気中を漂流し、最終的に酸素と再結合して重水を形成し、熱を放出する。

ガスが連続的にセルから出るため、電解液の水位は徐々に低下する。フライシュマンとポンスは2日ごとに補給用の重水を補充した。リチウム塩はセルから出ないため、重水を追加するだけで済む。

電解液レベルの変化は、熱量測定に影響を与える可能性がある。フライシュマンとポンスは、この問題を回避する簡単だが巧妙なセルを開発した。それはデュワー瓶である。デュワーとはガラス製の魔法瓶（図6）で、ジャケットの壁の内側には銀の鏡でできた真空ジャケットが付いている。通常のデュワー容器は、等周熱量計には適していない。熱のほとんどが、壁から水槽に放射するのではなく、蓋から伝導してセルを離れる。これは予測不可能な非線形の熱損失になる。図1に示すように、フライシュマンとポンスは真空ジャケットの上部に銀メッキの鏡があり、下部に透明なガラスの「窓」がある特注装置のセルを使用した。銀メッキされた上の部分から放射される熱はほとんどない。大部分は、下の窓から放射される。電解液の水位が銀色の部分に限って上下する。窓の位置まで減少しない、水槽に放射するセルの壁の表面積は変化しない。

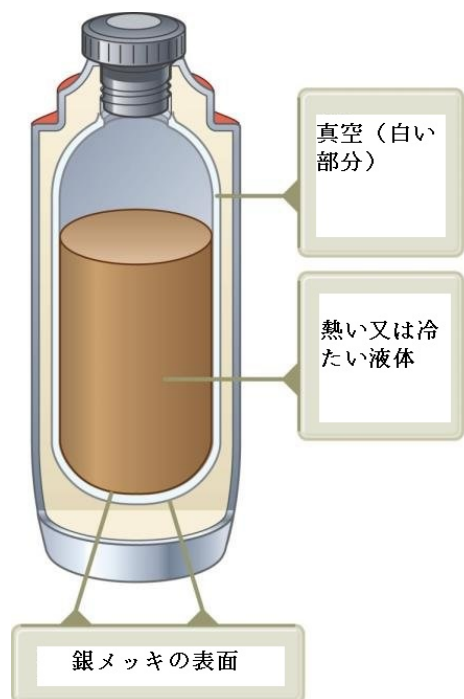


図 6. 魔法瓶ボトル（デュワー・フラスコ）、マリディ（Hassan Maridi）、ワルシャワ大学の厚意による。

事情が複雑になる

上で説明したように、等周温熱量測定的第一近似である。単純な変換係数に温度を掛けると、電力が得られる（この例では $0.25 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ）。教科書に書かれたように、これは、「長寿命の放射性サンプル」などの安定した定常状態の反応を、狭い温度範囲で測定するのに適した方法である。

ところで、私が警告したように、フライシュマンとポンスの実験では、物事はより複雑だ。彼らは、広範囲の温度にわたって動的に変化する反応を測定した。断熱性の高いセルを選択したため、大きな温度差が生じた。NHE の実験では、出力電力は $1\sim 5 \text{ W}$ （電解および常温核融合熱を含む）の範囲だった。これにより、セル温度が水槽の温度よりも約 $10\sim 40^\circ\text{C}$ 上昇した。応答は線形ではない。温度が高いほど、より多くの熱が生じて、下限は $0.095 \text{ W/}^\circ\text{C}$ から上限は $0.113 \text{ W/}^\circ\text{C}$ だった。これは、セルが下側の透明な窓を通してほぼすべての熱損失を輻射として導くように設計されており、表面からの輻射が温度の 4 乗であるステファン・ボルツマンの法則に比例するためである。

Stefan-Boltzmann 係数 \times 放射表面積 \times (ケルビン目盛りにおけるセル温度⁴ - ケルビン目盛り水槽温度⁴)

熱は 4 乗で増加するため、表面温度が少し上がると、それに比例してより多くの熱が放出される。それにしても、温度差が小さい場合はそれほど大きな影響はなく、単純な換算係数を使用できる。ただし、温度差が 40°C と大きい場合は、ステファン・ボルツマン係数を使う必要がある。

さらに、実際のセルでは教科書の係数をそのまま使うわけにいかない。状況はさらに複雑になる。完全な真空状態なら、100%の放射でのみ熱電する。しかし、セルを生産してから時間の経過とともに空気がデュワー真空に漏れ、熱の一部は放射ではなく空気を介した伝導によって失われる。マイルズが NHE で使ったセルは、約 4 年前のもので、真空が「柔らかい」状態だった（空気が少し中に漏れていた）。彼は校正し、熱伝達係数は完全な真空の場合よりも約 10% 高いと推定した。¹⁰

ステファン・ボルツマン係数は、セルから失われる熱の最小量を示す。最小閾値である。校正を行って、これよりさらに少ない熱がセルから出ていることに気付いた場合は、それは間違いに決まっている。実際のセルはこれより少し多く放射し、蓋のワイヤーに沿った伝導など、他の経路からの熱も少し失う。

この種類のセルを使用したフライシュマンとポンス、マイルズなどは、実際の熱伝達係数を決定するために校正した。彼らは、これを「擬似放射係数」と呼んでいる。厳密に言えば、それは完全に放射ではないからである。

高温で実験を行うと、蒸発水の量が増えるため、熱量測定も複雑になる。低温では、蒸発はわずかで無視できる。しかし、50°C または 60°C では、多くの蒸気がセルから出るので、セルから除去するエンタルピーを追跡する必要がある。そうしないと、出力が過小評価される。フライシュマンとポンスは大気圧を注意深く記録して、蒸発によって失われたエンタルピーの量を計算した。彼らはどれだけの補給水がセルに追加されたかを測定し、電気分解で説明できるよりも多くの水がセルから出ていたと判断した。余分に失われた水の量は、蒸発による損失の見積もりと一致した。

等周温熱量測定は、安定した定常状態の反応で最適に機能するが、マイルズが指摘したように「電気化学熱量測定では定常状態はない。」条件は動的で、常に変化する。彼は付け加えている：「主なエラーの原因は、セルの上部を通る熱流経路（図 4）、室温の変化、気泡効果によるセル電圧の変動、セル内と恒温水槽内の両方の液体レベルの変化から発生する。」[12]

一見すると、フライシュマンとポンスが間違った種類の熱量計を選んだと思うかもしれない。この熱量計は適度な温度の狭い範囲に適しているのにフライシュマンとポンスは低温から高温までの広範囲で使いたいと考えた。安定した状態で最適に機能するが、電気化学はまず安定した状態になることはない。だから、一部の批判者は、フライシュマンとポンスは間違った種類の熱量計を選んだと思い、フロー熱量測定、又はより簡単な分析を可能にする他のタイプの熱量計を使用すべきだったと言った。フライシュマンはこれに同意せず、装置自体が実験で重要な役割を果たすことを強調した。装置は実験の要である。装置そのものが反応を妨害したり、防止したりする場合がある。機器はサンプルが熱くなるのを許さなければならない。等温熱量測定（isothermal

¹⁰ Stefan-Boltzmann 係数は $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ である。セルの長さは 25 cm で、上部の 8 cm は銀メッキされた。内径は 2.5 cm である。放射は内面（直径 2.5 cm）から発生するため、放射面は 133.5 cm^2 であり、係数は $7.6 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{K}^{-4}$ となる。マイルズが測定係数は $8.5 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{K}^{-4}$ で Stefan-Boltzmann より 12% 高い。

calorimetry) はサンプルを一定の温度に保つため、フライシュマンはマックブリ (McKubre) の等温熱量計を批判した。この熱量計のタイプではサンプルがより高い熱を生成すると、周囲は自動的に冷却されて補正される。

どうしてフライシュマンとポンスがセルを厚い断熱材にして数ワットの入力電力によって高温になるようにしたのか？なぜなら、電流密度と温度が急速に変化するなどの高温と動的条件が反応を促進するからである。正しいパラジウム材料を選んで、うまく高い濃度に重水素をパラジウムに溶かして、そして他の条件が満たされていると過剰熱が出るだろう。しかし、セルの温度を室温に近く抑えると、反応が小さいままにとどまって、検出が困難になる。フライシュマンとポンスは、温度の上昇が反応を促進し、反応が温度の上昇を引き起こす正のフィードバックの重要性を強調した。

彼らはまた、この機器の感度を高めるために、高い断熱材を使った。電力の小さな変化により、大きな温度差が生じる。彼らはミリワットレベルでも反応を検出することができた。マイルズとフライシュマンは、この装置と彼らが開発した方程式を使用し、0.1 mW (0.0001 W) まで測定できると推定した。[14]

熱測定の実例

マイルズは、フライシュマンとポンスが研究所に与えられた「イカルス」号の周熱量計を使用して、1997 年に日本の NHE 研究所で 69 日間の実験を行った。ここに提示されているのは、その実験の過剰熱の実例である。過剰熱は、52 日目に 39,100 J でピークに達した。0.453 W の過剰熱となる。¹¹ 52 日目、マイルズはこれらの数値を実験ノートに次のように記録した：

$$T \text{ (セル温度)} = 65.15^{\circ}\text{C} = 338.30 \text{ K}$$

$$T_b \text{ (恒温水槽)} = 22.04^{\circ}\text{C} = 295.19 \text{ K}$$

$$I \text{ (アンペア数)} = 0.500 \text{ A}$$

$$E \text{ (セル電圧)} = 10.12 \text{ V}$$

$$K_r \text{ (セルの熱伝達係数)} = 0.85065\text{E-}9 \text{ W/K}^4$$

セル温度は非常に安定しており、1 時間に約 0.080 K しか変化しなかった。これは良い結果だ。急激に変動する熱よりも正確に安定した熱を測定できる。

¹¹ これは、この実験中に等周熱量測定で測定された最良の結果だ。実験の最終日、セルは沸騰するように駆動され、ピーク時に 118 W の過剰が発生した。相変化熱量測定で測った。

出力

温度差（セル温度から水槽の温度を差し引いたもの）= 43.11°C

セルから水槽の水に放射線によって熱伝導は、 $K_r * (T^4 - T_b^4)$ である。その意味：熱伝達係数 \times （電池温度 K^4 - 水槽度 K^4 ）。これは 4.683 W に等しい

入力

セルに入る総電力は：10.12 V \times 0.5 A = 5.06 W

セル内のジュール加熱は：(10.12 V - 1.54) \times 0.5 A = 4.29 W。（マイルズはこれを小数点以下 4 桁で計算したところ、4.2965 W だった）。0.77 W は、重水素および酸素の遊離ガスとしてセルから去る。

過剰熱 = 出力 - 入力

過剰熱は約 4.683 W - 4.297 W = 0.386 W

これは、水槽に放射される熱の割合を占める。熱量計で測定された電力は、参考文献[14]¹²の式を使用して、他の熱損失経路を考慮することにより、これよりも高い精度で計算できる：

$$P_{\text{calor}} = P_{\text{EI}} + P_{\text{H}} + P_{\text{X}} - (P_{\text{gas}} + P_{\text{R}} + P_{\text{C}} + P_{\text{W}})$$

P_{calor} = すべての入力源と出力のバランス。バランスがゼロの場合、セル温度は安定する。この日の場合のようにセル温度がわずかに上昇している時は、熱が蓄えられているため、 P_{calor} は正数だ。

P_{EI} = 電気分解による熱出力。4.2965 W。

P_{H} = セルの中にある対抗ヒーターの電力。（校正に利用される。この日は使われていなかった。）

P_{X} = 過剰電力; 存在する場合にこれは常温核融合の熱。（下の計算式でこれを解く。）

¹² これは、「簡単な方法」の論文の方程式（以下で説明）よりも少しわかりやすい。項のいくつかは負の値である。論文には「いつものように、正の量はシステム（熱量測定セル）に加えられる出力を表し、負の量は周囲に与えられる出力を表す」と書いてある。フライシュマンがもしどちらが負か記していたら彼の論文はより簡単に理解できたかもしれない。しかし彼は読者のために物事を簡単にしたこととはめったになかった。私はわかりやすくするため勝手ながら負の量にマイナス記号を追加した。

P_{gas} = セルを離れ高温ガスによって除かれた熱エネルギー。重水素と酸素ガスによって持ち出される化学的位置エネルギーではない。後者は、電圧から熱的中性電位 (1.54) を差し引くことで既に調整されている。

P_R = セルから水槽の水に渡される放射線。これが主なエネルギー経路だ。セルから出るほとんどのエネルギーがここを伝って行く。この例では 4.683 W である。

P_C = 伝導によって転送される熱 (セルの蓋のワイヤーなどから出て行く)。

P_W = 圧力-体積仕事 (ガスの圧力の変化) からの熱。これは非常に小さい。約 0.0023 W

マイルズの実験ノートの過剰出力の計算式はこれより少し単純だった。抵抗ヒーターがオンになっていないため、 P_H は含まれていない。また、 P_C は非常に小さいため、含まれていない：

$$P_X = P_{\text{calor}} + P_R - P_{\text{EI}} + P_{\text{gas}} + P_W$$

すなわち：

過剰な電力 (0.4610 W) = 熱量計の熱収支 (0.0100 W) + 水槽への放射 (4.6830 W) - 電気化学加熱 (4.2965 W) + セルから出るガスからの熱 (0.0536 W) + 圧力仕事 (pressure-work) からの熱 (0.0109 W)

総過剰熱は 0.461 W であり、これは 0.386 W (恒温水槽へ放射のみ) を少し超える程度だ。熱量計の熱平衡 (P_{calor})、ガスの出力、圧力仕事の出力を合わせて 0.075 W を追加する。恒温水槽への放射が一番大きい熱損失経路だ。重大な間違いがあるとしたら、この項だろう。

ところで NHE の他の研究者は、マイルズが熱伝達係数を誤って測定したと思った。係数はもっと低く、よって過剰熱がなかったことを意味すると思った。これについては、下の節「熱伝達係数をいつ、どのように測定するかに関する紛争」で説明する。

フェーズ 2 沸騰時の相変化熱量測定

常温核融合熱量測定には、氷から水への変化 (融解) と水から蒸気への変化 (蒸発) の 2 種類の相変化が使用されている。Dufour らは毛細管で溶けた氷の量を測定した氷熱量計を使った。[47] (氷が溶けるにつれて体積が減少する。氷は水よりも体積が大きいので、氷が浮く。) 他の氷熱量計では、溶けた氷の水を直接測定する。フライシユマンとポンス、ロンチャントら (Lonchampt)、そしてロンチャントとビベリアン (Biberian) は沸騰した電解液の量を測って相変化熱量測定を報告した。[4、15、16] この方法では、沸騰水の重量に蒸発熱を掛けたものとして測定される。蒸発熱は通常の水では 2259 J/g 又は 44 kJ/mol、重水では 2064 J/g 又は 41 kJ/mol。

「簡単な方法」の論文に記載されている実験の等周熱量測定フェーズの後で、電解パワーを上げることによって陰極が加熱され、それによって過剰熱が強化され、さらに陰極が熱くなる。正のフィードバックを起こす。その後、電源を落としても高いレベルの発熱が続く。フライシュマンは ICCF 会議での講義でこれを説明したが、会議の出版物に明確に記録されていたとは思わない。私の意見では、これは重大な省略だった。沸騰をどのように引き起こしたかを明確に記すべきだった。正のフィードバックについて概要は書いたが、熱を上げるパルス後に温度がベースラインに戻らない時に効果が発生していることを加熱パルスについて詳しく書いた。しかし、私が覚えている限り、沸騰を引き起こすために使用したパルスの特定の電力レベル、温度、および持続時間を記録では説明していなかった。ビベリアンとロンチャントは、セルを電気分解で加熱して沸騰させた。彼らの場合、決まった時間に電源を上げたのではなくて、セルがひとりで熱くなった。セルは、通常 0.5 A の定電流モードで動作した。セルはパイレックスでできているため、セルの壁からシリカが浸出する。シリカやリチウムなど、さまざまな化合物が陰極に徐々に堆積する。この堆積物は電流の通過を妨げるため、電圧が上昇する。上昇すると、温度が沸騰するまで入力電力が増加する。[17]

相変化熱量測定は等周熱量測定に比べて単純だから、論文の題は「簡単な方法」と名付けられたのだ。

セルが正のフィードバックで沸騰するように駆動されると、常温核融合の過剰熱が増加し、すべての水が蒸発してセルが乾燥するまで沸騰し続ける。水の半分が沸騰するのに約 10 分かかる。実験はタイム・ラプス動画で撮られたから、画面のタイム・スタンプで 10 分だと分かる。沸騰が引き起こされた時間もセルからすべての水がなくなって、沸騰が終わる時間も、ビデオではっきりと見える。ビデオからの静止画が論文に表示された。ビデオそのものはこちらの YouTube にある：

<https://www.youtube.com/watch?v=Tn9K1Hvw434>

残念ながら、これは古い VHS ビデオで、コピーの又コピーだから、質が低下し、画像がぼやけているが、沸騰の開始と終了は確認できる。ビデオは、温度とセル電解入力電力のコンピューターのデーターと同時に録画されている。フライシュマンとポンスは次のように説明した：

実験のどの段階でもビデオ録画を繰り返しみて、前へ進むか逆戻りをすることも可能であるため、セルの重水の量はかなり正確に推定できる。この類のセルでの D_2O の後半の蒸発/沸騰の時間を計ることにした。これにより、沸点の領域での操作は特に単純な熱収支解析ができる。

「簡単な方法」の論文[4]の熱収支解析は次の項目で、私の説明は青色で表示されている：

計算

エンタルピー入力

電解による入力 = $(E_{\text{cell}} - 1.54) \times \text{セル電流} = \sim 22,500 \text{ J}$. E_{cell} は、セル電圧の電気化学用語である。1.54 は、重水の潜在的な熱中性（標準生成エネルギー）である。

エンタルピー出力

周囲へ $\approx k'_R [(374.5^\circ)^4 - (293.15^\circ)^4] \times 600 \text{ s} = 6,700 \text{ J}$. 表面放射はケルビン温度の 4 乗であるというステファン・ボルツマンの法則に基づく放射。この場合、表面積から導出され、校正によって確認された熱伝達係数に、セル温度の 4 乗から恒温水槽の温度の 4 乗を差し引いた値を掛ける。これが熱力 (W) なので、ここに 600 秒 (10 分間) を掛けてエネルギー (J) を求める。

蒸気 $\approx (2.4 \text{ Moles} \times 41 \text{ KJ/Mole}) = 102500 \text{ J}$ 。つまり、2.5 モルの重水 (45 g) に重水の気化熱を掛けたもの

エンタルピーのバランス

過剰エンタルピー $\approx 86700 \text{ J}$. 過剰熱

エンタルピー入力率

電気分解によって、 $22,500 \text{ J} / 600 \text{ s} = 37.5 \text{ W}$. 沸騰している間中の電気分解入力電力。水位が陽極と陰極を下回ると電力が遮断されるため、これは過大評価されている。

エンタルピー出力率

周囲に対して、 $6,600 \text{ J} / 600 \text{ s} = 11 \text{ W}$ 沸騰している間のセルから水槽への放射線からの 11 W 電力

蒸気中、 $102500 \text{ J} / 600 \text{ 秒} \approx 171 \text{ W}$ 。171 W は蒸気として持ち去られる

エンタルピー率のバランス

過剰熱の生産率 $\approx 144.5 \text{ W}$

生産比率 $\approx 144.5 \text{ W} / 0.0392 \text{ cm}^3 \approx 3,700 \text{ W/cm}^3$ 。パラジウムの量に正規化された熱

これは、いくつかの理由で異常な常温核融合の熱だと分かる：

- 沸騰が続くと、重水が減るにつれて水位が陽極と陰極より下に下がるので、電流は流れない。電解が止まる。しかし、すべての水がなくなるまで、沸騰が続く。対照実験の場合は沸騰を維持するのに十分な電解力を使うが、水位が陽極より低くなる瞬間に電流は止まった、電解も、沸騰も停止する。水が少しセルの底に残る。

- セルの底の陰極と陽極を支える Kel-F プラスチック製の部品があるが、過剰熱が出るとその部品の周りの重水がすべて蒸発して、部品が溶ける。対照実験の場合は部品が水に浸かったまま溶けない。Kel-F プラスチックは 300°C で熔融するので、陰極の温度は 300°C より高温に違いない。そのため、水がなくなるまで沸騰が続く。
- 沸騰する熱はすべて陰極から出ていると分かる。沸騰しているセルのクローズアップビデオは、陽極に沸騰気泡が形成されておらず、電解気泡のみが見られる。沸騰気泡と電解気泡の違いは見てすぐ分かる。電解気泡は清涼飲料の二酸化炭素の泡のように、小さくて、一定のペースで鉄の表面を離れる。沸騰気泡は大きく、突然に表面を離れる。（残念ながら、このビデオはもう手に入らないが、元のビデオはそれを示していた。）高電力の電解による対照実験の場合は陽極と陰極の両方の表面に沸騰気泡が形成される。
- ほぼすべての水が蒸気としてセルから出たことが分かる。ある懐疑論者は、沸騰していない水が泡または噴霧としてセルから漏れたと推測した。沸騰していない水が十分セルから出ると、蒸気によるエンタルピーがかなり低下する。ところで、沸騰しない水がセルから漏れると、水中に含まれるリチウム塩が一緒に出て行くので、沸騰した後のセル内のリチウムを測定することによって、どれだけ漏れたかを推測できる。フライシュマンとポンスはこれを実施したので、わずかなリチウムしか失われておらず、エンタルピーを大幅に低下させるには不十分であったことがわかった。

彼らはこれを 2 つの論文で説明したが、その 2 つの内容は食い違っている。1990 年の報告では、リチウムの一部が失われたため、相変化熱量測定でエンタルピーを推定することが難しいと判断した：[3]

ただし、この[沸騰した]段階では、熱出力を定量的に見積もることはできない。セルと機器はこれらの条件下での見積りには適していないためだ。注意すべきことだが、セルの電位は最初は減少するが（これはバーストの状況に共通している）、おそらくセルを離れるスプレー内の電解液の損失が原因であり、セルが沸点に追いやられると、時間とともに電位の増加に変化が生じる。

ビベリアンも沸騰している間に噴霧として一部のリチウムが失われることも報告した。[18]

一方、2 番目となる 1993 年の論文で、フライシュマンとポンスは失われたリチウムの量はごくわずかだったと報告した。多分彼らはこれが書かれた時までにセルに残ったリチウムを再評価した：[19]

ダグラス・モリソン(Douglas Morrison)は、最初に、セル内容物の一部が激しい加熱の段階で飛沫として放出されたかどうかという疑問を提起する。これは、セルの残りの中身を滴定することによって簡単に答えられる。私たちの以前の研究に基づ

くと、残りの重水素化リチウムの約 95%が回収された。「活発な」物質とガラス成分との反応で、滴定できない残留物を形成するものは間違いなく失われる。

フェーズ 3 の冷却曲線分析

沸騰後、セルは時々数時間から 1 日の期間、高温のままだった。フライシュマンとポンスはこの段階を「死後の熱」と呼んだ。「簡単な方法」の論文は、3 時間続く死後の熱の例について説明している。

このフェーズでは入力電力はない。電解液がないため、陽極と陰極の間に電流が流れない。周囲より暖かい物体に電力や熱が流れておらず、そして物体自体が内部で熱を発生しない場合はその物体は必然的に冷める。ニュートンの冷却の法則に従って冷却される。この曲線は単調であり、常に下降し、上昇することはない。

この論文で説明する死後の熱では、ニュートンの法則に従ってセルの内部は冷却されることはない。逆に、しばらく同じ温度のままで、その後温度が上昇する。セル内の唯一の熱源はパラジウムの陰極であることは分かっている。セル内で熱を発生する物は、パラジウム陰極のみだ。熱量は、冷却曲線をプラチナと重水を使用した対照実験と比較することで推定できる。

図 7 は、対照実験の冷却曲線を示している。冷却が急速に始まり、その後、曲線が 11,000 秒（3 時間）でほぼ平坦になるまで徐々に減速する。冷却は単調である。

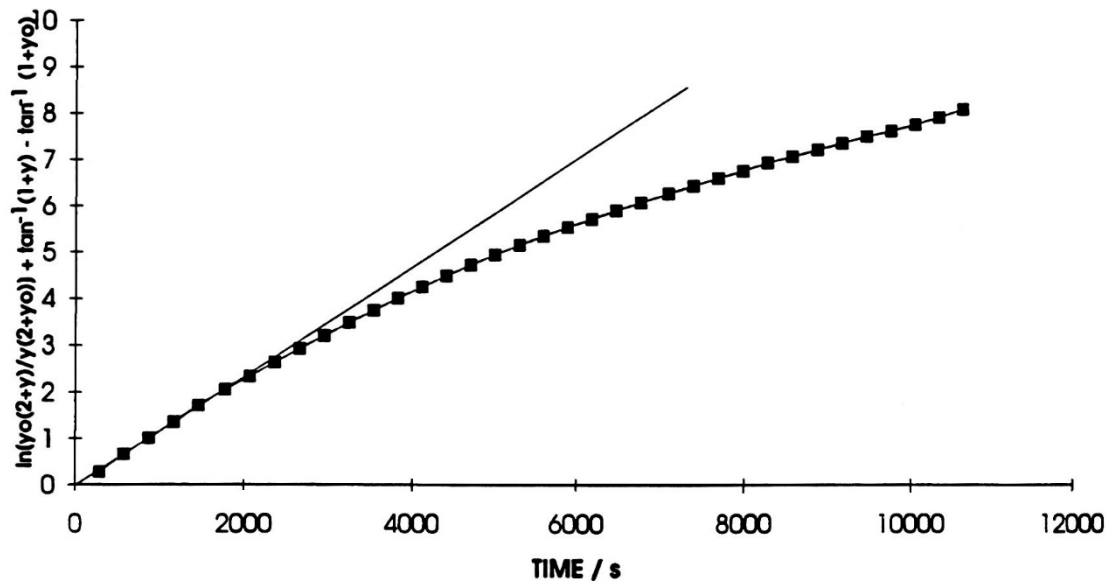


図 7。対照実験の冷却の曲線の分析。曲線は上昇しているがこれは冷めていく状態を示す。（右端の最も高い点は一番冷えている） [5]

図 8 は、死後の熱中の冷却曲線を示している。この現象は対照実験の冷却よりずっと長く続く（約 32,000 秒＝9 時間）。それは急速な冷却から始まるが、約 15,000 秒で

冷却は横ばいになり、18,000 秒で逆転する。セルが冷たくなるのではなく温まり始める。その後、セルは徐々に冷却されるが、対照実験よりもはるかに遅い速度で、過剰熱を発生している。25,000 秒に別の逆転がある。再び、セルは周囲に失うよりも多くの熱を生成する。最後に、34,000 秒で、対照実験とほぼ同じ速度で冷却が始まる。これは、陰極がもう過剰熱を生成しなくなったことを意味する。

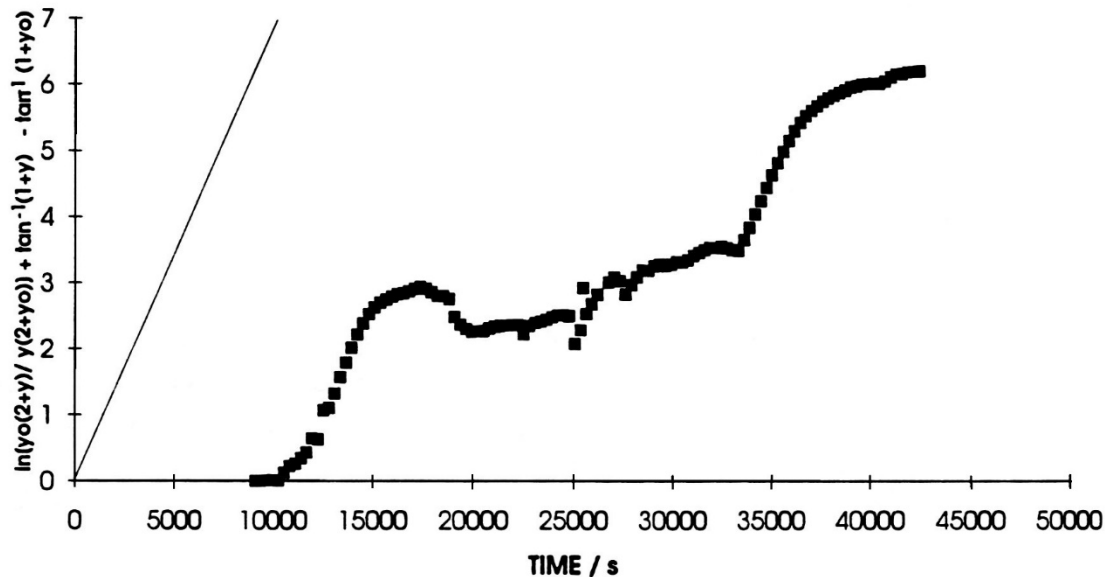


図 8。死後の熱による冷却曲線の分析。図 7 と同様、曲線は上昇しているがこれは冷めていく状態を示す。（右端の最も高い点は一番冷えている） [5]

これは、同じデーターを過剰熱と冷却速度に変換したものだ。18,000 秒、22,000 秒、25,000 秒の冷却速度は負の値である。つまり、セルは冷却されておらず、加熱されている。

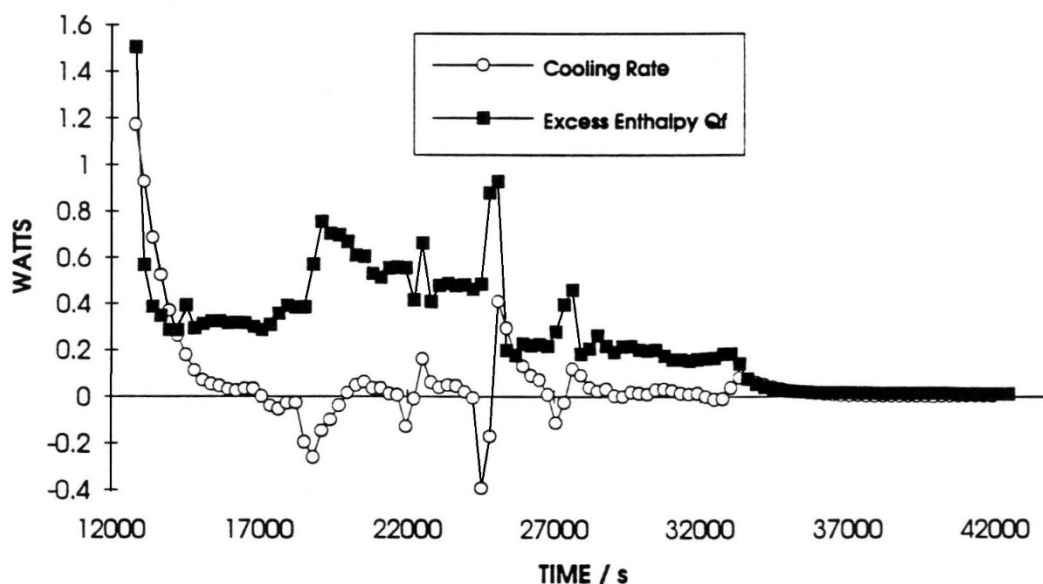


図9。図8と同じデータで、過剰熱と冷却速度に変換される。この図では、前の2つとは反対に、Y極の値が逆さまになっているので、下へいくほど冷えている。最後に0 Wとなる。[5]

フライシュマンとポンスの「簡単な方法」の論文

「簡単な方法」の論文 (*Calorimetry of the Pd-D₂O system: from simplicity via complications to simplicity*) [4]は3つの方法を説明している。一見すると、この論文は別に簡単ではない。「熱量計のモデル」の部分は長い方程式から始まる。それは恐ろしく難しいように見えるが、電気分解の教科書からの熱の定義に過剰エンタルピーの項を付け加えている。つまり、常温核融合が発生する過剰熱である。読者の手助けとなるよう、フライシュマンとポンスは方程式の説明を加えた：

Change in the enthalpy content of the calorimeter = enthalpy input due to electrolysis – enthalpy content of the gas stream + excess enthalpy + calibration pulse – time-dependent heat transfer coefficient * (effect of radiation + effect of conduction)

熱量計のエンタルピー含有量の変化 = 電解によるエンタルピー入力 – ガス流のエンタルピー含有量 + 過剰エンタルピー + 校正パルス – 時間依存熱伝達係数 * (放射の影響 + 伝導の影響)

この方程式の記号は、フライシュマンとポンスの論文の最後にある「記号の用語集」にリストされている。この方程式の K_R 表記は、フライシュマンとポンスはよく他の論文でも使っている。熱伝達係数を意味する。少々複雑だから読者が混乱するかもしれない。 $[k_R]_{11}$ などの添え字がある。これについては、本論文の付録Cで説明する。

方程式の次のセクションでは、個々の項が説明されている。これは非常に詳細な分析だ。わずかな効果しかない項も含まれているが、これらは含める必要がほとんどないと私は思う。たとえば、セル内の電解液の水位の変化に関連する2つの項がある。電気分解が進むと、水は重水素および酸素遊離ガスとしてセルから出て行く。水位が下が

る。2日ごとに、補給水が追加される。これらの水位の変化は、熱量測定に2つの方法で影響する。セルの熱容量を変更することと、熱を放射する壁の表面積を変えることである。これら2種類の影響は、この方程式の2つの項で表す。1つ目の項は「時間の経過に伴う水当量の変化を可能にする」： $\left[1 - \frac{(1+\beta)It}{2FM^0}\right]$ 。セルのすべての水、金属およびガラスの熱容量が計算され、モルでの重水の等価熱質量に変換されることを意味する。セルが加熱されると、重水の比熱を乗じた温度変化により、セル自体が保持しているエネルギー量が分かる。2番目の項は $\left[1 - \frac{(1+\lambda)It}{2FM^0}\right]$ （ λ が β に置き換わる以外は同じ）

で、「時間の経過に伴う放射表面積の減少を可能にする」。水位が下がることにつれて、加熱されるセルの壁の表面積が少なくなるため、壁から恒温水槽に放射される熱は少なくなる。ところで、これらの影響は両方ともミリワット程度だ。後者は、セル上部の銀メッキと透明なガラスの「窓」によりほぼ完全に打ち消されている。フライシュマンとポンスの説明：「すでに述べたように、この部分は上部に銀メッキされた熱量計では無視される場合がある（ただし、この項は銀メッキされていないデュワーで行われた測定では重要である）」

フライシュマンとポンスは、第一原理から熱量測定を分析した。彼らは、セルから周囲へのすべての測定可能な熱伝達経路を分析した。これは非常に困難かつ厳格なので、多くの研究者はそれを試みようとはしない。上記で説明したように、単に校正し、校正曲線を使用して過剰熱があるかどうかを判断するだけだ。

フライシュマンとポンスは、第一原理から分析しただけでなく、広範囲にわたって校正し、過剰熱が校正曲線を上回っていることを確かめた。

彼らは執拗に細部を追求した。ある意味でそれは読者にとって迷惑だ。常温核融合の効果を確認するためには、詳細な物理学を説明する多くの方程式を実行しなければならないという印象を受けるかもしれない。水位の変化を考慮する必要がある。これはわずかな効果しかない。読者は次のように考えるかもしれない。「常温核融合がそのような細部を追跡することによってのみ検出できるのなら、それは非常に微妙な現象に違いない。そうでなければなぜミリワットまでそれを測定するためにそのような精力的な努力をしたのだろうか。検出するのは難しいに違いない。だから間違いかもしれない。この難解な物理学とこれらのすべてのパラメーターは、いくつかの間違いを隠すかもしれない。」

私としては、フライシュマンとポンスが最初の近似では単純な分析で過剰熱を検出するのは簡単であることを強調して欲しかった。彼らは非常に正確な機器を作り、多くの小さな要因を考慮に入れた複雑な分析で精度を向上させた。彼らの計器は非常に簡単だが、それにもかかわらず非常に優れていて、ミリワット程度の熱を検出できた。これは、常温核融合を観察するにはミリワットの精度が必要なためではなく、詳しく観察したかったわけだ。反応を詳細に調べたかったし、反応が現れた瞬間にそれを検出したかった。フライシュマンが「複雑なソフトウェアを備えた簡単なハードウェア」が好きだったので、これを実行した。（フライシュマンはグラフも好きだった。グラフは自分の

目でできる分析のための最良かつ最も重要なツールであると述べた。参考文献[20]、14ページ。)

ビベリアンは、そのような正確な機器がなければ、効果を発見できなかったと考えている。「微生物を見る顕微鏡、木星の衛星を見る望遠鏡など、新しい機器の開発によって多くの新しい発見があった。多くの例がある。常温核融合の場合、それは高精度の電気化学熱量計の作成だ。そのような正確で簡単な機器がなければ、彼らは発見できなかっただろう。」 [21]

論文には技術的な詳細が詰め込まれている。水位の議論は、多くの方程式で打ちのめされた。測定可能な影響をほとんど及ぼさなかったかもしれない他のいくつかの詳細もそうだった。あり得なかったことについての議論さえある。たとえば、彼らはさまざまな気圧での仮説的な影響にかなりの注意を向けている。1つの図では、沸騰しなかった場合にセルから水が蒸発する方法のシミュレーションを示している。これには2-3時間がかかる。大気圧はその日に記録された実際の圧力とは異なる必要がある。彼らは次のように書いた：

操作の最終段階でのセルの内容の時間依存性の証拠については、次のセクションで説明する。図7Cには2つの想定された大気圧 0.953 および 0.97 バールを使用して計算された $(k'_R)_{11}$ の値が示されている。最初の値は、セルの内容物 ($M^0 = 5.0 \text{ D}_2\text{O}$) がスムーズに蒸発するように選ばれた。ただし、この特定の動作モードでは、乾く前に2-3時間でセルが半分まで満たされている必要がある。さらに、その時の周囲圧力は 0.966 バールとなる。従って、そのような操作モードは除外する必要があると考える。

実のところ、水は沸騰した。彼らはそれが沸騰するのを見た。そして、沸騰までの半減期はたった10分で、2-3時間ではない。架空の2-3時間のシナリオは、実際の状況とはかなり異なり、私には不自然に思われる。まるで、彼らがどれほど厳格であるかを示すために、読者に「私たちは起こりうるあらゆる事を予期したのだ！」と言っているようだ。

熱量計に関連する分析とソフトウェアは複雑だが、セル自体は洗練され、かつ簡単で、信じられないほど正確で精密だ。参考文献[22]に記載されているように、多くの利点がある。

- 安価なので、「簡単な方法」の論文とビデオに示されているように、多くのセルを作成して一度に並行してテストする余裕がある。
- セルをガラスで囲まれた恒温水槽に入れると、下部の窓を通して、セルの内部を見ることができる。これは、沸騰する実験中に特に重要だ。
- 熱伝達の方法としての放射には、いわゆる化学用語で「記憶」がない、などの利点がある。セルの内壁に形成される気泡や水のよどみ層は、放射熱伝達係数に影響を与えない。熱電対と小型の核検出装置は、熱量測定に影響を与えることなくセルに挿入できる。

- 熱量測定のための2つの主要なパラメータは次のとおりである：1. 実験の過程で変化しない熱伝達係数 (k_R) ; 2. セルの総熱量 ($C_P M$) 。総熱量は実験過程で少し変化するが、正確に測れる。ガラス、重水、電極、サーミスタ、抵抗ヒーターなどのすべてのセルにある部品の熱質量であり、その熱質量を持つ重水のモルに相当する単一の数に変換される。（興味深いことに、J.P. ジュールもセル内のすべての物を水の等価熱質量に変換した。[23]）

セルは安価だったが恒温水槽など他の器具は高価だった。サーモスタット制御で温度を $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以内に保った。[14]

論争

1990年代、懐疑論者たちはフライシュマンとポンスの研究に多くの反対を表明した。これらの反対意見は3つに分類される：

1. 常温核融合の研究者は狂人であり犯罪者であるという主張など、感情的および個人攻撃。ワシントンポスト[24] からウィキペディアに至るまで、何千もの攻撃が発表された、ここでは取り上げない。いくつかの例が参考文献にある。[25] 。
2. 多くの論文は、効果は理論に違反していると主張しているため、結果は間違っている。たとえば、核融合がこれだけの熱を発生したら、観測者を殺す強力な中性子束を必然的に生成する。しかし、そのような中性子束は発生しなかったため、この現象は核融合ではあり得ない。これは論理の間違いである。科学的手法に違反している。再現された実験が理論と矛盾する場合、実験は正しく、理論は間違っている。懐疑論者は他にも多くの論理的誤りを犯した。ただし、これらの誤差は熱量測定に関する本書の範囲を超えているため、付録Bに限定する。
3. 熱量測定機器および方法にエラーがあったという主張。これらの批判のほとんどは、会議やインターネット掲示板などの非公式の場で行われた。私の知る限り、モリソンとシャナハン（Shanahan）による熱量測定のエラーを見つけようとした査読付きの論文は5冊しか発表されていない。[26-30]（シャナハンへの反論も参照[31、32]）私の意見では、これらの論文には価値がない。参考文献にその論文のリンクがあるので、読者はそれらを読んで自分で判断するようお勧めする。

懐疑論者は最初の実験に中性子の検出に誤りがあったと主張したが、それは正しかった。フライシュマンとポンスはBF3 カウンターを誤って使用した。フライシュマンは、最初の論文が発表された直後にそれを認めた。

ここで引用された5つの論文、および数え切れないほどの非公式の場で、懐疑論者は熱量測定にエラーがあり、過剰熱は本物ではないと主張した。本論文の残りの部分で

は、「簡単な方法」の論文で報告した熱量測定の方法に適用される主張について説明する。私は懐疑論者の主張が誤っていたことを指摘するつもりだ。私が知る限り、「簡単な方法」の論文の後に発表された、還流熱量計の問題は指摘した者はいない。

特定のエラーについて説明する前に、これらの批判に関する一般的な問題を指摘しておく。私の知る限り、シャナハンを除いて、ストームズ (Storms)、マックブリ、マイルズなどの研究者による独自の再現や、イタリア国立研究所 (ENEA) の論文による独自の再現など、フライシュマンとポンスの実験の再現成功論文に間違いを唱えようとした懐疑者はいない。[33-36] 懐疑論者たちは、あたかもこれらの再現成功文献が存在しないかのように、フライシュマンとポンスによる初期の報告にのみ焦点を合わせてきた。実際、彼らの多くは実験が再現されたことはないと主張し、他の文献はないと言う。懐疑論者は、数十の例があるが、等周熱量計を使用した他の実験で間違いを発見していない。フロー熱量測定、ゼーベック熱量測定、沸騰および氷相変化熱量測定、または過剰熱の赤外線カメラ検出でのやり方にエラーを発見しようとしな

い。おそらく懐疑論者は、これらのさまざまな手法のすべての実験のエラーを探すのは無理だと感じているのだろうか。次のような妥当な理由があった。

実験科学の基本の1つは、2つ以上の異なるシステムで効果が検出された場合、1つの系統的エラーは存在していないということだ。等周熱量計、フロー熱測定、ゼーベック熱量計で過剰熱を検出すると、3つの異なる物理的原理に基づく3つの異なるシステムになる。それらがすべて間違っている場合は、3つとも違う系統的なエラーが発生しているはずだ。3つの異なるエラーを見つける必要があるだけでなく、それらが同じ基本的な動作を示す理由を説明する必要がある。それらはすべて、マックブリの経験式に当てはまり、熱は負荷、電流密度、流束とともに増加する。[37] なぜパラジウムと重水が効果をもたらすのかを示さなければならないが、プラチナと重水では効果はない。これは不可能だ。電流密度の変化、またはプラチナの代わりにパラジウムを選択することで、物理的に異なる機器で同じ種類のエラーが同じ程度に何らかの形で引き起こされることは考えられない。パラジウムの選択がセルの電解液に配置されたサーミスタ温度計に影響を与える可能性があるかと仮定しても、

熱電対にサーミスタ温度計と同じ影響を与えることは不可能。

または、セルの周囲に巻かれた銅の鞘に接して配置された、セルの外側にある一連の熱電対；

または、フロー熱量計で、セルから離れた冷却水の流れの中に置かれた熱電対；

または、ゼーベック熱量計で、セルを遠くに取り囲む熱電回路に同じように影響を与えることは不可能。

これらの異なる構成のすべての機器がパラジウムに同じように、そして間違ったように反応して、パラジウムが重水素を高レベルで負荷され、高電流密度で保持されている場合にのみにこのエラーを起こすとは魔法を信じるようなものだ。

次に、「簡単な方法」の論文で具体的な計量分析が可能なエラーが発生したという懐疑論者の主張を検討しよう。そのような主張は議論されたり、改ざんされたりする可能性がある。

フライシュマンとポンスが発見を明らかにした後、多くの科学者は間違いを犯したのではないかと正当に疑問に思った。彼らはそれが問題を明らかにするかもしれないと考えることができるすべての質問をした。熱量測定に関する4つの主な潜在的な問題は次のとおりだ。

1. 混合が不十分であると、過剰熱のように見える温度差が生じる可能性。
2. 再結合エラーが発生している可能性。
3. 陰極は、核融合ほど十分熱くならなかった。これは有効な議論ではない。これと言う科学者たちは、力とエネルギーを混乱している。
4. 熱伝達係数をいつ、どのように測定すべきかの議論。

これらの異議に対し1989年末までに返答されたので、解消したと思われたが、残念ながら、今日まで引き継がれている。

不十分な混合エラー

熱量測定に対する最初の疑いは、電解液が十分に混合されていない可能性があるという主張だった。それが本当なら、温度は電解液のある場所から別の場所が変わるかもしれない。温度計がたまたま暖かい場所に置かれている場合、研究者はセルが過剰熱を発生していると誤って結論するかもしれない。

電解液が場所によって暖かいと仮定する。液体の中1つの限られたスペースの温度のみを検出できる小さな温度計のプローブが、液体がたまたま平均よりも暖かいセル内のどこかに配置されていると仮定する。この温度を検量線と比較すると、過剰熱があると誤って判断し得る。

これは正当な懸念事項だ。しかし、フライシュマンとポンスはこの実験を発表した以前に、実験を行う方法とこのエラーを回避する方法、その他多くのことをすでに慎重に検討した。彼らは電解液がよく混合されていることを確認するためにテストと校正を行った。この疑念が述べられた時、彼らは批判者に即座に対応し、何をしたかを説明し、その手順を詳細に説明した。流体が十分に混合されていたため、電解液の温度に大きな変動がないことを示した。次の2つの方法を使ってそれを確かめた：

先ず、セルに落とされた赤い染料の一滴のビデオを作った。ビデオを使用して、染料が攪拌されるのにかかる時間を測定した。[3] 電気分解からの気泡は、水平方向に3秒以内に、垂直方向に20秒以内に色素を残りの電解液に急速に混合した。このテストは、使用した最低の電解出力レベルで行った。電気分解の出力が高いほど、混合が速くなる。第二の方法は、5つのサーミスタ温度計 (Thermometric Ultra stable Thermoprobes) の配列を使用して、この問題に対処した。配列は垂直または水平に設定でき、どちらの方向の温度差も測定できる。0.01°Cであったセルの底部を除いて、液体の温度差は最大で0.005°Cであることを確認した。

これらの論文を読んだほとんどの科学者は、かき混ぜは問題ではなかったと確信していると思う。これだけの対策をとれば、疑う余地がないだろう。納得できなかった人は、通常の電極で電気分解を行うことでこれらの方法を確認できただろう。常温核融合自体を試す必要はない。パラジウムを使う必要もない。常温核融合実験と同じ形状と構成のセルで、染料またはサーミスタの配列を使用して、同じ電力レベルで鋼鉄の電極を使用できたはずだ。これらの電力レベルでの電気分解による気泡が、有意な温度差を排除するのに十分なほどセルを攪拌していることを確認できただろう。

また、論文を読んで結果を考えれば、液体がよく混ざっていることを確認できる。液体が混合されていないと仮定して、温度計のプローブを暖かい場所に置くと偽の過剰熱が発生しているように見えるが、同じ確率でプローブを冷たい場所に置いて、誤った「過剰な寒さ」を観察する可能性がある。過剰な寒さは不可能だ。これらの材料ではこれほどの吸熱性の電気化学反応はない。これは機器のエラーだとすぐ分かる。さらに、フライシュマンとポンスはプラチナ電極と重水を使用した対照実験で校正中に、誤った過剰熱または過剰な冷気を観察するはずだ。これらのテストでは過剰熱を得られなかった。

この実験が発表された頃にこれらの疑問を呈することは理にかなっているが、いったん回答されると、そして特に自分で電気分解を行って攪拌を確認できる場合は、反対意見を提起し続けることは不合理となった。なのに、多くの人々がこれらの疑問を言い続けた。実際、この「激動」の論争は、フライシュマンとポンスが全米テレビで染料混合のビデオを放映した後でも、実験が1989年の初めに却下された理由の1つだった。

未だにこの疑問を投げかける懐疑論者がいる。混合の問題があったと思い込んでいる。[38] 彼らはビデオを見たり、フライシュマンやポンスが言ったことを聞いたりしたとは思えない。フライシュマンとポンス、そして後にこの間違いを起こしたとされたロバート・ハギンズ (Robert Huggins) を嘲笑した。ある人は中傷的な詩を唱えた：

“Tens of millions of dollars at
stake, Dear Brother,
Because some scientist put a thermometer
At one place and not another.”

兄貴よ：数百万ドル
が懸かっているのは、
ある科学者が
温度計をある場所じゃなくて
別の場所に置いたからさ。

Fire from Ice、144 ページ [39]

Bad Science の作者であるゲアリー・タウベス (Gary Taubes) は、この主張を極端に述べた：

…ビデオは赤い染料が注がれた発泡の常温核融合セルを映した。20 秒以内に、染料がフラスコ全体に均一に分散された。フライシュマンは、このテストは「混合が不十分の説は筋が通らない」ことを証明したと述べた。

デモは印象的だった。しかし、それは偽物だった。もしこの常温核融合のセルに巨大な温度勾配があったとしても（例えば一方の側から他の側へ 50 度の温度差があっても）赤い色素は、非常に短い時間内に均等に拡散しただろう。フラスコ内の温度勾配は、単に赤い染料の勾配と呼ぶべきものとは何の関係もなかった。

Bad Science、271 ページ [40]

この話は不可能だ。水を混ぜた後に、温度は場所によって異なることがなぜ可能なのだろう？例えば冷たい牛乳を熱いコーヒーに注いで、かき混ぜると、タウベスは牛乳が冷たいまま保つとでも思っているのか？マクスウェルの悪魔がコーヒーの中を必死で駆け巡って、エネルギー分子を一方から他方へと押し込んでいるとでも思っているのか？不可能な点はそれだけではない。水の中に測定可能な温度差がある場合、50°C ほど高くない。せいぜい 1 度よりずっと小さい。「側から他の側へ」水平になることもない。温度勾配が停滞している、しばらく不かく乱に置かれた液体には、小さな垂直方向の温度差が見られることがある。液体が攪拌されるとすぐに、勾配はなくなる。タウベスはこれを一体どう思っているのか。コーヒーを 1 杯かき混ぜ、数秒で完全に混ぜ合わせる。それを手に取り、一口飲む。熱い。カップを下して、回して、再びそれを取り上げ、カップの反対側から一口飲む。こちら側のコーヒーは室温 20°C だとでも思っているのか。

タウベス、シャナハンなどの主張は、物理学の基本法則に違反しているだけでなく、5 歳の子供が理解する常識に違反している。

タウベスは科学者ではなくてジャーナリストだ。彼の見解は重要ではない。しかし、彼の本は常温核融合に反対する科学者について大いに利用されるから、重要だ。本は、宣伝文を書いた 2 人のノーベル賞受賞者を含め、多くの科学者に感銘を与えた。しかしでたらめな間違いや 50°C の温度差のような奇妙なアイデアがたくさんあるので、宣伝文を書いた人は本を注意深く読んだと思われない。

その上、この本は付録にリストされている科学者へのインタビューに基づいている。リストのほとんどは常温核融合に強く反対している科学者だ。タウベスは、たとえば常温核融合の研究者は電圧を測定するが電流を測定しない、という奇妙な着想の多くをインタビューした相手から話を聞いたと語った。タウベスによると、NPR ラジオの放送で、常温核融合の研究者たちは週末に工場が閉鎖され、電力が増えるため、過剰熱を検出すると誰かが彼に言ったそうだ。これは多くの面で間違っている。「電気が増える」ことは決してない。電力会社は需要が落ちると出力を減らす。電源は調整されてお

り、電圧が上昇しても電力を生成しない。電力は実験で監視および記録されるため、過剰な電力があった場合は記録される。最後に、これが発生する可能性がある場合は、校正中に発生し、記録される。タウベスがこのナンセンスを信じているという事実は重要ではない。プロの科学者が彼にそれを伝え、ノーベル賞受賞者がそれを承認したという事実は重要である。

再結合エラー

この実験の最初のフェーズでは、オープン・セル電解により、いわゆる「再結合エラー」が発生する可能性がある。2番目と3番目のフェーズでは発生しない。

上述のように、電気分解は水を水素と酸素ガスに分解し、それはオープン・セルから大気中に流れ出る。電力の一部は水を温める。上記のマイルズの例：

総電力： $10.12\text{ V} \times 0.5\text{ A} = 5.06\text{ W}$

セル内の加熱： $(10.12\text{ V} - 1.54) \times 0.5\text{ A} = 4.29\text{ W}$

セルから出る重水素および酸素ガスによって除かれた熱： 0.77 W

これは、ガスがセルを出ると想定している。そうではないと仮定して見よう。セルから出て行く代わりに、酸素ガスの泡が渦を巻いて水中の陰極と接触し、重水素と結合して重水になるとする。または、セルの水面の上の空間に触媒金属メッシュが装備されているとする。酸素と重水素ガスは水から泡立ち、金属に衝突し、水を形成し、セルの重水に再び落ちる。ガスはセルからは出ない。これは再結合と呼ばれ、触媒金属のメッシュは「再結合器」と呼ばれる。これがクローズド・セルのしくみだ。もしクローズド・セルに再結合器がなければ、上部の空間にガスがたまって、圧力がだんだん高くなって、セルが破損する。

マイルズはガスが水中または上部の空間の再結合器で再結合していることに気が付いていないと想像していただきたい。彼は全くガスがセルから出ていないことが分らない。彼は誤って 0.77 W の異常な常温核融合熱が起こっていると考えてしまう。¹³ これは再結合エラーだ。総入力電力よりも少ない電力を生成する結果は、再結合による可能性がある。マイルズと他の研究者がこのエラーを犯し得なかったことはどうやって分かるのか？ なぜなら：

1. この電圧と電流では、再結合によって 0.77 W を超えるエラーが発生することはない。 0.77 W の制限を超える熱が発生する場合は、すべてが再結合によるものではないことが確認できる。文献の多くの実験では、再結合の限界を超える熱が発生している。

¹³ これは有得ない出来事。ガスの半分が水中で再結合することを想像する方がもう少し現実的である。マイルズはそれに気づかず、異常な熱が 0.39 W があると考えた。

2. 電気分解を止めた後、またはセルが沸騰した後も熱が続く場合には、再結合によるものではない。再結合は、電解中にのみ発生する。この実験のフェーズ2および3では、電気分解を止めている。文献には電気分解を行わないのに熱が継続するという他の実験がある。[41]
3. 最も決定的なことは、電気化学者はセルからどれだけのガスが出るかを測定したことだ。マイルズ、フライシュマン、ポンスらは、セル内に有意な再結合がなかったことを確認した。さまざまな方法で行った。最も一般的な方法は、電解液の水位を測ることだ。それは毎日予測された量を減らし、遊離水素と酸素がセルから出たことを示している。セルの重水を補充した時、加えた重水の量を記録した。そして何人かの研究者はまた、ガス流量計、あるいは水中で保持された逆さまの試験管にガスを流してガス流量を測った。
4. ストームズやマックブリなどの他の多くの研究者は、セルの上部の空間に触媒の再結合器を備えたクロード・セルを使用した。これでは再結合エラーはない。異常な熱がない場合、セルの熱放出は入力電力と等しくなければならない。
5. この実験の第2フェーズと第3フェーズでは再結合エラーは不可能であり、これらのフェーズで熱を生成していたため、フェーズ1でもおそらく熱を生成していたと思われる。フェーズ1の熱が機器のエラーであった可能性は低い、実際の熱はフェーズ2で突然オンになり、フェーズ3で継続した。3つのフェーズすべての熱が単一のエラー（アーチファクト）によって引き起こされた可能性はない。方法は全く違う。間違っている可能性のある熱量測定の共通している側面はない。3つのフェーズすべてが間違っていることを示すには、ほぼ同じレベルの誤った熱を生成する3つの異なる系統誤差がなければならない。それはとんでもない偶然だろう。

効果は燃焼かもしれない。「ライター効果」

ある批判者は、フライシュマンとポンスはその批判者が名付けた「ライター効果」を観察したかもしれないと推測した。つまり、重水素がパラジウムから脱ガスする時の重水素の燃焼である。ある珍しい19世紀のシガレット・ライターは、この原理によって水素を搭載したパラジウムで作られた。

クレイサ（Kreysa）らは重水素または水素を負荷したパラジウム板の陰極を木片に置くと、燃焼による熱で木材が焦げたと報告した。[42] 彼らはこの燃焼は重水の生成なら教科書熱である 147.3 kJ/mol あたりを放出すると述べた。ここまでは正しい。

しかし、クレイサは出力エネルギーの違いを理解しなかった。彼らの発言は無意味だ。基礎化学に基づいて、彼らは木材を焦がすのに十分な出力（熱）があったとしても、それはフライシュマンとポンスが最初の論文でさえ報告したエネルギー量（120時間にわたって 4 MJ/cm^3 ）の数百分の1にもならない。

1 立方センチメートル (1 cm³) のパラジウム電極の重さは 11.9 g である。1 モルのパラジウムは 106 g あり、1 立方センチメートルは 0.11 mol となる。パラジウムに水素が 1 : 1 の比率でできるだけ充填されていると仮定すると、0.11 mol のパラジウムは 0.11 mol の水素 (0.11 g) または重水素を保持し、これが燃焼して 0.06 mol の H₂O を生成する。水の生成熱は 1 mol あたり 285,800 J であるため、0.11 g の水素を燃やすと 16,000 J を発熱する。これは、フライシュマンらが観測した値の 250 分の 1 だ。実際、非常に低い温度を除いて、1 : 1 の高さまで充填することは困難だ。実際の 1 cm³ のパラジウム資料をクレイサの方法で充填したら、おそらくフライシュマンが報告した物の約 500 分の 1 のエネルギーを発生するだろう。

さらに、それ以降の論文では、フライシュマンとポンスや他の研究者は立方センチメートルあたりのエネルギーが最初の報告よりはるかに多いと報告した。

クレイサはこれを理解すべきだった。彼は、自分が観察した熱が 120 時間ではなく、短時間だけ続いたことに気付いたはずだ。彼が書いた論文には：

ここで、重水素を装填したパラジウム板をセルから取り出し、テーブルの上に置いた時に、テーブルの表面が焦げたと報告する必要がある。これは重水素核融合によるものであるとはまだ主張することができるかもしれない。したがって、通常の水のみが含まれている電解液を使用して（重水が濃縮されていない）パラジウム板に水素を陰極で負荷し、それを木片の上に置き、焼いて焦がした（図 2 を参照）。これは、酸素が存在する場合、水素が負荷されたパラジウムから放出された水素が触媒的に酸化されて水になることを定性的に示している。この接触再結合の反応



フライシュマンとポンスはこれを考慮しなかった。

フライシュマンとポンスは電気化学者なので、もちろんこれを考慮した。クレイサも電気化学者なので、瞬間的に木材を焦がすのに十分な出力（熱）を生成するが、これはフライシュマンとポンスが報告したものより数百倍少ないエネルギーを生成することを知っているはずだ。高校生なら誰でも、出力とエネルギーの違いを知っているはずだ。

核反応はしばしば同じ量の物質からの化学反応よりも出力は少ないがエネルギーは多いことは、クレイサは確かに知っている。上記で説明したように、キュリーはラジウムの 0.1 g の資料から 0.012 W を測定した。この出力密度は低すぎて、木材を焦がすことはない。台所用の木製のマッチの重量は 0.2 g である。約 40 W の熱を発生する。キュリーのラジウムの 3300 倍以上となる。もちろん、木材を焦がす。約 1,000 J のエネルギーを生み出した後、25 秒で燃え尽きる。ラジウムは暖かいまま、年間 378,000 J を発生する。半減期は 1600 年なので、1000 年後も年間 245,000 J を発生する。

ジョージ・チャップライン (George Chapline) (ローレンス・リバモア国立研究所) など、他の科学者も同じ過ちを犯した。「フライシュマンとポンスが 150 年前のド

イツのライターを再発見した可能性がある」と言った。(1989年5月) (参照[39]、102 ページ)

ダグラス・モリソン (Morrison) も出力とエネルギーを混乱したが、人々が彼に何回指摘しても、間違っ「ライター効果」を繰り返し主張した。彼は、クレイサを引用して 1994 年に査読された論文で「シガレット・ライター効果」についての長い議論を発表した。モリソンは、この効果は、フライシュマンらが「簡単な方法」の論文で述べた沸騰のエネルギーと死後の反応の熱を説明できると主張した。[2] [19]

…「ライター効果」は忘れられている…ステージ 3 [死後の熱]で使用される単純な計算では、水素と酸素の触媒再結合によって生成される熱の重要な影響は省略されている。酸素は電気分解によって陽極から放出され、セルがほぼ乾燥最後の段階で空気からも放出される。フライシュマンとポンスの論文には、試験管から出るガスと蒸気中の酸素、重水素、水の量を測定しようとする試みについては何も述べられていない。

モリソンがこれを出版する前に、フライシュマンは彼に反論を送った：

そもそも、クレイサらの説明は、問題の実験におそらく適用できなかった。 D_2O の蒸発だけで約 1.1 MJ のエネルギーが必要だったが、パラジウム中のすべての D の燃焼では最大で 650 J が生成される (D/Pd 比が陰極で~1 に達していたとしたら)、これだけで 1700 倍の差異。2 番目に、説明の時間尺度は不可能だ。拡散緩和時間は約 29 日だが、現象は最大で約 6 時間かかった… 第 3 に、クレイサらは、電力 (ワット) の概念をエネルギー (ジュール) の概念と混同したが、これもまた、「常温核融合」の「化学的説明」を求める批評家によって広められた誤りだ…

フライシュマンはまた、水素が最も速い速度で拡散すると、出現するのに数時間かかり、燃焼熱で 5 mW しか生成されないのに対し、この効果は 145 W を生成したと指摘した。モリソンはフライシュマンの応答を見て、論文を部分的に書き直したが「ライター効果」の部分はそのままに残して発表した。

クレイサ、モリソンなどはどうしてこの誤りを犯したか？モリソンは、世界で最も優れた研究所の 1 つである CERN の専門科学者だった。彼の仕事をするために高度な物理学を理解していたに違いない。出力とエネルギーの違いは中学校の物理学だ。彼がこれを理解しなかったか、またはクレイサが理解しなかった可能性は極めて低いようだが、私はそれを除外することはできない。人々には以外と教育のギャップがあり、盲点がある。それでも、これは電流と電圧の違いを知らないようなものだ。あぜんとさせられるような間違いだ。

モリソンは不注意な間違いを犯さなかったと思う。モリソンはフライシュマンの反応を見た。モリソンの批評のさまざまな草案とそれらが配布された日付を比較すると、モリソンはフライシュマンが指摘した他の問題のいくつかを修正したことが分かるが、「ライター効果」は修正されていない。モリソンは出力とエネルギーの違いを理解していなかったか、それとも、彼は誠意のない行動で、あり得ないと知っていた問題を読者に納得させることを望んでいた。

タウベスの動機は明らかだった。彼は常温核融合が本物であるかどうか気にしないとエドモンド・ストームズに言った。「お金を稼ぐために本を書いていた」と。

データポイントが不十分

スティーブ・ジョーンズ (Steven Jones)、モリソン、およびその他の懐疑論者は、「簡単な方法」の論文のデーターの時間の尺度に問題があると不満を述べた。データー点は5分間隔で取得されたがこれは離れすぎていると主張した。データー点を取る間に電力変動や出力スパイクがあったかもしれない。この疑問は、ICCF3 会議でモリソンによって最初に提起された。それに応えて、フライシュマンは出力のオシロスコープのトレースを展示した。これははるかに高い解像度である。スパイクはなかった。

この問題は、他に二つの方法でも対処できる。まず、沸騰するまで16日かかったが、その間に多くのデーター点が取得された。過剰熱がない時、そして現れた時の間にも取得された。16日間で4,600のデーター点があるため、ポイントが5分離れていても、スパイクや偏位があった場合、これらのデーター点の一部に表示される。スパイクがランダムな間隔で発生すると仮定すると、スパイクを表示するには4,600点なら十分だ。次に、沸騰がしばらく進行して、水位が陰極と陽極より下に減って、電力がセルに流れなくなった。なのに沸騰は続いた。入力電力がないため、スパイクや偏位発生しないのに、沸騰が続いた。発熱は入力の実定エラーではない証拠だ。

熱伝達係数をいつどのように測定するかについての論争

マイルズがNHE 研究所で69日間の実験を行った時、彼とフライシュマンが計算した熱伝達係数に基づいて、実験は過剰熱を生み出したと結論付けた。NHE の他の研究者は、より低い熱伝達係数を計算し、過剰熱はないと結論付けた。

1989 年、カリフォルニア工科大学のルイス (N. Lewis) らは実験を行い、過剰熱は発生しなかったと判断した。最初は1つの熱伝達係数から始まり、それを繰り返して増加させて、合わせて14%上げたため、結果は常にゼロになった。フライシュマン、マイルズ、ノニンスキー (Noninski) などは、係数が同じままだった可能性が高く、14%の過剰熱があったことを指摘した。

どちらの場合も、研究者たちは係数の測定方法について意見が異なり、そして実験の進行中にいつそれを測定する必要があるか意見が異なった。これら2つのケースについて、以下で説明する。

フライシュマンとポンスは、実験を行う前に、まずプラチナ陰極を重水中の対照実験で熱伝達係数を測定する。重水は通常の水とはわずかに異なる熱質量と熱中性ポテンシャルを持っているので、通常の水での対照実験よりも少し正確だ。

重水とパラジウムを用いた本番の試験を開始するとすぐに、再び熱伝達係数を測定する。これは、「その場で」やりながらの校正と呼ばれる。彼らは通常、これを熱のパルスで行う (参考文献[20]、14~18 ページで説明)。パルス後、温度がパルス前と同

じレベルに戻る場合、パルスが1ワットあたりのセル温度の変化を明らかにすると想定する。これは、熱が安定している限り、過剰熱があってもうまくいく。パルスは過剰熱の上に現れる。

多くの研究者は、実験が始まった直後に入力電力1ワットあたりの温度を測定することによって、「その場」で校正する。一つの塊にまとまったパラジウムの資料で電気分解の常温核融合実験では、最初の数日でほとんど熱が発生しないため、この手法は間違いなく使える。したがって、過剰熱はなく、温度上昇は入力電力によってのみ発生する。これは、対照実験でのプラチナ陰極の場合と同じだ。ところで、まとまっていない資料、例えば薄膜状態のものか合金なら、このやり方はうまくいかない場合があり、短時間でロードされ、すぐに熱が発生し始める。NHEでマイルズが使用したパラジウムはホウ素と合金の陰極で、最初の日には熱をすばやく発生する場合がある。これは物事を複雑にする。

図3の例では、係数は $4.0^{\circ}\text{C}/\text{W}$ である。係数が分からないとする。実験がもう始まってから「その場」で測定したい。過剰熱がないと想定し、2W入力（図3のオレンジ色の点）で 11°C の温度差を測定する。熱伝達係数は $11^{\circ}\text{C} / 2\text{W} = 5.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ だと計算する。これは間違いだ。このような間違いを避けるために、一度だけではなく、実験を行う間中何回か下限熱伝達係数を測る必要がある。例えばこの値を測る：

日1目： 11.0°C で、2W入力、 $5.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 係数

2日目： 13.0°C で、3W入力、 $4.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 係数

3日目： 4.2°C 、1W入力、 $4.2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 係数

下限は $4.2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ である。過剰熱がない場合の係数だと想定する。1日目に戻って、これを適用する。 $2\text{W} \times 4.2^{\circ}\text{C}/\text{W} = 8.4^{\circ}\text{C}$; $11^{\circ}\text{C} - 8.4^{\circ}\text{C} = 2.6^{\circ}\text{C}$ 、つまり0.6W過剰となる。実際には、少しずれている。最後の測定では0.05Wの過剰熱があったことに気が付かなかったため、過剰熱を過小評価した。過剰熱がなかったら、温度は 4.2°C ではなく 4.0°C になる。

下限係数は、実験全体のゼロを設定する。ゼロ線を誤って0.05W上に上げてしまった。この方法は、過小評価している場合でも熱を過大評価することはないため、安全だ。ほとんどの熱伝達は放射によるものであるため、この方法はフライシュマンとポンスの熱量計でうまく機能する。したがって、値は純粋なステファン・ボルツマン係数よりも低くなることはない。もしそうなら、機器かデータ分析に何か問題がある。

この方法は、過剰熱がないと想定し、係数を1回だけ測定する場合はうまくいかない。NHEの研究者達がその間違いを犯した。実験の3日目に温度差を測定した。その日は余分な熱がないと思っていた。したがって、彼らが計算した下限熱伝達係数はマイルズとフライシュマンの値を下回った。3日目に熱があったことが分からなかった。さらに、抵抗ヒーターからの0.25Wを計算に入れることを忘れた。セルの熱量を過小評価した。フライシュマンは数年後に、詳細にNHEの研究者たちの計算に他のいくつかの間違いを指摘した。[9]

グラフで表すと、NHE の係数に問題があることははっきり目に見える。

マイルズは実験全体にわたって 5 分ごとに係数を測って、最低数は 61 日目にあったと分かった。図 10 の赤い丸で示されたデータ点だ。彼はその日の下限熱係数は $0.85065\text{E-}9 \text{ W/K}^4$ と計算し、それをすべてのデータに適用した。図 11 は、NHE 係数 $0.793504\text{E-}9 \text{ W/K}^4$ でグラフ化された同じデータを示している。この結果は不可能だ。これは、セルが数日過剰熱を発生し、他の日に熱不足（吸熱反応）を示している。これらの正、および負、出力の偏位の正味の結果はほぼゼロだ。正味の余分な熱は発生されなかった。これらの条件下では吸熱反応が不可能であるため、NHE の研究者たちは、熱量計に問題があるか、フライシュマンが推奨する方法論に問題があると結論付けた。彼らはマイルズが過度の熱を観察しなかったと結論付けた。

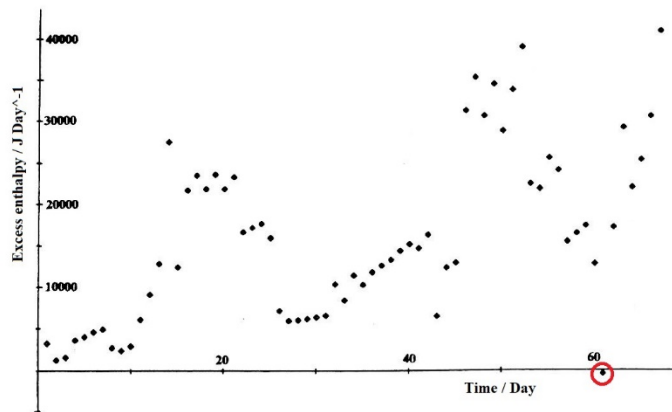


図 10. NHE にフライシュマンの ICARUS 方法論の指示に基づいて下限熱係数を使用して計算された NHE 実験の過剰エンタルピー。61 日目のデータ点（赤い円）はゼロ線にあり、過剰熱はその日なかった。

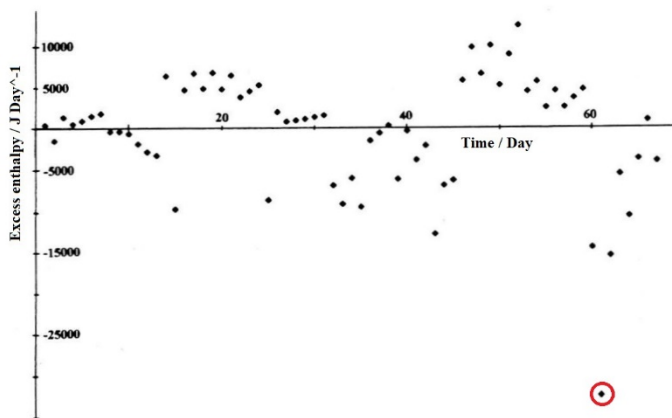


図 11. NHE 手順を使用した過剰エンタルピー。61 日目のデータ点（赤い円）は、負の 30,000 J を示し、これは不可能である。言い換えれば NHE 係数により、ゼロ線は 30,000 J 高すぎる。

常温核融合の歴史の早い段階で、ルイスは同様の間違いを犯した。[43] ゼロ線を繰り返して上げた。同じ入力電力で温度が徐々に 14% 増加したが、過剰熱が原因であると想定する代わりに、熱伝達係数が増えていると想定した。テストの開始時に、1

W で温度が 14.0°C 上昇したが、後に 15.9°C で上昇したと考えた。ルイスは係数の変化を説明した：

我々は…これらのセルからの熱損失率の突然または段階的な変化が時々観察され、それはおそらくガス発生速度およびガス発生形態の変化に起因する。これらの変化はしばしばセルの持続的な温度上昇をもたらした（過剰なエンタルピー発生開始だと解釈される可能性がある）が、この期間中の電気抵抗法による再校正は、Pd 棒の報告された活性化期間を超えた後でも異常な出力発生証拠を示さなかった。

ルイスは、この変化はガス発生の変化によるものと推定したが、ガスの流れを測定したり、電解液の損失を測定したりすることでそれを確認しようとはしなかった。彼が行った過剰熱の再校正では、常温核融合の熱は電流密度に正確に比例し、電流密度の変化に即座に反応すると仮定した。過剰熱を探すために、電気分解の入力電力（したがって電流密度）を減らし、同じレベルの抵抗加熱電力を追加して補償した。セルに入る総電力は同じだった。電流密度の低下に応じて異常熱の減少を期待した。それを観察しなかった。気温は下がらなかった。しかし、彼の仮定は間違っていた。常温核融合の熱は必ずしも電流密度に正確に比例して常に応答するとは限らない。応答しても即応するとは限らない。場合によっては、電源を切ってから数時間、死後の暑さが続く。電流密度が低下した後、常温核融合の熱の発生が同じレベルで継続する場合には、ルイスの確かめ方ではその発生を明らかに出来ない。

マイルズはこれを技術用語で説明した：[12]

$P'_{EL} + P'_{re} \approx P_{EL}$ によるルイスの実験的観察は、過剰な出力がないことを証明することはできず $P_X - P'_X \cong 0$ のみを証明する。つまり、 P_X の変化は、電解電力の一部が抵抗器電力に置き換えられる。表 2 から、興味深いことに、ルイスの研究でセル温度を一定に維持するために必要な入力電力 ($P'_{EL} + P'_{re}$) は、高い電流密度での実験では常に小さくなっている。この効果は、電流密度とともに増加する異常な過剰出力の存在と一致し、Fleischmann らによって報告された規模の反応に近いものだ。

マイルズはまた別の論文でこう書いた：[22]

Caltech（カリフォルニア工科大学）のレポートの最も不安な側面は、Pd / D₂O + 0.1 M LiOD 実験の加熱係数が時間とともに増加したことだ。14.7 時間目では 14.0 KW⁻¹ (0.0714 WK⁻¹)、115.0 時間目では 15.9 KW⁻¹ (0.0629 WK⁻¹) まで増えている。これは、13.6% の過剰出力効果としても係数の変化ほど容易に解釈できる。Caltech での Pd / H₂O + 0.1 M LiOH の実験では、より低い加熱係数 ($h = 12.5 \pm 0.7 \text{ KW}^{-1}$) が得られたが、時間とともにこの大きな増加は見られなかった。14.0 KW⁻¹ の一定の h 値を使うと、電解時間とともに過剰出力が最大 76 mW 増加したことになる。この分析によって、ルイスの研究結果は 1.0 W/cm³ Pd の過剰熱の密度となるが、同様の電流密度を使用した他の F-P 実験で報告された過剰熱に非常に近く一致している。

私はこの事をより簡単に要約した：[44]

ルイスは、フライシュマンなどが同様の材料と電気化学的条件で行ったのと同じレベルの過剰熱を観察した可能性がある。しかし、ルイスは 14%の過剰熱があったと結論付ける代わりに、装置が 14%変更されたと結論付けた。変更された可能性のある理由を明記せず、変更を確認せず、機器のエラーの原因を特定する再校正テストも実行しなかった。

マローブ (Mallove) はそれを最もよく説明した：

ゼロに調整するときに体重計に立ってはいけない。

フライシュマン、マイルズなどは、Nature の編集者リンドリー (Lindley) にこれらの問題を投書で指摘した。ノニンスキーは他の問題も発見した。リンドリーは、「助言」のためにルイス自身に批判を送ったと言う。つまり、自分の論文に対する批判を受け入れるか拒否するかをルイスに尋ね、ルイスは自分の論文は問題がないと判断した。これは、査読の処理の方法と程遠いやり方だ。

読者はどうぞ、[ルイス、リンドリー、フライシュマンなどのコメントを読んで](#)、自分で判断することをお勧めする。

謝辞

マイルズとジョン・ポール・ビベリアンの有益な提案と修正に感謝します。二人とも ICARUS 熱量計を使用した実践的な経験が豊かで、熱量測定とその結果を説明する多くの優れた論文を書いています。ストームズ (Edmund Storms) も有益な提案をしてくださったことに感謝します。訂正と中国語翻訳して下さった張武寿 (Zhang Wu-shou) に感謝します。

付録 A。18 世紀と 19 世紀の熱量計で常温核融合の効果を測定できただろうか

マーティン・フライシュマンは、彼らの熱量測定方法は 1840 年代に J. P. ジュールによって開発されたと述べた。ジュールは電気抵抗ヒーターからの熱を測り、ジュールの法則（熱=電流²×抵抗）を発見した。[23] 彼は後に電解からの熱も測定した。フライシュマンとポンスも後に常温核融合の実験で同様に電解の熱を測定した。

ジュールの熱量計で常温核融合を検出できたのだろうか、私はフライシュマンのコメントには考えさせられた。私はジュールのセルに似たものを試してみた（図 12）。ジュールは、周囲温度の変化に苦労した。私は 19 世紀の模擬環境条件にするために春の天候の時は家の窓やドアを開けっぱなしにして、周囲の温度を制御しなかった。

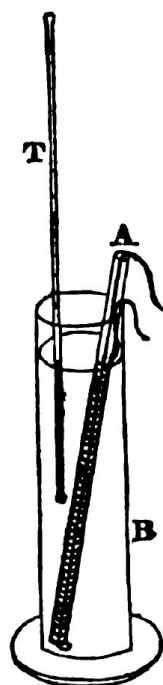


図 12。J. P. ジュールがジュールの法則を確立するために使用したセル。A：針金のコイル（抵抗ヒーター）；B：部分的に水で満たされたガラス瓶；T：温度計。

私は 0.1℃精度のサーミスタとアナログ電圧計と電流計を使った。電源は、1.1～4.0 W、五つのレベルに設定した。それを数回、各レベルに設定し、周囲温度とセル温度を測定してから、セルと周囲空気の間平均温度差を計算した（表 1）。図 2（上）は 1.1 W と 1.7 W での較正を示し、図 3 は較正曲線を示す。

表 1. 単純な熱量計の結果、平均温度差

入力電力 (W)	温度差 (°C)	度/ワット	ワット/度
1.1	4.4	4.091	0.244
1.7	7.1	4.177	0.239
2.4	9.7	4.042	0.247
3.2	12.3	3.844	0.260
4.0	15.2	3.800	0.251
	平均：	3.991	0.251

J. P. ジュールは、制御されていない周囲温度の変化について「実験が行われたさまざまな日の間、部屋の空気を同じ静かな状態、湿度測定などの状態に保つことの難しさ」を報告した。ジュールの温度計は、私の温度計より 2 倍の感度で、0.1°F の精密さで測られた。ジュールは、等周熱量測定ではなく、断熱熱量測定を使用した。他の点では、彼の実験はフライシュマンとポンスに似ていた。

私は、自分で拵えた粗い装置でも、ジュールの 1841 年の装置でも、多くの常温核融合反応を確実に検出できただろうと結論付けた。これらの計測器は 1 W の信頼限界を持って測定できると確信して、おそらく ~0.5 W は測れる。ストームズは 124 の特に成功した実験を見て、1 W を超える 84 例、0.5 W を超える 20 例があると指摘した。[45]

言うまでもなく、フライシュマンとポンスの熱量計は、ジュールの測定器や私の粗い測定器よりもはるかに正確で精密だった。私は周囲の温度を意図的に 2°C だけ変化させた。彼らは恒温水槽 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以内に制御した。NIST 温度計に対して校正された、年間 0.02% の安定性を持つ高安定性サーミスタを利用した。したがって、ミリワット程度で確実に測定できた。彼らの分析は、私の第一近似よりも比較にならないほど正確で複雑だった。彼らは第一原理に基づいていたのに対して、私は中学校の教科書の近似を使った。

このテストの理由の一つは、この効果を検出するのが非常に難しいと主張する懐疑論者を反駁するためである。私は、過去 150 年の間に有能な科学者が多くの常温核融合反応を検出できた可能性があったと主張した。実際、多くの反応は、1780 年にラヴォアジエ (Lavoisier) とラプラス (Laplace) によって作られた最初の近代的な熱量計で測定できた可能性がある。これは氷の熱量計だった。[13] それを使ってモルモットの代謝を測定し、代謝熱の二酸化炭素産生は燃焼によるものと同じ比率であることを確認した。モルモットからの熱は 10 時間で 447 g の水を溶かした。これは 149,097 J の熱放出

だ。10 時間で除算すると 3.91 W である。¹⁴これは、現代のモルモットの代謝の推定値である 2.67 W に近い値だ。[46] 水を精度 4 g (1 ドラクメ) で測定した。したがって、測定できる最小の発熱量は $4 \text{ g} \times 333.55 \text{ J/g} = \sim 1,334 \text{ J}$ だった。10 時間で溶湯が 4 g しかなかったとしたら、蒸発して正確な測定が難しかったと思う。でも、1 時間 (3,600 秒) で 4 g ならほとんど問題なく測定できただろう。例えば $1,334 \text{ J} / 3,600 \text{ 秒}$ 、つまり 0.37 W に出力を測定できたと思われる。これは当時として非常に正確である。1 W を超える常温核融合熱の反応を確認するのに十分だろう。

シェル石油の研究者たちは、感度はより高いものの、ヴォアジエの氷熱量計に似た装置を作って、常温核融合反応からの熱を測定した。[47]

付録 B. 常温核融合への非科学的な反対

常温核融合に対する多くの非科学的な反対意見が出されている。最も一般的なのは、プラズマ核融合のような放射線を生成しないため、理論に違反している、したがって、核融合ではあり得ないので、実験の間違いに違いないという反対意見だ。これは科学的方法をひっくり返している。科学の基本的な規則は、実験が唯一の真実の基準であることだ。実験は現象を定義する。実験によって常温核融合は化学反応ではないと分かる。セルに化学燃料がないし、セルは化学反応の何千倍も発熱する。それにプラズマ核融合と同じ比率で熱にヘリウムを生成する。放射線を発生しないため、プラズマ核融合と同じ反応モードではないと分かる。

確かに、実験は信頼できる前に高い信号対雑音比で広く再現しなければならない。常温核融合がもし 1 回限り報告されたのなら信じられない。しかし、実験は 180 以上の研究所で何百回も再現されている。[45] これらの実験が物理法則と矛盾しているとしたら、それは法則が正しくないことを意味するだけだ。

実験が実際に理論と矛盾するかどうかは未解決の問題だ。理論家の仲間には、そうだと述べている人が多いけれども、ジュリアン・シュウィンガー (Schwinger) やピーター・ヘーゲルスタイン (Hagelstein) などそうではないと述べた。いずれにせよ、理論は再現された実験を拒否する根拠にはならない。

1989 年に常温核融合を却下した DoE の ERAB パネルの責任者であるジョン・フイゼンガー (John Huizenga) は、彼が書いた本の結論を 6 つの論点にまとめた。[48、49] 論点 5 は、実験が何を示しても原子核理論に違反する可能性がないことだ。したがって、論点 6 は、効果が核になり得ず、そして化学の反応にもなり得ないため、すべての常温核融合が過熱結果はエラーで違いない：

¹⁴ モルモットは氷の熱量計の中にいたため、寒かったのでいつもより体温が高くなったのかもしれない。しかし、氷に包まれた巣の中にいたので「動物はこれらの実験で苦しんだ様子はなかった」とラヴォアジエとラプラスは報告した。

5. 報告された核生成物の強度が主張された過剰熱よりも桁違いに小さい場合、過剰熱は核反応プロセスによるものではない。

6. さらに、主張された過剰熱が他の従来のプロセス（化学的、機械的などの出力）で可能な熱を超える場合、過剰熱の測定にエラーが発生したと結論せざるをえない。

フィゼンガーは実験で技術的な誤りを示す義務を感じなかった。核理論の解釈に基づいて、結果は間違っていたに違いないと主張した。ビアウデッテ（Beaudette）は論点 5 と 6 を要約した：[50]

論点 5 では、フィゼンガーは未知のプロセスの存在の可能性を、彼のプレゼンテーションの論理のどこにも入れないようにすることによって暗黙的に否定している。欠けている要素に気付かない読者にとって、彼の発言はその分野についての広範な混乱につながる。

最後の論点 6 は論点 5 と密接に結び付いている。5 は従来の核融合源の可能性を否定し、6 は非核エネルギー源の可能性を否定する。ほら、ご覧！異常な熱は存在していない。

論点 5 と 6 が合わせて主張するのは、原子核測定は科学であり、熱量測定は科学ではないということだ。彼らの測定値を捨てて、私のものを保管してくれと。科学では、これらの文章ほど、より狭く、より偏狭な自分の専門分野の見方があるだろうかと思う。

科学的な方法については、多くの混乱した概念がある。たとえば、誰でも簡単に再現できるようになるまで実験は受け入れられないという考えだ。それどころか、多くの実験は非常に困難で、専門家によってのみ再現できる。たとえば、次の一連のトカマクプラズマ核融合実験では、数十億ドル規模の施設である ITER 原子炉で作業する何千人もの専門家が必要になる。世界の他の施設はこれらの実験を行うことができない。それにもかかわらず「再現が非常に難しいため、プラズマ融合が存在しない」と主張する人はいない。関連している考えだが、再現がほぼ常に成功しない限り、実験は受け入れられないということだ。しかし、トランジスタが多く故障した 1950 年代初頭に、トランジスタが存在していないと誰も言わなかっただろう。あるいは、ロケットがほとんどどれも飛ばずに爆発した 1950 年代後半にロケットは本物でないと誰も言わなかった。あるいは、クローン技術が始まったころ、動物が 1000 匹に 1 匹しか生まれなかったことによってクローン動物は存在しないと言わなかった。トップクォークを 1 つ生成するのにかかる 200 億の陽子-反陽子衝突を数えると、トップクォークを見つける失敗率は天文学的に高い。

批判者は、特に 2004 年の DoE レビューで、他にも多くの論理的な誤りを犯した。ロスウェル（Rothwell）とミレッチ（Melich）は、最も重大な 14 間違いのリストを作成した。[51]

付録 C。[k_R'] 熱伝達係数フォーマット

フライシュマンとポンス は、[k_R']の表記を頻繁に使う。ここで、「R」は放射熱伝達係数で、2 又は 3 の添え字が付けられている：[k_R']_{i,j,l}で、下付き文字は次のことを意味する：

i 分析方法。1 = 微分解析；2 = 後方統合；3 = 前方統合

j この記号があれば：測定サイクルの期間。下付き文字が 2 つしかない場合この項は含まれない。

j = 5、原点より少し上の期間

j = 6、*t*₁ より少し上の期間[校正パルスの適用]

j = 7、*t*₂ より少し上の期間[校正パルスの停止]

j = 8、*j* = 6 と *j* = 7 の期間の組み合わせ

l 1 = 下限の値を示す；2 = 本当の値

例として：

[k_R']₁₁：微分解析、下限を示す。

[k_R']₂₆₂：後方統合、期間 6、本当の値を示す。

k_R'の項の上に一本の棒がある場合、11 のデータ一点の平均値であることを示す。値は 5 分ごとに測定する場合に 55 分間の平均値（11×5=合計 55 分）：

$$\overline{k_R'}$$

他の論文で利用されている二重棒は、二重平均を示している。つまり、11 のデータ一点の平均を 6 つ合わせて合計する（55×6=合計 330 分）：

$$\overline{\overline{k_R'}}$$

出典：Miles, M., M. Fleischmann, and M.A. Imam, [*Calorimetric Analysis of a Heavy Water Electrolysis Experiment Using a Pd-B Alloy Cathode*](#) 2001, Washington: Naval Research Laboratory, pages 4-5. 平均値は 12 ページで説明されている。

参考文献

1. Fleischmann, M., S. Pons, and M. Hawkins, *Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium*. J. Electroanal. Chem., 1989. **261**: p. 301 and errata in Vol. 263 <http://lenr-canr.org/acrobat/Fleischmanelectroche.pdf>.
2. McKubre, M.C.H., et al. *Concerning Reproducibility of Excess Power Production*. in *5th International Conference on Cold Fusion*. 1995. Monte-Carlo, Monaco: IMRA Europe, Sophia Antipolis Cedex, France <http://lenr-canr.org/acrobat/PonsSproceeding.pdf#page=31>.
3. Fleischmann, M., et al., *Calorimetry of the palladium-deuterium-heavy water system*. J. Electroanal. Chem., 1990. **287**: p. 293 <http://lenr-canr.org/acrobat/Fleischmancalorimetr.pdf>.
4. Fleischmann, M. and S. Pons, *Calorimetry of the Pd-D₂O system: from simplicity via complications to simplicity*. Phys. Lett. A, 1993. **176**: p. 118 <http://lenr-canr.org/acrobat/Fleischmancalorimetra.pdf>.
5. Pons, S. and M. Fleischmann. *Heat After Death*. in *Fourth International Conference on Cold Fusion*. 1993. Lahaina, Maui: Electric Power Research Institute 3412 Hillview Ave., Palo Alto, CA 94304 <http://lenr-canr.org/acrobat/PonsSheatafterd.pdf>.
6. Roulette, T., J. Roulette, and S. Pons. Results of ICARUS 9 Experiments Run at IMRA Europe. in *Sixth International Conference on Cold Fusion, Progress in New Hydrogen Energy*. 1996. Lake Toya, Hokkaido, Japan: New Energy and Industrial Technology Development Organization, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan <http://lenr-canr.org/acrobat/RouletteTresultsofi.pdf>.
7. Miles, M., NEDO Final Report - Electrochemical Calorimetric Studies Of Palladium And Palladium Alloys In Heavy Water. 2004, University of La Verne <http://lenr-canr.org/acrobat/MilesMnedofinalr.pdf>.
8. Miles, M., *Report on Calorimetric Studies at the NHE Laboratory in Sapporo, Japan*. Infinite Energy, 2000. **5**(30): p. 22 <http://lenr-canr.org/acrobat/MilesMreportonca.pdf>.
9. Miles, M., M. Fleischmann, and M.A. Imam, *Calorimetric Analysis of a Heavy Water Electrolysis Experiment Using a Pd-B Alloy Cathode*. 2001, Naval Research Laboratory <http://lenr-canr.org/acrobat/MilesMcalorimetrd.pdf>.
10. Miles, M., M.A. Imam, and M. Fleischmann. *"Case Studies" of Two Experiments Carried Out With the ICARUS Systems*. in *8th International Conference on Cold Fusion*. 2000. Lerici (La Spezia), Italy: Italian Physical Society, Bologna, Italy <http://lenr-canr.org/acrobat/MilesMcasestudie.pdf>.
11. Mosier-Boss, P.A. and M. Fleischmann, *Thermal and Nuclear Aspects of the Pd/D₂O System (2)*, ed. S. Szpak and P.A. Mosier-Boss. Vol. 2. Simulation of the Electrochemical Cell (ICARUS) Calorimetry. 2002: SPAWAR Systems Center, San Diego, U.S. Navy <http://lenr-canr.org/acrobat/MosierBossthermalanda.pdf>.
12. Miles, M. and B.F. Bush. *Calorimetric Principles and Problems in Pd-D₂O Electrolysis*. in *Third International Conference on Cold Fusion, "Frontiers of Cold Fusion"*. 1992. Nagoya Japan: Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan <http://lenr-canr.org/acrobat/MilesMcalorimetr.pdf>.

13. Hemminger, W. and G. Hohne, *Calorimetry Fundamentals and Practice*. 1984: Verlag Chemie.
14. Miles, M. and M. Fleischmann. *Precision and Accuracy of Cold Fusion Calorimetry (paper and PowerPoint slides)*. in *233rd ACS National Meeting*. 2007. Chicago, IL <http://lenr-canr.org/acrobat/MilesMprecisiona.pdf>.
15. Lonchamp, G., L. Bonnetain, and P. Hieter. *Reproduction of Fleischmann and Pons Experiments*. in *Sixth International Conference on Cold Fusion, Progress in New Hydrogen Energy*. 1996. Lake Toya, Hokkaido, Japan: New Energy and Industrial Technology Development Organization, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan <http://lenr-canr.org/acrobat/LonchampGreproducti.pdf>.
16. Lonchamp, G., et al. *Excess Heat Measurement with Pons and Fleischmann Type Cells*. in *The Seventh International Conference on Cold Fusion*. 1998. Vancouver, Canada: ENECO, Inc., Salt Lake City, UT <http://lenr-canr.org/acrobat/LonchampGexcessheata.pdf>.
17. Personal communication, 2020.
18. Personal communication, 2020
19. Fleischmann, M. and S. Pons, Reply to the critique by Morrison entitled 'Comments on claims of excess enthalpy by Fleischmann and Pons using simple cells made to boil. Phys. Lett. A, 1994. **187**: p. 276 <http://lenr-canr.org/acrobat/Fleischmanreplytothe.pdf>.
20. Fleischmann, M. and M. Miles, Letters from Martin Fleischmann to Melvin Miles. 2018, LENR-CANR.org <http://lenr-canr.org/acrobat/Fleischmanlettersfroa.pdf>.
21. Personal communication, 2020.
22. Miles, M. and M. Fleischmann. Isoperibolic Calorimetric Measurements of the Fleischmann-Pons Effect. in ICCF-14 International Conference on Condensed Matter Nuclear Science. 2008. Washington, DC <http://lenr-canr.org/acrobat/MilesMisoperibol.pdf>.
23. Joule, J.P., *On the Heat evolved by Metallic Conductors of Electricity, and in the Cells of a Battery during Electrolysis*. Philosophical Magazine, 1841. **19**(124): p. 260 <https://books.google.com/books?id=hJEOAAAIAAJ&pg=PA260#v=onepage&q&f=false>.
24. Park, R.L., BOOK WORLD The Fizzle in the Fusion, in Washington Post. 1991.
25. Mallove, E., *Classic Nasty, Incompetent, and Stupid Statements About Cold Fusion*. 1991 <http://lenr-canr.org/acrobat/MalloveEclasscnas.pdf>.
26. Shanahan, K., Comments on Thermal behavior of polarized Pd/D electrodes prepared by co-deposition. Thermochim. Acta, 2005. **428**: p. 207.
27. Shanahan, K., A Critique of the Student's Guide To Cold Fusion. 2003, LENR-CANR.org <http://lenr-canr.org/acrobat/ShanahanKacritiqueo.pdf>.
28. Shanahan, K., *A Possible Calorimetric Error in Heavy Water Electrolysis on Platinum*. Thermochim. Acta, 2002. **387**(2): p. 95-101 <http://lenr-canr.org/acrobat/ShanahanKaposiblec.pdf>.
29. Shanahan, K., Reply to 'Comment on papers by K. Shanahan that propose to explain anomalous heat generated by cold fusion,' E. Storms. Thermochim. Acta, 2005. **441**: p. 210.

30. Morrison, D.R.O., Comments on claims of excess enthalpy by Fleischmann and Pons using simple cells made to boil. *Phys. Lett. A*, 1994. **185**: p. 498.
31. Storms, E., *Comment on papers by K. Shanahan that propose to explain anomalous heat generated by cold fusion*. *Thermochim. Acta*, 2006. **441**: p. 207-209 <http://lenr-canr.org/acrobat/StormsEcommentonp.pdf>.
32. Marwan, J., et al., *A new look at low-energy nuclear reaction (LENR) research: a response to Shanahan*. *J. Environ. Monit.*, 2010. **12**(9): p. 1765-1770 <http://lenr-canr.org/acrobat/MarwanJanewlookat.pdf>.
33. Storms, E. Measurement of Excess Heat from a Pons-Fleischmann Type Electrolytic Cell. in Third International Conference on Cold Fusion, "Frontiers of Cold Fusion". 1992. Nagoya Japan: Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan <http://lenr-canr.org/acrobat/IkegamiHthirdinter.pdf#page=32>.
34. McKubre, M.C.H., et al., *Isothermal Flow Calorimetric Investigations of the D/Pd and H/Pd Systems*. *J. Electroanal. Chem.*, 1994. **368**: p. 55 <http://lenr-canr.org/acrobat/McKubreMCHisothermala.pdf>.
35. Miles, M., B.F. Bush, and K.B. Johnson, Anomalous Effects in Deuterated Systems, Final Report. 1996, Naval Air Warfare Center Weapons Division <http://lenr-canr.org/acrobat/MilesManomalousea.pdf>.
36. ENEA, *COLD FUSION The History of Research in Italy*, ed. A. Rosati, F. Scaramuzzi, and V. Violante. 2009, Rome, Italy: ENEA <http://lenr-canr.org/acrobat/ENEAcoldfusion.pdf>.
37. McKubre, M.C.H. *Cold Fusion (LENR) One Perspective on the State of the Science*. in *15th International Conference on Condensed Matter Nuclear Science*. 2009. Rome, Italy: ENEA <http://lenr-canr.org/acrobat/McKubreMCHcoldfusionb.pdf>.
38. For example, Bill Nye said this in an interview on Fox News, June 19, 2020. Bill Nye 'The Science Guy' reveals funny encounters with fans, how many bow ties he owns. <https://www.foxnews.com/entertainment/bill-nye-the-science-guy-bow-ties-exploravision>
39. Mallove, E., *Fire From Ice*. 1991, NY: John Wiley <http://lenr-canr.org/acrobat/MalloveEfirefromic.pdf>.
40. Taubes, G., *Bad science. The short life and weird times of cold fusion*. 1993, NY: Random House.
41. Dardik, I., et al. Ultrasonically-excited electrolysis Experiments at Energetics Technologies. in ICCF-14 International Conference on Condensed Matter Nuclear Science. 2008. Washington, DC <http://lenr-canr.org/acrobat/DardikIultrasonic.pdf>.
42. Kreysa, G., G. Marx, and W. Plieth, *A critical analysis of electrochemical nuclear fusion experiments*. *J. Electroanal. Chem.*, 1989. **266**: p. 437.
43. Lewis, N.S., et al., Searches for low-temperature nuclear fusion of deuterium in palladium. *Nature (London)*, 1989. **340**(6234): p. 525.
44. Rothwell, J., How Nature refused to re-examine the 1989 CalTech experiment. 2012, LENR-CANR.org <http://lenr-canr.org/acrobat/RothwellJhownaturer.pdf>.
45. Storms, E., *The Science Of Low Energy Nuclear Reaction*. 2007: World Scientific Publishing Company <http://lenr-canr.org/acrobat/StormsEthescience.pdf>.

46. Poczipko, P., *Metabolic Rate and Body Size Relationships in Adult and Growing Homeotherms*. Acta Theriologica, 1979. **24**(12)
<https://core.ac.uk/download/pdf/194219985.pdf>.
47. Dufour, J., et al. A simple calorimetric method to avoid artifacts in a controversial field: The ice calorimeter. in ICCF-14 International Conference on Condensed Matter Nuclear Science. 2008. Washington, DC <http://lenr-canr.org/acrobat/DufourJasimplecal.pdf>.
48. ERAB, Report of the Cold Fusion Panel to the Energy Research Advisory Board. 1989
<http://lenr-canr.org/acrobat/ERABreportofth.pdf>.
49. Huizenga, J.R., *Cold Fusion: The Scientific Fiasco of the Century*. 1992, Rochester, NY: University of Rochester Press.
50. Beaudette, C.G., *Excess Heat: Why Cold Fusion Research Prevailed*. 2002, Concord, NH: Oak Grove Press <http://lenr-canr.org/acrobat/BeaudetteCexcessheat.pdf>.
51. Rothwell, J. and M.E. Melich, Responses to DoE Review Panel Comments. 2008, LENR-CANR.org <http://lenr-canr.org/acrobat/RothwellJresponsest.pdf>.