

小特集

凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱

Anomalous Heat Generation Due to Hydrogen Diffusion in Condensed Matter

1. はじめに

1. Introduction

岩村 康弘

IWAMURA Yasuhiro

横浜市立大学

(原稿受付：2025年3月17日)

1.1 発端：重水の電気分解

凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱に関する研究が最近注目されてきている。この分野は、1989年のフライシュマンとポنزが行った、Pdと重水の電気分解による“Cold Fusion”[1]に端を発する。フライシュマンとポنزの発表後、Pdと重水を用いた電解法を用いた多くの実験が行われたが、現象の再現性の低さや研究資金不足のため、この分野の研究者は減少していった。一方で、国際会議や国内研究会は定期的に開催されていた。

1.2 様々な研究手法

電気分解ではなく、ガス吸蔵によって水素・重水素が金属に吸収される際の異常発熱や核変換を研究する研究者が現れ始めた。既に1989年から、ガス吸蔵型実験が開始されている[2]。また、Pd-重水素系でなく、Ni-水素系でも大きな発熱が観測されるとの報告が出てきた。まず、Ni電極を用いた軽水の電気分解による異常熱の発生や[3]、Niと水素ガスによる発熱[4]である。また、Pdのナノ粒子ナノスケールの物質が異常発熱の発現に重要である可能性を示唆する長時間発熱の結果[5]や重水素ガスがナノ構造のPd-CaO多層薄膜を透過することによって誘起される核変換反応の観測[6]など、ナノスケールの材料を用いることで現象の再現性が向上してきた。

1.3 研究の再活性化

現在では、世界のベンチャー企業の参入が続き、ナノ構造の金属複合材料と水素ガスからなる実験系における異常な発熱現象の研究が主流となってきた。図1に示すように、“Cold Fusion”とCondensed Matter Nuclear Science

(CMNS)の最も大きな違いは、材料と作動温度にある。Pdや重水素は高価であるが、最近ではNiや通常の水素が使われるようになっており、これは実用化を考えた場合メリットである。またPdによる重水電気分解は室温レベルでの発熱あるのに対し、最近のNi系材料は数百℃レベルで水素を吸収するため、数百℃領域で発熱し、高温ガスでタービンを回すことが可能になり、産業応用に有利になった。また、体に影響を与える強いガンマ線や中性子は、異常発熱時には観測されていない。

1.4 国家プロジェクト研究

上記のような状況から、日本では2015年から2017年にかけて、テクノバ、神戸大、東北大、名古屋大、九州大、日産自動車の研究者が参加するNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）プロジェクトが実施された[7]。最近、EU政府は2020年から始まる2つのプロジェクト（総額1000万ユーロ）を実施中で、米国政府は、

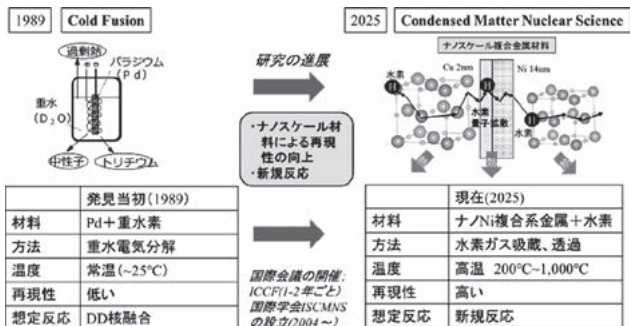


図1 凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱反応に関する研究の進展。

2023年2月に1000万ドルの国家プロジェクトを開始した。このプロジェクトではMIT（マサチューセッツ工科大学）等の7つの研究機関が米国エネルギー省の先端研究計画局（ARPA-E：Advanced Research Projects Agency-Energy）から資金提供を受けて参加している。

参考文献

- [1] M. Fleischmann and S. Pons, J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem **261**, 301 (1989).
- [2] A. De Ninno *et al.*, Europhys. Lett. **9**, 221 (1989).
- [3] R. Mills *et al.*, Fusion Technol. **20**, 65 (1991).
- [4] S. Focardi *et al.*, Il Nuovo Cimento A (1971–1996) **111**, 1233 (1998).
- [5] Y. Arata *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **37**, 1274 (1998).
- [6] Y. Iwamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 4642 (2002).
- [7] A. Kitamura *et al.*, Int. J. Hydrogen Energy **43**, 16187 (2018).

小特集 凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱

2. ナノ構造複合金属薄膜からの異常発熱と試料分析

2. Anomalous Heat Generation from Nanostructured Composite Metal Thin Films and Sample Analysis

岩村 康弘

IWAMURA Yasuhiro

横浜市立大学

(原稿受付：2025年3月17日)

ナノ構造複合金属薄膜中における水素拡散による既知の化学反応では説明できない異常な発熱現象の研究について概説する。Ni ベースのナノ構造多層金属複合材料に水素ガスを吸蔵させ、急速に加熱することで水素を拡散させると発熱現象が誘発される。吸収水素あたりの放出エネルギーは化学反応で説明できない10 keV/H 以上であったが、人体に有害なガンマ線や中性子は観測されなかった。実験後の試料を分析すると異常発熱現象を起こした試料には酸素濃度が非常に高い領域が観察されるという共通の特徴が見られた。この酸素の起源については、今後研究を積み重ねていく必要がある。

Keywords:

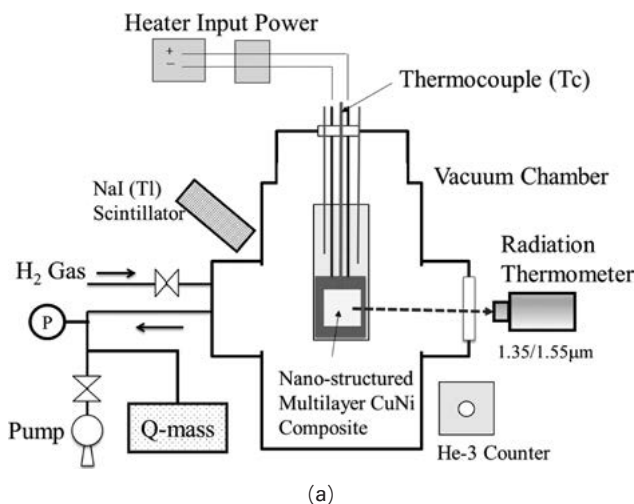
anomalous heat, excess heat, heat burst, hydrogen gas, gas loading, nickel, copper, multilayer thin film, nano-sized metal composite, condensed matter nuclear science.

2.1 これまでの実験と得られた結果

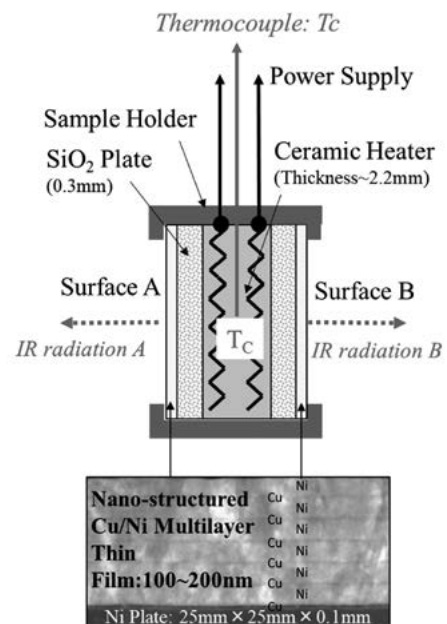
2.1.1 実験方法

図1に実験方法を示す。図1(a)は実験装置全体の概略図、図1(b)はナノ構造多層Ni複合材料近傍の拡大図である[1-5]。まず、25 mm角の厚さ0.1 mmのNi板を洗浄し、図1(b)の下部に示すように、マグネトロンスパッタリングまたはイオンビームスパッタリングによりナノ構造多層金属複合体を形成した。作製した2つの試料を図1(b)上部のセラミックヒーターの両側に置き、試料ホルダーで固定した。図1(a)に示す真空チャンバー内に試料ホルダー

を設置した。真空チャンバー内には、試料温度測定装置と γ 線、中性子、質量分析計が設置されている。これまでのところ、発熱現象に伴う有意な γ 線や中性子の放出は観測されていない。この実験手法は従来のPd-D系と異なり、低コストのNi-H系でありさらに作動温度が高いというメリットがある。



(a)



(b)

図1 実験装置の概要：(a)装置の構成、(b)ナノ構造多層金属複合材料周辺の詳細図。

Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University Yokohama, KANAGAWA 236-0027, Japan

author's e-mail: iwamura.yasu.ze@yokohama-cu.ac.jp

2.1.2 実験手順と異常発熱の例

異常発熱の例を図2に示し、この図で実験手順について述べる。図においてEX Powerは過剰熱で試料から放出された熱から入力電力を差し引いたもので、過剰に発生したという意味で過剰熱と呼んでいる。過剰熱は、同じ入力電力に対するバルクNiとナノ構造Ni複合材の熱電対温度の差に基づいて評価される。チャンパーが真空状態にあり、Niバルクとナノ構造Ni複合材の放射率がほぼ同じであるため、過剰熱を評価することができる。解析の仮定や詳細は文献[1]–[5]を参照して頂きたい。また、このデータは熱電対温度から過剰熱を評価しているが、試料から放出される光のスペクトルを計測し、そこから過剰熱を評価してもほぼ同程度の過剰熱が得られている[6, 7]。

実験では、まず、ナノ構造多層Ni複合材料ホルダーを真空チャンパー内に設置する。次に、試料温度を上昇させてベーキングを行い、試料表面の水分や炭化水素などを除去する。その後、チャンパー内に水素を導入した。図2の時刻0において水素は約210 Paで導入され、チャンパー内の圧力は時間とともに低下した。これは、水素が2つの試料に吸収されたことを示している。その後、約 6×10^4 秒後に水素を排出し、同時にヒーターに19 Wの電力を印加した。その後、ヒーターの温度が上昇し、Niバルクに吸収された水素がナノ構造のCuとNiを通して表面に向かって拡散し始めた。この水素の拡散プロセスが異常発熱反応を引き起こすと考えられる。最初の期間に約3.2 Wの過剰熱が観測されており、19 Wの入力に対して約22 Wの熱が試料から放出されたことを意味する。約 9×10^4 秒でヒーターを止め、再び水素を真空容器に導入した。チャンパー圧力は徐々に低下し、約 1.5×10^5 秒後に再び水素を排気し、8.9 Wの投入電力を加えた。このとき、約1.4 Wの過剰熱が観測された。

図2の場合の放出エネルギーの評価を表1にまとめた。吸収された水素（圧力変化から算出）の総量と放出されたエネルギーの総量は、実験結果から計算できる。吸収された水素のほとんどは、単に吸収された後、排出されるだけであるため、発熱反応に寄与するとは考えにくい。過大評価を避けるため、放出されたエネルギーの総量を吸収された水素の総量で割ると、12 keV/Hとなる。化学反応は通常eV/Hのオーダーであるため、4桁も高い。したがって、

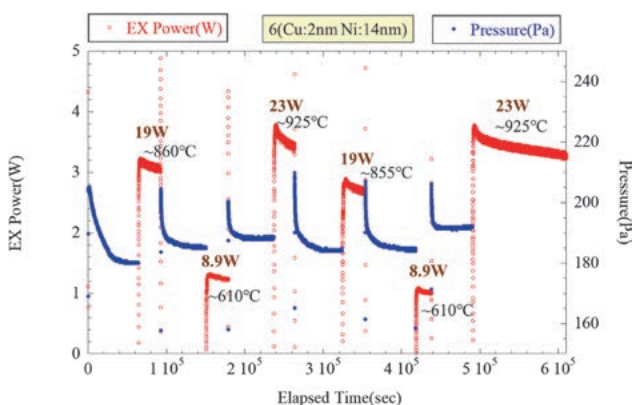


図2 過剰熱発生例[1].

表1 図2の実験データから計算される過剰エネルギー密度。

吸収された水素 [mol]	6.7E-04
吸収された水素の数	4.0E+20
総過剰エネルギー [J]	7.6E+05
過剰エネルギー密度 [J/H·mol]	1.1E+09
水素あたり過剰エネルギー密度 [eV/H]	1.2E+04

この発熱現象は既知の化学反応では説明できず、異常な発熱現象である。これまでの研究から、この異常発熱現象は、表面数百ナノメートルの構造や組成に大きく依存することが明らかになっている。すなわち、ある組成や構造ではほとんど過剰発熱が観察されなかったが、今回示したCu/Niナノ構造複合材ではほぼ100%近く再現性で発熱が観察された。

2.1.3 ヒートバースト現象

研究が進むにつれ、図2に示したような定常的な発熱に加え、発熱量が急激に増加するヒートバースト現象が観測されることがあった。その原因を調べたところ、ヒートバースト現象は微小電圧変動による水素拡散の乱れと密接に関係していることがわかった。この発見に基づき、入力電圧に意図的に摂動を加えることで、ヒートバースト現象を誘発することが可能になっている。試料の温度は、A面とB面にそれぞれ2色の放射温度計を取り付け、同時にヒーターに埋め込んだ熱電対で測定する。意図的に引き起こしたヒートバーストの例を図3に示す。図3(a)はCu 2 nmとNi 14 nmの多層膜を6層積層したナノ構造Ni複合材料の場合、図3(b)はNiバルクのみの場合である。いずれの場合も、入力電圧を約3分間下げた後、元に戻すことで水素拡散に摂動を与えた。図3(b)に示すように、入力電力を上げると、表面温度も熱電対温度も一旦下がった後、元の値に戻るが、これは妥当な結果である。しかし、図3(a)では、入力電力を元に戻した後、表面Aで約70秒後、表面Bで約30秒後に急激な温度上昇が観察される。さらに、これらの表面で発生した熱エネルギーはヒーター中心部まで伝播し、熱電対温度が徐々に上昇していることがわかる。このプロセスにおいて、外部からエネルギーは全く与えられていないにも関わらず、試料からの発熱が増大していることに注目して欲しい。この実験例の場合、誘発されたヒートバーストによる発熱総量は内部に存在するNi試料や残留ガス等による化学反応では全く説明できない[1]。

なお、ヒートバースト現象は試料の組成に大きく依存するが、少なくともこの例で示したCuとNiの多層薄膜の場合、現象の再現性は高い。

2.1.4 反応仮説モデル

これまでに得られた実験結果を総合的に考察し、現段階では図4に示すような仮説反応モデルを想定している。図4(a)は成膜直後のナノ構造金属多層複合材料を示し、図4(b)は異常発熱反応の仮説モデルである。水素は、水素充填プロセスによってバルクのNi (25 mm×25 mm×0.1 mm) および表面近傍の多層膜に吸収され、その後、ヒーターによる排気と急速加熱によって内部の水素が表面

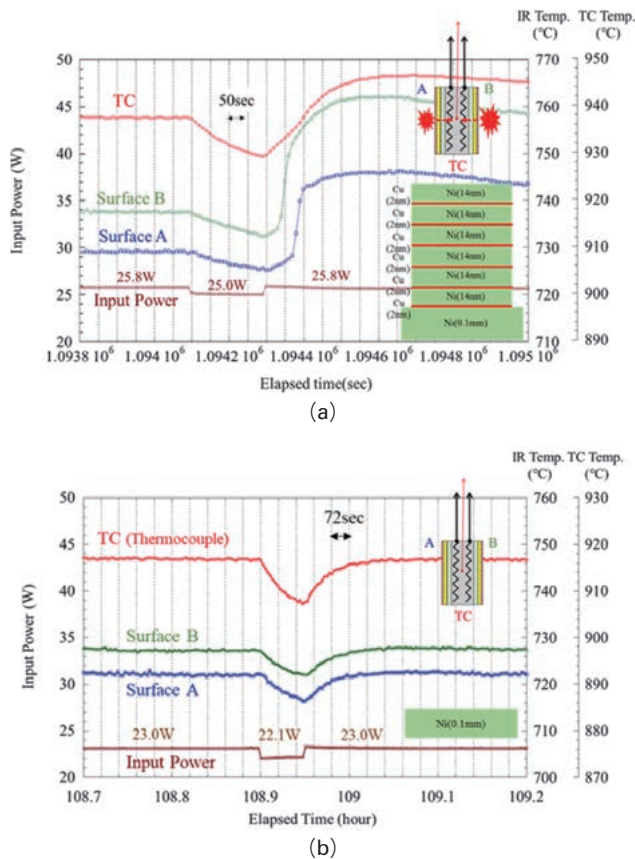


図3 意図的な入力電力摂動に対する反応の違い；(a)入力電力摂動によりヒートバースト現象が誘発された例、(b)ヒートバースト現象が誘発されなかった例。

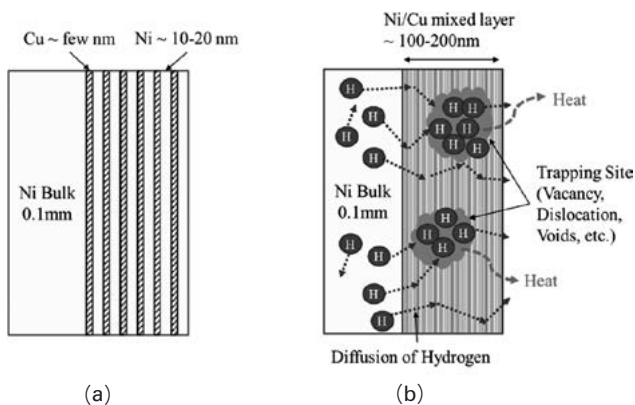


図4 仮説反応モデル；捕捉された水素と水素の拡散が異常なエネルギー発生現象を引き起こす鍵か？；(a)作製されたナノ構造のNiベース複合材料、(b)水素の捕捉と水素の拡散によって引き起こされる異常発熱の仮説モデル[1]。

に向かって拡散する。図中で矢印は水素の拡散を示している。この過程で、水素は空孔、転位、ボイドなどのトラップサイトにトラップされる[8-13]。例えば、第一原理計算では、4つまたは6つもの水素が空孔に閉じ込められることが示されている[14]。現段階では、観測された異常発熱反応は、このような水素原子が多数トラップされた部位で起こるのではないかと想定している。いずれにせよ、この仮説モデルは、今後得られる実験結果に応じて修正および充実していく必要がある。

2.2 異常発熱した試料の材料分析結果

これまでの研究では、既知の化学反応では説明できない発熱反応が確認されているが、その生成物は明確に特定されていない。しかし、発熱が観察された試料にはある特徴が観察された。SEM-EDX (Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray spectroscopy) およびTOF-SIMS (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry) 分析により、発熱が観察された試料には、酸素濃度の高い領域が多く存在することが明らかになった[1, 5]。また、発熱を伴う試料を用いた実験では、加熱によって放出されるガスの質量分析から、酸素ガス濃度が高いことを示すデータが得られている[1]。

2.2.1 SEM-EDX分析

図5は、最大9Wの過剰熱を発生した実験後の試料のSEM-EDX分析である。この試料は、通常のHNO₃表面エッチングの代わりにArイオンビームで表面エッチングした後、マグネトロンスパッタリングでCu (3.8 nm) とNi (20 nm) を6層蒸着したものである。図5(a)の画像Bに多数の粒子と塊が見られる。また、図5(a)のCOMPO画像Cは、軽い元素の存在を示している。画像DとEは画像Bの拡大画像である。点4と5のEDXスペクトルを図5(b)に示す。見てわかるように、点4と5にはNiとO以外の元素はあまり含まれておらず、Oの濃度は21.8%と38.1%と非常に高い。EDXスペクトルから算出した元素濃度は表面の数μmを平均したものであり、Oの21.8%、38.1%という高濃度は、表面の酸化では説明できない値である。一方、表面粒子や塊が存在しない点6の分析結果でO濃度は0.77%であり、実験前の分析結果とほぼ同じレベルである。

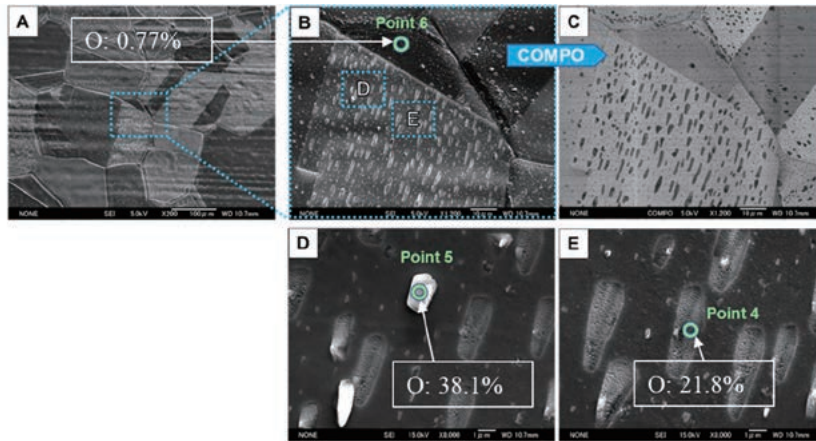
2.2.2 TOF-SIMS分析

実験前と実験後のTOF-SIMSによる深さ分析の比較を図6に示す。深さプロファイルは負イオン(Cs⁻)を用い、イオンエネルギーは2 kV、イオン電流は40 nAで得られた。このTOF-SIMS分析では、縦軸は各イオンの無次元カウント数を総カウント数で割ったものである。実験前の試料の深さ分布を図6(a)にプロットした。Niバルク上にCuとNiのナノスケール層が交互にスパッタされている。Oの濃度は上面およびNiバルクと薄膜の界面で高い。CやSiなどの他の不純物も観察された。

図5で示した試料の深さ分布を図6(b)に示す。TOF-SIMSはEDXよりもビーム径が大きいので、EDXで非常に高い酸素濃度が検出された、COMPO像で黒い部分が比較的多い領域を選んで分析した。このグラフからわかるように、最も豊富なイオンはO⁻で、その値はほぼ50%に達している。なお、各イオンの図中のオレンジ色の縦破線は、表面多層膜とNiバルクの界面付近を示している。TOF-SIMSのシグナルは各元素のイオン化度によって値が異なるため定量的な議論は難しいが、試料表面だけでなく試料内部でも酸素濃度が高いことは間違いない。TOF-SIMSの結果は、図5に示すSEM-EDX分析結果と一致している。

2.2.3 考察

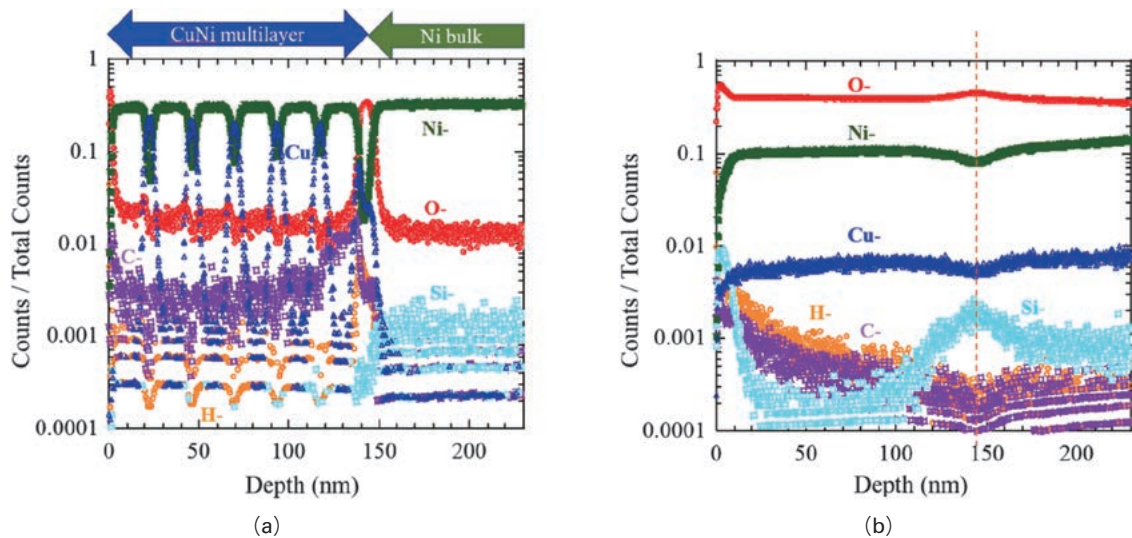
この高濃度の酸素がどのようにして発生したかを考察す



(a)

(b)

図5 最大9Wの過剰熱を発生した試料の実験後のSEM-EDX分析；(a)試料の形態観察，(b)EDXスペクトルと表面数μmに存在する元素[1].



(a)

(b)

図6 実験前後のTOF-SIMSによる深さ方向分析の比較：(a)実験前の試料の深さ方向分析，(b)最大9Wの過剰熱を発生した図5の試料の実験後の深さ方向分析[1].

るため、ナノ構造Ni複合材を実験前に700℃の空气中で2時間酸化させ、実験と同様の水素に晒す実験を行った。その場合でも、EDX分析で酸素濃度は5%以下であった[1]。したがって、発熱試料で検出された10%以上の高酸素濃度領域の存在は異常である。

しかし、この酸素が何らかの核プロセスによって生成さ

れたと考えるのは時期尚早である。まず、以下の可能性を詳細に検討する必要がある。

- 1) 実験中は酸素濃度が低かったが、試料除去後に空気中の特定の場所でのみ異常な酸化が誘発された。
- 2) 実験中の酸素濃度は低かったが、試料除去後の空気中の特定部位でのみハイドレートの異常生成が起こった。

3) もともとNiバルク中に存在していた酸素が、実験中に特定の領域でのみ拡散し、酸素濃度の高い領域が形成された。

今後、これらの可能性を様々な分析手法を駆使することで検証し、どのような現象が起きているのか解明するために研究を進めていく。

参考文献

- [1] Y. Iwamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 037001 (2024).
- [2] Y. Iwamura, *Cold Fusion: Advances in Condensed Matter Nuclear Science*, Ed. Jean-Paul Biberian (Elsevier, Amsterdam, 2020) p.157.
- [3] Y. Iwamura *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **36**, 285 (2022).
- [4] Y. Iwamura *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **33**, 1 (2020).
- [5] S. Yamauchi *et al.*, Proc. JCF23, March 4-5, 2023, Waseda University, Tokyo, Japan, p.94.
- [6] T. Itoh *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **36**, 274 (2022).
- [7] J. Kasagi *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **39**, 210 (2025).
- [8] Y. Fukai, *The Metal-Hydrogen System* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005) p.373
- [9] H. Wipf, *Hydrogen in Metals III*, Ed. by H. Wipf (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997) p.51.
- [10] A. Pundt and R. Kirchheim, Annu. Rev. Mater. Res. **36**, 555 (2006).
- [11] D. Connétable *et al.*, J. Alloys Compd. **614**, 211 (2014).
- [12] R. Silverstein *et al.*, J. Alloys Compd. **747**, 511 (2018).
- [13] D. Connétable *et al.*, J. Alloys Compd. **708**, 1063 (2017).
- [14] G. Lu and E. Kaxiras, Phys. Rev. Lett. **94**, 155501 (2005).



小特集 凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱

3. 輻射熱量観測による異常発熱エネルギー生成

3. Observation of Anomalous Heat Generation Using Radiation Calorimetry

伊藤 岳彦, 笠木 治郎 太

ITO Takehiko and KASAGI Jirohta

東北大学 先端量子ビーム科学研究センター

(原稿受付: 2025年 3月20日)

東北大学では、ナノ金属薄膜に水素を吸蔵させ、高真空下で急加熱（試料温度: 300–800℃）することで、異常発熱現象を発生させる手法を開発してきた。この実験系では、試料からの輻射エネルギーを直接観測できるため、高精度の発熱量評価とともに、メカニズム解明の手がかりを得る可能性がある。我々は、中赤外から可視光までのエネルギースペクトルを観測する測定系を用い、異常発熱の際に、観測領域に全域に亘って輻射エネルギーの増大を観測し、化学反応では説明のつかない熱エネルギーが放出されることを確認した。

Keywords:

photon radiation calorimetry, anomalous heat generation, nano-composite

3.1 輻射熱量計測による異常発熱観測へ

3.1.1 はじめに

「常温核融合」の発表以降、異常発熱現象は電気分解や H_2/D_2 ガスでも広く研究されてきた。その中で金属ナノ構造に焦点を当てた実験では、荒田らは、ナノサイズのPd粒子（約10 nm）が D_2 ガス条件下で大きな過剰熱を発生することを発見し[1]、その後、北村らはフロー熱量計を使用してこの結果を確認した[2]。この実験では、異常発熱は D_2 ガスだけでなく H_2 ガスでも観測された。さらに、彼らはサンプルをPdナノ粒子からNiPd複合ナノ粒子に拡大し、温度も室温から約600 Kまで拡張した。NEDOプロジェクト（新エネルギー・産業技術総合開発機構）で行われた一連の実験では、化学反応では説明できない過剰熱がPdNi- D_2 系だけでなく、PdNi- H_2 系やCuNi- H_2 系でも観測されるなど、注目すべき結果が得られた[3]。

我々は、NEDOプロジェクトで使用された複合アモルファス金属粉末の代わりに、ナノ構造金属薄膜を使用して、測定範囲を1100 Kまでの高い温度まで拡張した。実験方法は、水素を吸蔵させたNiCuナノ構造多層膜を真空中で、高温（約1100 K）に急加熱し H_2 を放出させる方法である。過剰熱のより良い評価のために、我々は試料から放出される光子を測定する熱量測定法を検討した。この目的は、異常な大量の熱発生が起こるという確固たる証拠を得るために輻射熱量測定法を確立させ、発生した熱量を高い信頼性で評価することである。

3.1.2 輻射熱量計測の実験装置の構成

実験装置の概要を以下に示す。図1(a)は、実験装置の上面図である。真空チャンバーの蓋から吊り下げられたセラミックヒーターの両側に2つの薄膜試料を取り付け、こ

れを約1100 Kまで加熱する。サンプル表面から放出される輻射熱量は、3種の異なる検出器を用いて、広範囲の光子エネルギーにわたって測定できる。ファイバーの切り替えにより、試料の両面の観測も可能である。各検出器で取得されたデータを、1つのスペクトルに結合する。これにより、過剰熱の信頼性の高い評価が可能になる。図1(b)に試料ホルダーの概略を示す。試料の厚さは0.1 mmで、中央にR型熱電対があるセラミックヒーター（アルミナ製、 $25 \times 25 \times 2.5 \text{ mm}^3$ ）の両側にこれを設置する。試料にはAとBのラベルがにより区別している。試料とセラミックヒーターの間には、0.3 mmの厚さの絶縁板（ホトベール）が挟まれている。ヒーターの電源供給と熱電対の信号は、気密シールを介して外部デバイスに接続している。試料は、2枚のホトベールプレート（面積 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ 、穴径20 mm）で覆われ、フレームに固定されている。なお、ホトベールは、ガラス質をマトリックスとし、フッ素金雲母・ジルコニア微結晶を均一に析出させたセラミックスで、加工が容易な材料である。耐熱温度1000℃まであるため、耐熱材料として使用した。試料からの輻射は、図1(a)に示すように、真空チャンバーの窓の外側に配置された3つの検出器で測定する。中赤外領域については、2組のTMHK-CLE1350（Md-IR検出器と呼ぶ、有効範囲0.22–0.40 eV）が、真空パイプとBaF₂ウィンドウを介して試料から40 cmのところに設置されている。この実験では、Md-IRは温度計としてではなく、0.22–0.4 eV領域の平均放射熱量を測定する検出器として使用する。

他の2つの検出器は、反対方向に設置された石英窓を通過する光を測定します。10 mmφの石英窓を通過した光は、集光レンズにより光ファイバーケーブルに集束

され、2本のケーブルに分岐して、2つの検出器へ導入される。使用される検出器は、近赤外領域のFTIR分光計 Hamamatsu C15511-01 (Nr-IR 検出器と呼ぶ。有効範囲 0.5–0.9 eV) と、可視光から紫外光領域の分光器 Hamamatsu C10027-01 (可視光検出器と呼ぶ。有効範囲 1.3–5 eV) である。2つの検出器の出力は、波長の関数として複数回の測定の前平均放射パワーである。測定時間は、Nr-IR の場合は約 30 秒、可視光の場合は約 50 秒である。また、測定される光子は、試料ホルダーを含む領域全体からの光ではなく、サンプルからの光のみを受け入れるようにコリメートされている。

3.1.3 CuNi ナノ多層膜試料の作成

試料作成については、[4–6]で詳しく説明している。本稿では、次の4つ試料を作成した。(1)Ni 基板：純度 99.9%、厚さ 0.1 mm、面積 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 。(2)Ni₅Cu₁ 試料：(1)のNi 基板上に、マグネトロンスパッタリングにより、Cu (厚さ 3.8 nm) と Ni (厚さ 20 nm) をマグネトロンスパッタリングにより交互に6層積層させた。(3)Ni₁Cu₃ 試料：Cu (厚さ 17.8 nm) と Ni (厚さ 6 nm) を同様に、6層を形成した。(4)Cu 膜試料：Cu (140 nm) の単層をNi 基板上に積層した。

3.1.4 実験方法

測定は、以下の手順に従って実施した[7]。図2に手順のフローチャートを示す。

(1)サンプルベーク：試料をチャンバー内に設置し、ヒーター温度を約 1150 K に保ちながら、約 3 日間ベークを行う。これにより、到達圧力は $3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 未満の圧力まで達する。

(2)H₂ガスなしの測定：チャンバー内を真空中に保ち、ヒーター入力電圧 (V_{in}) を特定の値に設定する。 V_{in} 設定後約 0.5 時間および 3 時間で放射パワースペクトルを測定する。次に V_{in} を異なる値に設定し、少なくとも 5 つの異なる V_{in} 値で測定を繰り返す。これらの測定は、過剰熱がない状態に対応する参照データを取得するためのものである。この結果を過剰熱ゼロの較正として用いる。

(3)H₂ガス放出中の測定：チャンバーにH₂ガスを 200–300 Pa まで充填し、試料温度を約 520 K に保つことで、試料にH₂ガスを吸蔵させる。12–15 時間後、H₂ガスを廃排気すると同時に、 V_{in} 値を所定の設定へ変える。 V_{in} 設定後、約 0.5, 1.5, 4.0, 6.0 時間で放射パワースペクトルを測定する。H₂ガスの充填から、異なる V_{in} 値でのH₂ガス放出を少なくとも 4 回繰り返し行った。

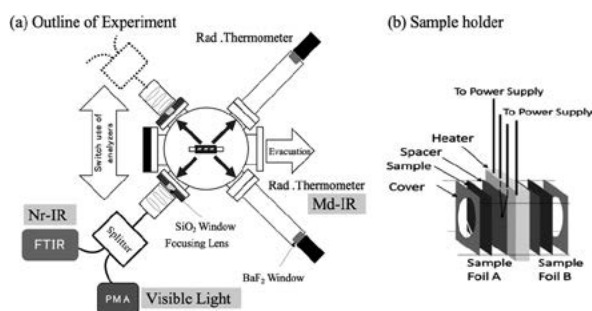


図1 (a)実験装置の上面図。(b)サンプルホルダー概略図。

(4)水素補充なしの長期測定：Ni₁Cu₃ 試料については、過剰電力の長期的挙動を確認するために長期測定を行った。サンプルへの水素の吸蔵後、(3)と同様に $V_{in} = 46 \text{ V}$ で測定が開始するが、以降H₂ガスを補充せずにこの状態を維持し、放射パワースペクトルを5日間連続して30分ごとに測定を行った。

上記の測定中、ヒーター温度、Md-IR (中赤外線温度計) の出力、ヒーター電圧と電流、真空チャンバー圧力、チャンバー外壁温度、毎秒記録した。

3.1.5 過剰熱の評価

図3は定常状態での熱の流れを示している。左側は簡略化した図、右側は解析に使用したモデル図である。熱源は2つ存在する。1つは図1(b)に示すように試料AとBの間にあるヒーターで、もう1つは試料より異常発熱反応で発生する過剰熱である。図に示すように、ヒーターからの熱流 (P_{in}) はスペーサーを介してサンプルに伝達され、サンプル内の過剰熱流 (Q_{ex}) と合流した。総熱量 (Q_{tot}) は、サンプル表面とホルダー表面からの輻射熱流 (各々 Q_S , Q_H) としてチャンバー壁に流出する。支持棒を通る伝導熱流 (Q_C) と壁からの反射放射の寄与は非常に小さく (後者は解析では無視される)、したがって、熱流と温度の関係は次の式で表される。

$$\begin{aligned} Q_{tot} &= P_{in} + Q_{ex} = Q_S + Q_H + Q_C, \\ Q_{S(H)} &= A_{S(H)} \epsilon_{S(H)} \sigma T_{S(H)}^4, \\ T_C - T_S &= P_{in} R_C, \\ T_S - T_H &= (P_{in} + Q_{ex}) R_{SH}, \\ T_H &= Q_C R_W, \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $A_{S(H)}$, $\epsilon_{S(H)}$, $T_{S(H)}$ はそれぞれ試料 (ホルダー) の表面積、放射率、温度を表し、 σ はステファン・ボルツマン定数である。 R_C , R_{SH} , R_W はそれぞれヒーターと試料、試料とホルダー、ホルダーとチャンバー壁間の熱抵抗である。この測定では放射率は温度にほとんど依存しないが、 T_S と T_H によって比 Q_H/Q_S が決まり、これにより $(Q_{tot} - Q_C)/Q_S (= 1 + Q_H/Q_S)$ が決定される。 $R_{SH} = 0$ 、つまり $T_S = T_H$ の場合、比例関係 $Q_{tot} - Q_C = \alpha Q_S$ が厳密に成り立つ。そうでない場合でも、数値シミュレーションでは、 $T_S/T_H \leq 1.2$ および $Q_S \geq 0.3 \text{ W}$ である限り、 $Q_{tot} - Q_C = \alpha Q_S + C$ による線形近似が有効であることが示されている。 T_H の推定値は $T_S \approx 900 \text{ K}$ で約 $T_S - 100$ であるため、現在の解析に適用できる。

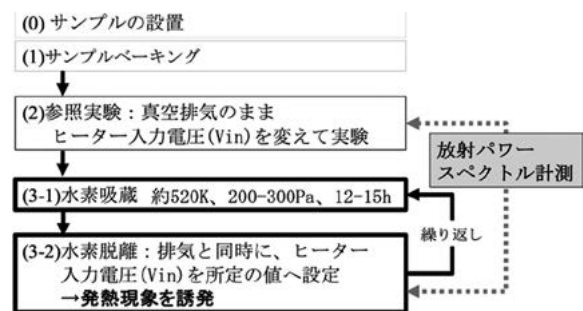


図2 実験手順のフローチャート。

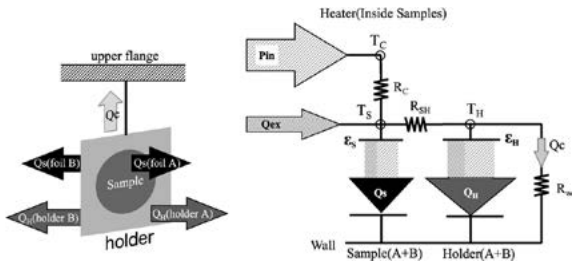


図3 熱流速のダイヤグラム。左側は模式図、右側は簡略化された熱流モデル。矢印は熱流を示す。

H_2 の脱着時の過剰発熱では、 ϵ_S は一般に $\epsilon'_S = \beta \epsilon_S$ (β は約0.9)に変化するが、 ϵ_H は変化しない。実験条件下では、定数 α を α/β に置き換える近似により、放射率の変化の影響を組み込む。したがって、 ϵ_S で決定された校正曲線は次のように修正される。

$$Q_{tot} = P_{in} + Q_{ex} = (\alpha/\beta) Q_S + Q_C + C, \text{ for } \epsilon'_S = \beta \epsilon_S. \quad (2)$$

これは、シミュレーションで示された現在の測定では、 $\pm 0.5\%$ の精度で有効である。

解析では、試料AとBからの放射熱量が合計され、 A_S で乗算される。伝導熱流 Q_C は約0.13Wと非常に小さいが、測定前に実験的に決定された $Q_C = -3.71 \times 10^{-3} - 3.603 \times 10^{-5} T_C + 1.257 \times 10^{-7} T_C^2$ として評価できる。図3は、 Ni_5Cu_1 およびNi基板の $P_{in} - Q_C$ 対 Q_S の校正曲線を示している。これらは、 H_2 ガスを導入前にさまざまな P_{in} で測定されている。 H_2 ガス吸蔵なしでは過剰熱はないと考えられるため、データに線形フィッティングして α ($\beta = 1$)および C の値を推定する。黒丸は Ni_5Cu_1 サンプル、白丸はNi基板です。2つのデータセットがそれぞれの直線に非常によく適合していることがわかる。校正曲線は試料ごとにわずかに異なっており、サンプルの個性と設定条件の微妙な違いによる可能性がある。

式(2)を用いた本熱量測定法によって推定された Q_{ex} の値は、(1) H_2 ガス誘導によるサンプルの ϵ_S の変化の影響が考慮され、(2)ヒーターからの熱流を直接校正として使用できるという理由から、従来の温度測定で得られる値よりも信頼性が高いと信頼性が高い。

3.2. 実験結果 異常発熱現象の観測

3.2.1 過剰熱発生時の輻射スペクトル計測

図4に、測定された放射パワースペクトルを示す。(a)

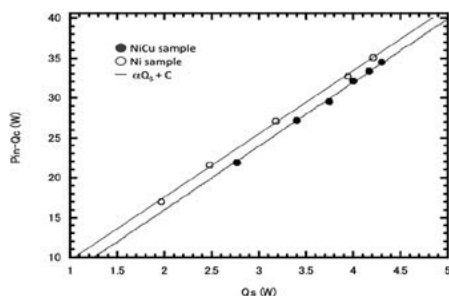


図4 Ni基板(白丸)と Ni_5Cu_1 試料(黒丸)の校正曲線。 H_2 ガス導入前のデータがプロットされている。

はNi基板、(b)は Ni_5Cu_1 膜試料、(c)は Ni_1Cu_3 膜試料、(d)はCu膜試料の実験結果である。試料温度は、 H_2 ガスなしの状態では約1000Kのときに測定を行った。赤丸は H_2 放出中に測定されたデータで、黒いX印は H_2 導入前の参照実験のデータである。輻射スペクトルの増大は、試料から発する熱エネルギー、すなわち発熱量の増大を示している。図4より、すべての試料で H_2 放出中に放射パワーが増大していることがわかる。特に、 $NiCu$ 複合層を持つ試料は、明らかに輻射熱量が増大しており、過剰熱発生を示している。一方で、CuまたはNiの単層の試料の過剰熱はわずかである。

このことは、 $NiCu$ 複合層の存在が、過剰発生に重要であることを示唆している。

3.2.2 過剰熱の評価

得られたスペクトルの重要な特徴は、灰色放射のモデルによってうまく説明できることである。図5に示す赤と黒の曲線は、灰体近似によって計算された最もよく適合するスペクトルである。灰体近似では、放射パワーは $Y(E_{ph}) = \epsilon_{rad} \sigma E_{ph}^3 / (\exp(E_{ph}/kT) - 1)$ と表される。ここで、 ϵ_{rad} は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 k はボルツマン定数である。データを最もよく再現するように、 ϵ_{rad} と温度 T の値を推定した。次に、校正曲線(2)によって過剰熱パワーを定性的に取得できる。式(2) Q_S は、 $Q_S = A_S \int_0^\infty Y(E_{ph}) dE_{ph}$ と推定される。ここで、 A_S (サンプルの放射面積)である。

式(2)を適用して、図6に示すような過剰熱出力 Q_{ex} をヒーター入力電力 P_{in} の関数として得た。 $NiCu$ 多層膜試料(左が Ni_5Cu_1 、右が Ni_1Cu_3)のデータは赤い実線で囲まれた円で、Ni基板試料は左側に赤い白抜きの円で示している。また、Cu膜試料はオレンジ色の閉じた円で示し

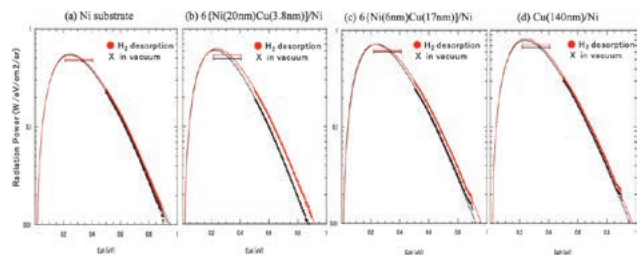


図5 約1000Kの温度でサンプルから放出される光子放射スペクトル。左から右に、Ni基板、 Ni_5Cu_1 、 Ni_1Cu_3 、Cu膜の測定結果を示す。赤い丸は H_2 脱着中に測定されたデータで、黒いXマークは H_2 ガスがない場合のデータ。

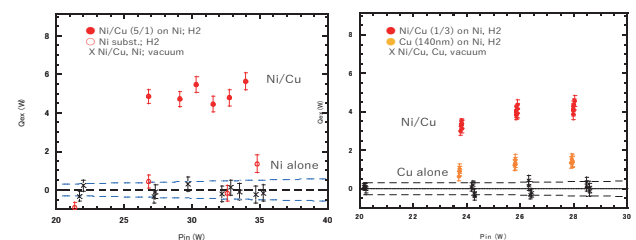


図6 過剰熱電力 Q_{ex} (W)をヒーター入力 P_{in} (W)に対してプロットした。赤い実線は $NiCu$ 多層膜試料(左は Ni_5Cu_1 、右は Ni_1Cu_3)のデータ、赤い白抜きの円はNi基板、オレンジ色の実線はCu膜試料、Xマークは H_2 ガスなしのデータ。

ている。校正曲線に使用した H_2 を含まないデータは、黒い×印でプロットしている。各点のエラーバーはランダム誤差 (1σ) に対応し、主に Q_S の誤差に起因し、その値の約0.18%である。 $Q_{ex}=0$ を中心とする2本の破線は、校正パラメータ (α と C)と放射率の比 (β) の不確実性に起因する Q_{ex} の系統的誤差 (1σ) である。明らかに、 H_2 を吸蔵させたNiCu多層膜試料は大きな過剰熱出力を生成すること示している。その量は約4~5Wで、 P_{in} の最大18%となる。対照的に、 H_2 を吸蔵させたNi基板の結果は、 H_2 を吸蔵していない実験とほとんど区別がつかない。Cu膜はわずかながら Q_{ex} を生成する。ただし、Ni基板との合金化の可能性を排除できないため、過剰熱がCu層にあるかどうかは定かではない。

3.2.3 放出エネルギーの評価

図7は Q_{ex} の長期連続測定結果である。実験値を合計すると、80時間で発生した総エネルギーは 520 ± 120 kJ となる。このエネルギーは H_2 が試料に吸蔵された後に過剰に発生するため、エネルギー源は試料中の水素を含む反応であると考えられる。図7の測定では、 6×10^{-6} molの水素分子がサンプルに吸収された。したがって、すべてのH原子が反応に関与していると仮定すると、H原子あたりのエネルギー量は 460 ± 108 keV/H原子となる。これは、化学反応のような、電子レベルでのエネルギー交換で発生するエネルギー (約1eV/H原子 程度) では決して生成できないほどの膨大なエネルギーである。最初に吸収された水素のほとんどは、反応に関与することなく、すぐに熱拡散によって真空中に放出されるという事実を考慮すると、実際に生成されたエネルギー量/Hははるかに大きいと考えられる。

3.3 まとめ

H_2 ガスによるNiCuナノ多層膜の過剰熱発生の研究のた

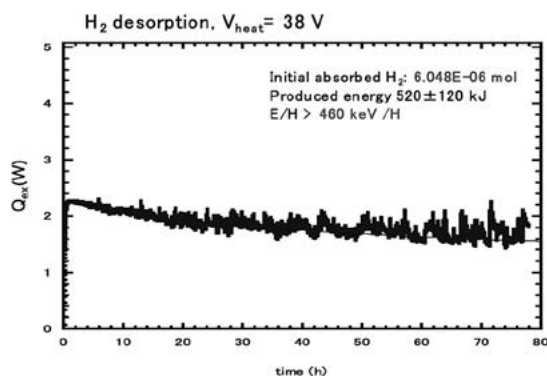


図7 Ni₁Cu₃試料を2つのMid-IR検出器で80時間連続測定した結果。推定された過剰熱量 Q_{ex} (W) を経過時間 (時間) の関数としてプロットした。

めに、放射熱量測定法を確立した。3種類の光子検出器により、0.2~1.8eVの広範囲の光子エネルギーをカバーする放射強度スペクトルを得ることができた。これは、サンプルで生成される過剰熱の違いを、視覚的に比較するのに役立つ。スペクトルは灰色体放射によく近似されており、サンプルの放射率と温度を推定できる。これは、特に今回の場合のような高温 (最大1100 K) では、熱特性の変化が過剰熱の評価に影響を与える可能性があるため、放射熱量測定は必要である。

測定された放射熱量を熱流モデルに組み込むことで、過剰熱を定量的に評価した。NiCu多層膜試料は、常にNi (Cu) 試料よりも大きな過剰熱を発生しており、その過剰熱は4~6Wと推定される。80時間で生成されたエネルギーは 520 ± 120 kJに達し、水素あたりの発生エネルギーは少なくとも 460 ± 108 keV/H原子であった。これは明らかに化学反応ではなく、核反応レベルのエネルギー発生を示している。

今後の課題として反応機構の解明がある。これまでのアプローチにより発熱時の熱輻射は、発熱反応を反映した結果であることがわかってきた。このため、輻射スペクトルは反応に関連する重要な情報を含んでいると思われる。このため、これまで、一部の波長領域だった計測を、遠赤外から近赤外までの広げた全領域波長域計測を行い、このスペクトルを詳細に解析することでメカニズム解明へ繋げていきたい。

謝 辞

この研究は、(株)クリーンプラネットおよび熱・電気エネルギー技術財団の支援を受けて実施されています。

参考文献

- [1] Y. Arata and Y.C. Zhang, J. High Temp. Soc. **34**, 85 (2008).
- [2] A. Kitamura *et al.*, Phys. Lett. A **373**, 3109 (2009).
- [3] Y. Iwamura *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **24**, 191 (2017).
- [4] Y. Iwamura *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **33**, 1 (2020); *ibid.*, **36**, 285 (2022).
- [5] T. Itoh *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **36**, 274 (2022).
- [6] Y. Iwamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 037001 (2024).
- [7] J. Kasagi *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **39**, 210 (2025).

小特集 凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱

4. 水素雰囲気中の複合ナノ金属粉末試料からの異常発熱

4. Anomalous Heat Generation from Nano-Composite Metal Powder Material in the Hydrogen Circumstances

長谷川雅彦, 金崎真聡, 東 柊斗, 勢一隼人, 山内知也

HASEGAWA Masahiko, KANASAKI Masato, HIGASHI Shuto, SEIICHI Hayato and YAMAUCHI Tomoya

神戸大学

(原稿受付: 2025年5月16日)

複合ナノ金属 (CNZ: CuNiZr) と軽水素 (H_2) とのガスローディング法による凝集系核科学 (CNMS, Condensed Nuclear Material Science) の研究状況を, 装置概要, 試料の生成方法, 実験方法, 発熱量の算定法, および代表的な試験結果について紹介する. 反応試料と水素を反応器内でヒータ加熱すると, 温度上昇に伴い水素吸蔵が進むと共に 250°C から反応発熱が始まる. 初期の水素吸蔵が安定した後の水素消費量は微量であり, 反応発熱は長時間 (200h 以上) 継続する. 現状の発熱量は 32W , 比発熱量 (試料重量当たりの発熱量) は $0.54\text{W/g}_{\text{試料}}$, COP (成績係数) は 1.20 程度である.

Keywords:

Anomalous heat generation, nano-composite material, gas loading method, CNZ, hydrogen absorption

4.1 装置の概要

水素の異常発熱現象については, 1989年の初報告以来, 世界でいくつかの実験方法と試料で研究が進められてきている [1]. 特に日本では, NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) のプロジェクト (2015-2017) において, 神戸大を含む複数大学の連携研究を通して, 複数の装置と試料で異常発熱現象の再現性が実証された点は, 世界からも注目されている [2]. 1989年から数年間の水素異常発熱の主な評価法は, 液体の重水 (D_2O) 内のパラジウ

ム電極で電気分解する Pd 陰極重水電解法で進められたが, 現象の再現性は乏しかった. 一方, NEDO プロジェクトでの実験方法は, 微粉末の CNZ 試料を軽水素 (H_2) ガス中で高温にして反応させるガスローディング法である. ナノ (またはサブナノ) 構造を持つ複合金属粒子に水素ガスを吸着・吸蔵させた上で高温にして反応させる方法で, 異常発熱の再現性と共に数週間の長時間の持続も確認している. 本報で紹介する装置と反応試料は, これまで神戸大で継承してきたものを一部改良している [3-7].

評価システムは, 水素ガス系, 真空系, ヒータ電力系, 循環オイル系, 冷却水系, データ計測系からなる (図 1). 反応器の内部断面を図 2 に示す. 反応器は, 真空の外側チャンバーの中央に設置する. 外側チャンバーと反応器の間の断熱材 (イソウル) によって, 反応器外壁からの熱損失を抑えている. 反応器の外周囲には循環オイルの螺旋

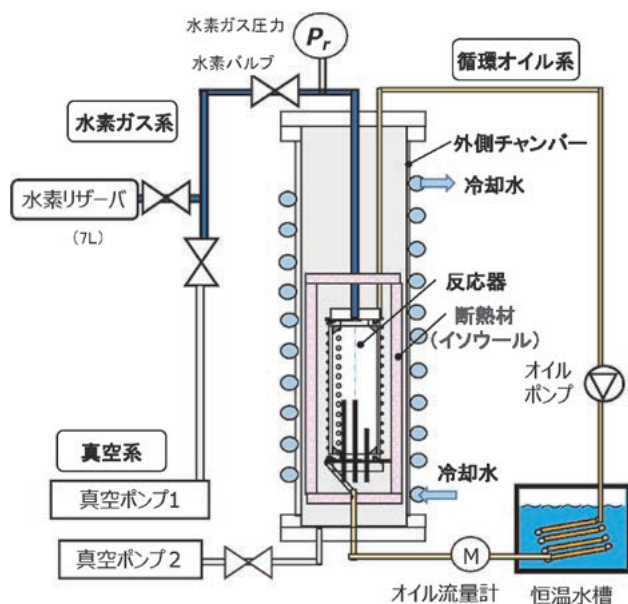


図1 装置システム.

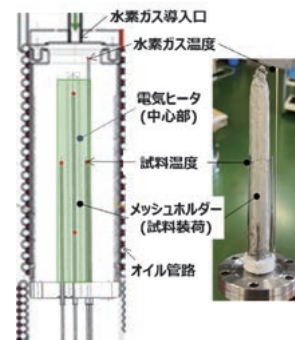


図2 反応器の内部断面, 試料装荷メッシュホルダー.

Faculty of Maritime Sciences, Kobe University, Kobe, HYOGO 658-0022, Japan

Corresponding author's e-mail: hasemasa@port.kobe-u.ac.jp

状管路があり、恒温水槽で室温（23℃）に一定にして入り、反応発熱とヒータ入熱を外部に排熱する。オイル流量は16ml/min程度である。外チャンバーの外壁も室温の水で冷却している。

反応器は、ペットボトル程度の円筒形（外径 $\phi 70\text{mm} \times$ 高さ200mm、ガス内容積300cc）で、中心に試料加熱用の電気ロッドヒータがあり、粉末の反応試料はロッドヒータ周囲のステンレスのメッシュホルダー内に装荷する。水素供給は、水素リザーバタンク（7L）からバルブを通して真空引きした反応器へ導入する。反応試験中もバルブを開にして連通し、水素吸蔵や圧力膨張による圧力変動を容許している。本研究のガスローディング法では、試験中を通して試料は水素ガス中にあり、水素が反応器およびオイルへの熱伝達媒体になっている。反応器と水素リザーバの、試験前と試験後の室温での水素圧力の差から、試験全体で吸着、吸蔵と反応で消費された総水素量が算出できる。

反応器内の温度計測は、試料温度、水素ガス温度、オイル出入口温度などである。装荷試料の温度は、メッシュホルダー内に装荷した試料の縦方向に温度分布があるため、縦方向に数点計測している。高さ中央の点が最高温度となり、反応発熱状況の把握に適している。水素ガス温度は試料上部で計測し、反応器の装荷試料全体からの総発熱量の算定に用いている。

反応器内は、試験開始前には室温で、真空ポンプ1で真空（ $<1\text{Pa}$ ）にして空気を排出し、その後、ヒータ加熱で試料を400℃程度に昇温して、試料表面の水分などの付着物を除去、排出する。外チャンバーは、試験中は、真空ポンプ2で真空（ $\sim 1\text{Pa}$ ）に維持して反応器から外チャンバーへの熱漏洩を回避する。

電気ヒータへの印可電力は、定電力電源で供給し、ヒータ温度が上昇して電気ヒータの内部抵抗が変化しても、一定の入力電力に制御する。各計測データは、データロガーで毎秒サンプリングして、圧力の早い応答も記録できる様にし、温度変化は1分間の平均値で解析する。

4.2 試料の生成方法

反応試料の素材金属は、Cu、Ni、Zrの3元素からなりCNZと呼称し、代表的な組成比は、Cu:Ni:Zr = 1:7:14である。粉末試料の粒径は100 μm 程度である（図4_写真）。生成方法は、まず素材金属から非晶質のアモルファスリボンを生成し、空气中で焼成して酸化処理した後に、粉碎して粉末試料にする（図3）。

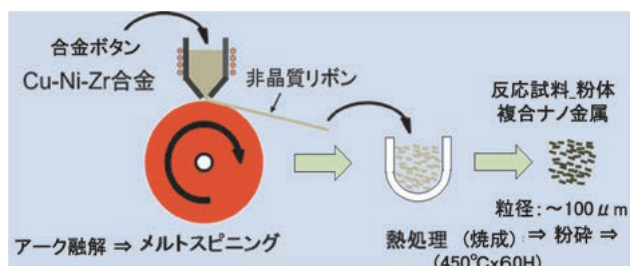


図3 反応試料の生成ステップ。

生成ステップは以下である。組成比の素材金属をアーク溶解炉で高温融解して合金ボタンにする。メルトスピニング（液体急冷）装置で、合金ボタンを溶融して回転ドラムに溶出して、厚さ10 μm 程度のアモルファスリボンを作製する。アモルファスリボンを反応試料の微粉体にするために、大気中で“初期焼成”（450℃、60h）すると、酸化してもろくなり手もみで粉碎できる。次に自動乳鉢で更に微粉に粉碎して、自動ふるい器で100 μm 程度の粒径を選別している。この微粉化は、比表面積を増加して反応促進するためである。主な酸化は、アモルファスリボン中のジルコニウム（Zr）が酸化してジルコニア（ ZrO_2 ）となる部分だが、この初期焼成時の重量増加率は内在するZrの全量が酸化する1.26より少し大きくなり、CuやNiも部分的に酸化している。

この粉体試料を反応器内で水素と反応発熱の評価後に、再び取り出して、再度、大気中で“再焼成”（450℃、180h）する。この再焼成は初期焼成と異なり、水素雰囲気中での初回反応により試料内部に吸蔵された水素が残存した状態で大気焼成を行う点に特徴がある。この処理により、再焼成後の反応試験では発熱性能が向上する傾向を示す。これらの初期焼成や再焼成、反応試験の水素中での高温状態も含めた一連の試料生成工程の最適な諸条件は、反応発熱量との相関性や反応持続性を含めて総合的な最適性評価を進めている。

反応試料のナノ構造や組成成分、また、それらを生成する主要因の特定は、電子顕微鏡（SEM、STEM）によるナノ構造解析やX線解析（XRD）などで進めてきている。反応発熱した試料の外観写真と電子顕微鏡（STEM-EDX）の元素マップの一例を図4に示す。ZrO₂を基盤構造とする微粉末の表面や内部へのクラックの表面に、CuやNiがナノスケールで分散析出し、またはCuとNiが重なって複合的なナノ構造を形成している。これらのCuとNiのナノ構造の生成割合と異常発熱量とは相関している様である。しかし、反応発熱を発生している反応サイトのナノ構造の具体的箇所は特定できていない。

4.3 試験方法、校正試験、発熱量の算定方法

4.3.1 試験方法

本研究で用いているガスローディング法の反応発熱試験および校正試験の試験方法のステップは以下である（図5）[3-7]。

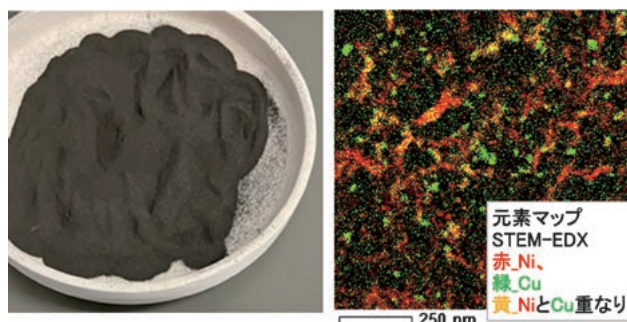


図4 反応試料の外観と元素マップ（STEM-EDX）。

試料装荷⇒真空引き⇒水素導入⇒(室温)冷却⇒
ヒータ加熱⇒[条件変更]⇒(室温)冷却⇒真空引き⇒試料取り出し

図5 試験の進行順序。

試料を装荷した反応器を真空引き (<1Pa) した後、水素リザーバ (7L, 0.35MPa) に充填した水素を室温 (23℃) で反応器 (ガス容積0.3L) に導入する。校正試料での平衡圧は、水素吸蔵しないため容積比により約0.31MPaとなる。反応試料の装荷直後の水素導入時には、室温でも水素の吸着や吸蔵が起こり、試料温度が数十℃上昇すると共に、平衡圧も上記の平衡圧より少し低下する。その状況は、材料金属の組成比、試料生成の熱処理の違い、試料粒径などによっても異なっている。

反応器中央のロッドヒータに電力を印可後の、反応器内の温度が昇温する代表的な時間経緯を図6に示す。試料温度 (赤)、ガス温度 (青)、ガス圧力 (橙) で、点線は校正試料、実線は反応試料の時間経緯である。3h程度でほぼ平衡温度に達する。試験条件の、ヒータ入力 (80~180W) やガス圧力 (0.1~0.4MPa) などを変更して、順次、平衡温度を計測する。

試験終了後は、室温に冷却した後水素を排気して、さらに真空引きをして試料を反応器外に取り出す。試験終了後の真空引きの目的は、取り出した試料からの水素脱離による発火危険を回避するためである。取り出した試料は、大気中で焼成する“再焼成”を行い、再び反応器に装荷して、反応発熱の状況を繰り返し試験評価する。

4.3.2 校正試験

過剰発熱量の計量方法には、以下の2方法がある。

方法1: オイル回収熱法: 循環オイル流量とオイルの出入口の温度差から熱量算定:

$$Q(W) = F_w \cdot C_p \cdot \rho \cdot \Delta T_{oil}$$

方法2: 校正係数算定法: 校正試験での温度・熱量係数 (k_1) と上昇温度から熱量算定:

$$Q(W) = k_1 \cdot (T_{gas1} - T_{gas0})$$

過剰熱量の算定精度、適用温度域、装置システムの条件安

定状況などから、校正係数算定法を用いている。オイル回収熱法にはいくつかの問題点がある。第一に、オイルは温度上昇に伴って粘性が変化するため、試験中に流量が変動しやすい。第二に、比熱や密度といった熱伝達特性もオイル温度に依存して変化するため、これらの物性値を用いた補正が必要となる。さらに、オイル沸点に近づく高温領域では、出口温度が不安定になり、測定精度に影響を及ぼす可能性がある。

校正試料としてはジルコニアビーズ (直径 ϕ 1.0mm)、ガスは軽水素 (H_2) である。ジルコニアは水素吸蔵も反応発熱もなく、反応試料の重量割合が80%以上と試料重量の大部分を占めるため、反応試料とは伝熱特性 (比熱、熱容量、熱伝導率など) はほぼ同レベルであり、過渡特性に微差はあるが、熱平衡状態での発熱量の算定への影響は微小と判断している。別の校正試験の組合せとして、反応試料と不活性なヘリウム (4He) とでの校正組合せもあるが、ヘリウムガスと試料や反応器内壁などの総括熱伝達の状況が軽水素ガスと差が大きく、校正基準温度の値が異なるためジルコニアビーズと軽水素での校正値を用いている。

4.3.3 発熱量の算定方法

熱量算定の代表温度値には、反応器に装荷した試料全体からの総発熱量を示すとみなせる水素ガス温度を用いている。反応器内の試料温度とガス温度が十分に温度平衡した時点で計測し、各ヒータ入力での平衡温度の2次近似式を算出する (図7)。各ヒータ入力での温度・熱量係数 k_1 (W/℃) は、校正曲線の2次近似式を微分した傾き (℃/W) の逆数である。校正試験時の基準温度 T_{gas0} から反応発熱時の平衡温度 T_{gas1} への上昇温度 ΔT_{gas} と、温度・熱量計数 k_1 の積で発熱量 W_{ex} (W) を算出する。

過剰発熱量の算定例を図8に示す。非発熱の校正試験の平衡温度① $T_{gas0} = 317^\circ\text{C}$ と、反応発熱時の平衡温度② $T_{gas1} = 335^\circ\text{C}$ から、上昇温度③は $\Delta T_{gas} = +18^\circ\text{C}$ である。温度・熱量校正係数④の $k_1 = 0.63 \text{ W/}^\circ\text{C}$ との積として、過剰発熱量⑤は $W_{ex} = 11.3 \text{ W}$ と算出する。

4.3.4 反応発熱量の誤差 (変動, 精度)

反応発熱量の算定に関しては、実験中の各温度データの

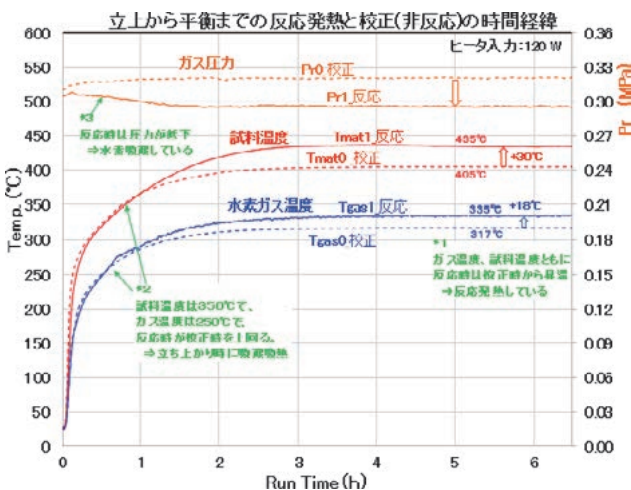


図6 ヒータ印可後の温度経緯。

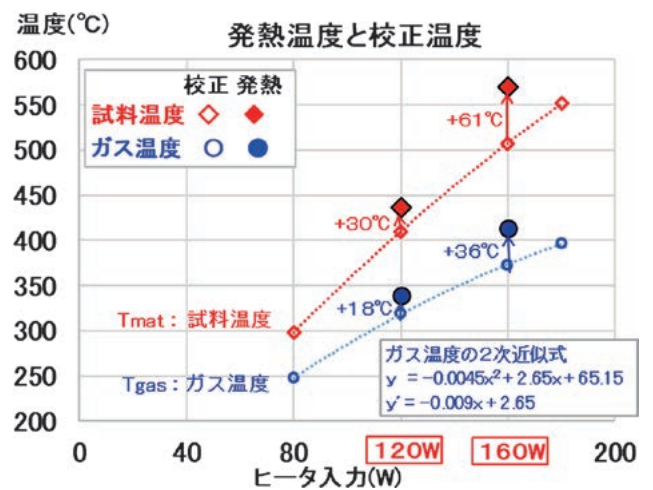


図7 ヒータ入力に対する平衡温度。

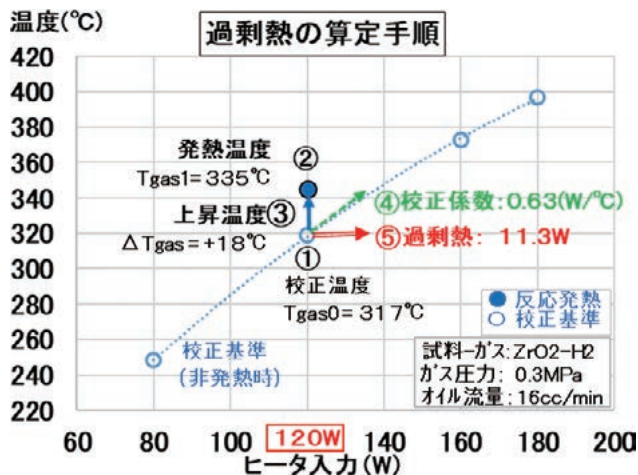


図8 過剰熱の算定手順.

変動やいくつかの誤差要因のため、校正試験との比較算定は誤差を含む。これらの誤差要因から、最大1~2W程度の算定誤差と見積もっている。

平衡温度の主な変動要因には、オイル流量やガス圧力による変動がある。ヒータ加熱に加えて反応発熱による温度上昇によりオイル粘性などが変わりオイル流量が変動する。オイル流量の変化によりオイル管に接する反応器壁の熱伝達状況が変わり、結果、装荷試料の温度までも影響を受ける。ガス圧力は、反応発熱試験中の反応試料への水素吸蔵により校正試験時より圧力が低くなり、水素ガスによる伝熱状況に影響して、反応器内はやや高い温度となる。オイル流量と水素ガス圧力の変動に対しては、別途、補正計算もできるが、熱量算定の誤差要因となる。

他の発熱量算定の誤差要因となるのは、生成方法や粉碎状況による試料毎の熱特性の差、試料装荷状態による差がある。試料は生成時の酸化率や粉碎粒径により、密度や空隙率などが異なる。また、メッシュホルダーへの試料装荷量が校正試験のジルコニアビーズの装荷量と少し異なっている。また、反応発熱中は装荷試料の縦方向に温度分布があるが、試料により反応発熱の温度状況が異なるため、校正時の温度分布によるガス温度との差は誤差となる。

しかし、これらの誤差の総和の1~2Wを考慮しても、反応発熱量は十分に大きいので、発熱状況の把握や試料の優劣の判断は変わらない。

4.4 実験結果

代表的な試験結果として、ヒータ入力120Wでの校正時と反応発熱時を比較して示す(図6)。

ヒータ入力を印可すると反応器内の温度が上昇して、3h程度で平衡状態になる。

立ち上げ初期に、反応時の方が校正時より低い温度となる要因は、温度上昇の過程での水素吸蔵による吸熱である。校正時の圧力Prの時間経緯は、反応器内の温度上昇に伴う水素ガスの体積膨張で圧力が上昇しているのに対し、反応時には2hに渡り圧力が下降しており、この間の水素吸蔵の発生を示している。試料温度350℃、ガス温度250℃あたりで反応時の温度が上回り、反応器内部での反

応発熱の発生を示している。このデータ例での平衡時の上昇温度は、試料温度で+30℃、ガス温度で+18℃の上昇である。

ガス圧力は温度上昇過程での水素吸蔵量による圧力低下の方が、温度上昇の温度膨張による圧力上昇を上回るため、校正試験時の圧力経緯より低下している。2h程度でガス圧力は安定して、試料温度やガス温度は校正試験より高い温度が継続しているにもかかわらず、ガス圧力はほぼ変化しない。これは、水素ガスの消費量が微量な凝集系核反応による異常発熱の発生を示している。

異なるヒータ入力での平衡温度の温度上昇の状況を示す(表1)。ヒータ入力の120Wと160Wではガス温度上昇は18℃から36℃に上昇して、算定発熱量も11.3Wから32.4Wに増加している。ガス温度と試料温度をある程度まで高温にした方が、反応発熱量は上昇傾向である。さらに高温域では発熱量が低下する傾向があり、反応発熱自体の温度特性に加えて、高温域ではCNZ試料の複合ナノ構造が保てない可能性なども考えられ、検証を継続している。

発熱性能の評価判断には、比発熱量(W/g_試料)や成績係数COP=(印可電力+発熱量)/印可電力などで評価している。比発熱量は、各試料の重量当たりの発熱量で、試料自体の発熱性能を示している。COPは、試料の発熱性能に加えて、反応器の性能(反応器内の伝熱特性や熱損失)も含んだ工学的な指標となる。また、異常発熱の反応面の指標では特性エネルギー η (MJ/mol_H)があり、水素吸蔵を含む総水素消費量の水素1モル当たりの発熱量を示し、化学反応とのレベルの違いなどを示す。

これまでの最高性能値では、比発熱量は、1.06W/g_試料、COPは1.56である。特性エネルギーは、試料内への総水素吸蔵量が0.63molに対して、反応発熱が32h継続した積算発熱量の1.8MJから算出して、2.8MJ/mol_Hである。これは、水素と酸素が水となる化学反応の0.14MJ/mol_Hを大きく上回る値であり、ガソリンや天然ガスなどの化石燃料の燃焼、または水素の吸着や吸蔵などの化学反応では発生し得ないレベルの熱量である。この値も、従来の化学反応ではない核反応由来の反応が実際に発生している証拠である。

また神戸大では、核反応由来の別アプローチによる反応証拠として、凝集系核反応で提唱されている4H/正四面体凝縮理論(4H/TSC: 4 Hydrogen / Tetrahedral Symmetric Condensation)[8,9]からの核反応生成物とされる ^3He の検出を、核反応分析法(NRA: Nuclear Reaction Analysis)と昇温脱離法(TDS: Thermal Desorption Spectrometry)という二つの独立した方法で実証している[10]。

表1 ヒータ入力による平衡温度と発熱性能.

ヒータ入力 (W)	120	160
ガス温度上昇 (°C)	18	36
熱量係数 (W/°C)	0.63	0.90
発熱量 (W)	11.3	32.4
比発熱量 (W/g_試料)	0.19	0.54
COP: 成績係数	1.09	1.20

4.5 まとめ（今後の展望）

ガスローディング法による水素の異常発熱は、異なる生成試料による反応発熱を繰り返して確認しており、その反応は長時間にわたり発生継続し、発熱量も上昇している。しかし、反応発熱の発生状況には、まだ未解明な部分が残る。複合ナノ構造の素材金属量と水素量は、反応器内に十分にあると思われるが、反応発熱量を増加するのには謎と壁がある。

反応試料の生成方法と発熱量との相関関係は、いくつかの要因が明らかになってきている。水素吸蔵を含む反応発熱の発生状況と反応サイトと推定される複合ナノ構造との関係解明も引き続き進行している。反応発熱試験中に発現する反応発熱状況が変動したり、急激な温度上昇（発熱バースト）などの、いくつかの未解明現象の機構解明も、まだまだ研究の途上である。

実用化や社会実装には、比発熱量（暫定目標10W/g_試料）やCOP（成績係数、目標5以上）の更なる向上が必要である。SDGsやGXに多大な貢献が見込まれる本技術の全貌解明とその実用化に向けては、幅広い研究者、技術者、およびメーカーからのより多くの参入を呼びかけて、総合的な研究と開発の進展が切望される。

参考文献

- [1] Y. Iwamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 037001 (2024).
- [2] A. Kitamura *et al.*, Int. J. Hydrogen Energy **43**, 16187 (2018).
- [3] A. Takahashi *et al.*, Proc. 20th Meeting of Japan CF Research Society, JCF20, pp.9-27, Fukuoka, Japan (2019).
- [4] A. Takahashi *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **33**, 14 (2020).
- [5] A. Takahashi *et al.*, Proc. 23rd Meeting of Japan CF Research Society, JCF23, pp.119-125, Waseda Univ. Japan (2023).
- [6] Y. Mori *et al.*, Proc. 22nd Meeting of Japan CF Research Society, JCF22, pp.1-12, virtual meeting (2022).
- [7] M. Hasegawa *et al.*, Proc. 22nd Meeting of Japan CF Research Society, JCF22, pp.13-26. virtual meeting (2022).
- [8] A. Takahashi, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **12**, 1. (2013).
- [9] A. Takahashi, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **15**, 1. (2014).
- [10] T. Yamauchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **106**116, R2 (2025).



小特集 凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱

5. 示差走査熱量計で観測される複合金属からの異常発熱現象

5. Anomalous Heat Observed from Metal Alloys in Hydrogen Using Differential Scanning Calorimetry

岸田 昌浩

KISHIDA Masahiro

九州大学大学院 工学研究院 化学工学部門

(原稿受付：2025年3月26日)

本章では、水素中における微小な複合金属試料からの異常発熱を示差走査熱量計（DSC）を用いて調べた結果について述べる。対象とする異常発熱は通常の測定ではピークとして検出されないため、長期間の測定が必要であった。その測定例として Pd-Ni-Zr 系合金および Cu-Ni 合金の測定結果を示す。いずれも水素吸蔵熱等の既知の発熱とは異なる発熱を観測できており、特に Cu-Ni 合金は異常な変化挙動と総発熱量を示した。

Keywords:

anomalous heat, metal alloy, hydrogen, differential scanning calorimetry

5.1 DSCによる異常発熱測定の困難さ

メカニズムの不明な現象を調べる場合、雰囲気が均一になる微小試料を測定精度が既知の分析機器を用いて測定することが重要になる。そこで異常発熱現象を示差走査熱量計（DSC）を用いて調べることにした。

ここで対象とする異常発熱現象は、長期間にわたり持続的に続く発熱現象である。既往の報告では数週間もの長期間発熱が続いたという例もあるが、DSCではそれほど長時間の測定はできないため、最長で72時間の測定を行っている。

通常の発熱現象は、ある温度域に達すると発熱し発熱原料が消費されると発熱が終わる。観測という点では発熱のピークが観測される。しかし、異常発熱現象はピークとして観測されることが少ない（cf. 図2）。瞬間的に大きな発熱を起こす例もあるが、持続的な異常発熱の多くは、発熱ピークとして認識できないような時間変化を示す。それは発熱の温度依存性が小さいというよりは、発熱変化の時間スケールが長いことに因る。ゆっくりと発熱が起り始め、それが長期間にわたって続く。このような発熱現象をDSCで測定するには、通常の測定条件では検知しにくく、意識的に条件を設定しなければならない。観測対象である合金は珍しいものではないのに、そこからの異常発熱現象が見落とされてきた理由の一つは、このような異常発熱の特性によるものと推察される。

5.2 DSC測定装置と測定条件

DSCには水素雰囲気対応のLINSEIS社製PT1600Hを用いた。基本的な測定条件は、試料量30 mg, 昇温速度10 °C/min, 所定温度で温度を2時間以上保持するものであ

る。この測定を水素気流中とヘリウム気流中で連続して測定し、ヘリウム中での測定結果をベースラインとしたときの出力差を水素中での発熱出力とした。他にも様々な方法・条件で測定を行ったが、ピークにならない発熱を検出するためにはこの方法が最も適切と判断できた。この方法で通常の昇温測定も適切に測定可能である（cf. 図1a）。

5.3 Pd-Ni-Zr合金の水素中における異常発熱

図1は、Pd-Ni-Zr合金（モル比Pd: Ni: Zr = 1: 7: 15）を水素中で昇温測定した結果である。この合金は日産自動車から提供されたもので、メルトスピニング法によって合成され、表面が酸化処理されている。図1a)がDSCによる発熱測定結果で、b)はTPR法による水素吸蔵測定結果である。対応するピークに番号を付している。各ピークで起こっている現象の説明は省略するが、水素の吸蔵・脱離に対応して発熱・吸熱していることがわかる。番号2における吸熱と水素脱離の対応が良くないが、測定誤差と判断されるに違いない。しかし、PNZ合金は水素中300 °C前後での異常発熱現象が報告されている[1]。そこで温度400 °C（ピーク2付近）で昇温を停止し、その後温度を保持したDSC測定結果を図2に示す[2]。昇温中には図1のピーク1に相当する発熱とピーク2に相当する吸熱が観測されるが、温度400 °Cで保持すると、吸熱から発熱に切り替わって発熱が続いた。この結果だけでは温度保持中にベースラインがズレただけのようにも見えるため、温度を周期的に変動（1.0 °C/minで400 ± 5 °Cに変化）させた測定を行った（図3）[2]。発熱を起こさないNi単独金属では温度を変動させても熱出力に変化はなかった。一方、PNZ合金では熱出力が周期的に変動した。さらに、熱出

Kyushu University, FUKUOKA 819-0395, Japan

author's e-mail: kishida@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

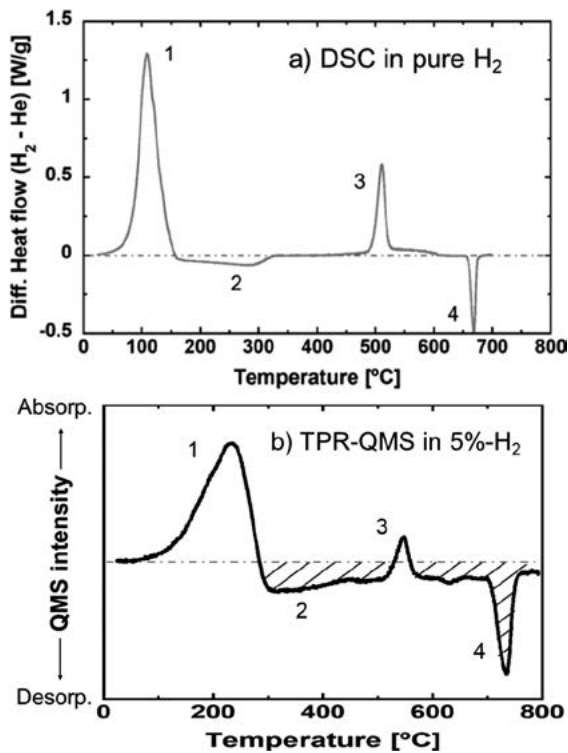


図1 水素中のPNZ合金のa)発熱挙動とb)水素吸蔵挙動。

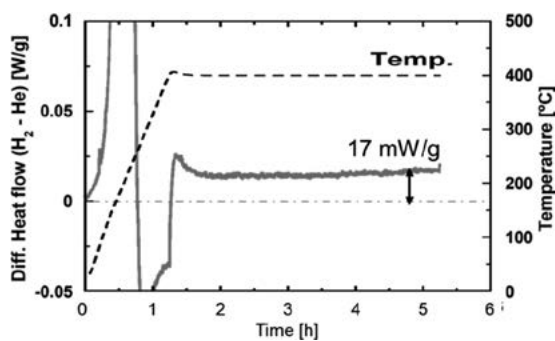


図2 水素中400°Cに保持したPNZ合金の発熱挙動。

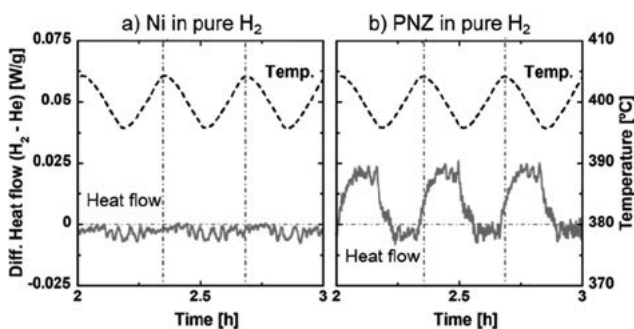


図3 水素中400±5°Cで変動させた時のDSC測定結果。

力周期の位相は温度変動の位相とは異なっており、温度の低下時に主に発熱が起こっていた。

以上より、PNZ合金は図1の2の領域において持続的に発熱していることが明らかとなった。その発熱は図2で示したように水素の吸熱に隠れており、温度を保持して水素の脱離が終息することで持続的な発熱が露わとなった。

この持続的な発熱は水素の脱離中に起こっているため、水素吸蔵熱と異なることは明らかである。図4には持続的な

出力の温度依存性と水素圧依存性を示す[2]。この温度依存性を図1と比較してみると、水素を吸蔵する温度域では持続的な発熱が起こらないことがわかる。また、水素圧を高めると持続的な発熱は小さくなる。これらの結果からも、持続的な発熱が水素吸蔵熱とは異なることがわかる。

PNZ合金には多くの金属間化合物が存在し、本研究の試料ではNiZr₂が主に形成されている。NiZr₂は水素中で昇温するとアモルファス化と不均化を起こして最終的にはZrH₂へと変化する[3, 4]。実際、本研究のPNZ試料も水素中で合金相が変化することがX線回折測定(XRD)からわかっている。その変化と発熱の関係を調べるため、PNZ試料を200°Cあるいは400°Cで処理した試料のNiZr₂のXRDピーク強度変化とDSCによる発熱挙動を比較した(図5)[2]。図5a)からNiZr₂結晶は水素中200°Cで徐々にアモルファス化していることがわかる。この不安定さはNiの一部がPdに置換されているためと考えられる。実際、Pdを含まないNi-Zr合金では、このような変化も持続的な発熱も認められなかった。図5a)の400°Cでは、XRDピーク強度の変化が200°Cの試料よりも相対的に小さかった。400°Cに昇温する前にアモルファス化が進行したためと考えられる。一方、図5b)の温度保持時の発熱挙動を見ると、200°Cでは発熱が起こっておらず、400°Cでのみ発熱が生じている。したがって、400°Cで観測された持続的な発熱はNiZr₂相の相転移熱とも異なると考えられる。

以上のように、PNZ合金試料は水素中300~500°Cにおいて持続的な発熱を起こしており、その発熱は水素吸蔵熱とも合金の相転移熱とも異なることがわかった。その発熱は、水素脱離による吸熱に隠れていたため、通常の測定方法では気づけないこともわかった。この持続的な発熱は数週間も続くために異常発熱であると報告されているが、DSCではそれほど長時間の測定は困難であった。

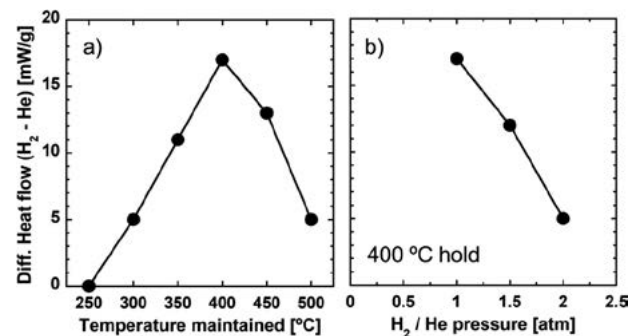
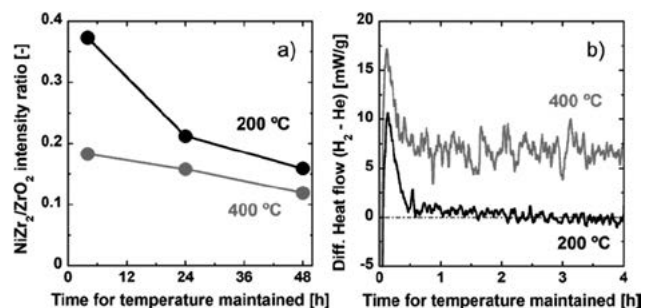


図4 観測された持続発熱のa)温度とb)水素圧の依存性。

図5 NiZr₂のa)XRDピーク変化とb)持続発熱挙動。

5.4 Cu-Ni合金の水素中における異常発熱

次に、Cu-Ni合金（CN合金）における異常発熱について述べる。この合金については700℃以上の高温において異常発熱現象が報告されている[5]。PNZ合金は様々な金属間化合物を形成するが、CN合金は全率固溶型合金である。また、水素をほとんど吸蔵せず、合金化熱も非常に小さい上に吸熱である。そのため発熱の異常性を調べることに適している。

まず、CuとNiの粉末を混合した試料、あるいはCuとNiの板を積層させた試料を希釈水素中1100℃で10～24時間熱処理することで均一なCN合金を得た。それらの試料の800℃で保持した場合の発熱挙動をDSCで調べた。その結果を図6に示す。いずれの試料も温度保持中には全く発熱していないことがわかる。良く研究されている合金であるため、この合金が水素中で異常発熱を起こすのであれば、多くの研究者が報告しているであろう。

ところが、この均一試料に新たにNiを加えて1100℃で1時間の熱処理を行って均一ではない状態にすると、わずかな持続的発熱が観測された。既往の報告[5]においても、CuとNiをナノスケールで積層させた試料からの異常発熱が観測されている。つまり、組成に不均一な部分があると異常発熱することが示唆される。

そこで、1100℃の熱処理で得た均一なCN合金（Cu: Ni = 7: 3）に硝酸ニッケル水溶液を含浸担持して窒素中で650℃で焼成し、さらに水素中900℃で1時間還元を行ってNi/CN試料を得た。この試料のXRD測定では、CN合金のピークに加え、Ni金属のピークも認められた。すなわち、組成に不均一な部分が生じていた。この試料の水素中での発熱挙動を調べた結果を図7に示す。この図から明らかなように、この試料は温度保持後12時間にわたって持続的に発熱した。12時間後に測定を停止したが、まだ発熱は続いていた。12時間後までの総発熱量は約2.2 kJ/gとかなり大きかった。また、発熱出力が周期的に変動しており、その周期は約6時間であった。CuとNiだけからなる試料が水素中で長時間にわたり、しかも周期変動しながら発熱することは極めて珍しい。

触媒調製法を参考にしてさらに不均一な試料の調製を行った。Cu粉末に硝酸ニッケル水溶液を含浸して800℃で8時間の熱処理を行い、その試料にもう一度硝酸ニッケルの含浸担持を行って650℃で2時間の熱処理を行った。最後に水素中950℃で30分の還元を行い、Ni/Ni/Cu

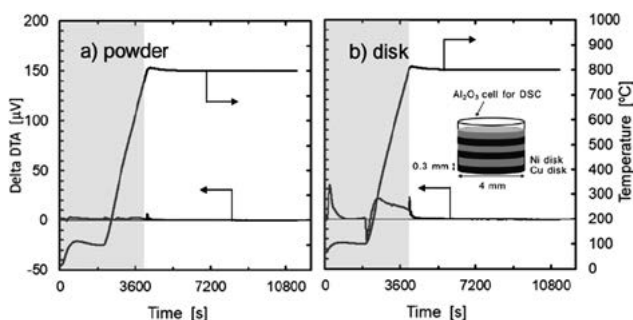


図6 均一なCN合金の水素中でのDSC測定結果。

試料を得た。モル比はNi: Ni: Cu = 0.5: 3: 7である。また、この試料を水素中800℃で長時間処理した試料も準備した。それらの試料のXRDパターンを図8に示す。調製直後には最後に担持したNi由来のNiOのピークとCN合金のピークが認められる。還元が十分ではなかったためにNiOであったが、CN合金に酸化Niが加わった状態である。この試料を水素中800℃で処理すると、合金のピークのみが検出され、水素中72時間処理しても変化はなかった。

この試料をDSCで測定した結果を図9a)に示す。このときの温度保持時間は2時間である。少しずつではあるが、発熱が起こり始めていた。通常であれば、このように微小な発熱は誤差として無視されるであろう。しかし、CN合金も異常発熱を起こすと報告されているため測定を継続した。72時間までの測定を行った結果を図9b)に示す。800℃で保持した後、約15時間まで発熱が大きくなっていき約100 mW/gの発熱が観測された。その後、熱出力は小さくなったが、20時間経過後に再び発熱が大きくなり、その変動が周期的に繰り返された。その周期は約22時間であった。図3では故意に温度を変動させたが、図9では温度一定にしているにもかかわらず、発熱出力が周期的に変動した。また、同試料をヘリウム中でベースライン測定し、念の為に試料を入れずに長時間測定も行ったが、出力は変動せずに一定値を示した。つまり、この試料からの水素中での周期的発熱を観測できていることに間違いな

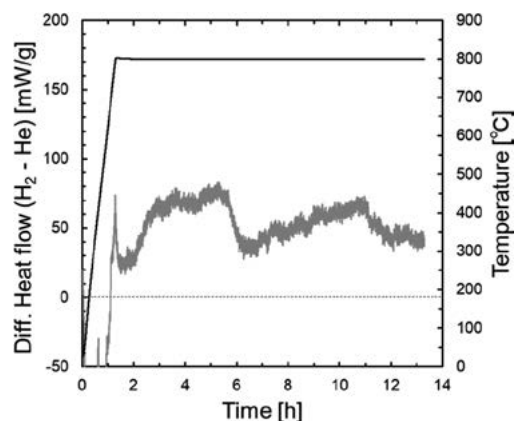


図7 Ni/CN試料の水素中でのDSC測定結果。

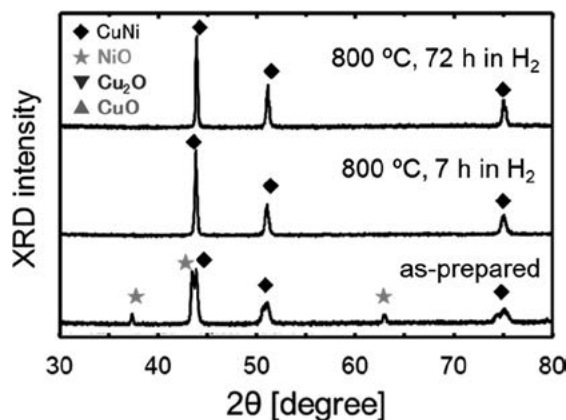


図8 Ni/CN試料のXRDパターン。

い。図6で示したように、この試料を水素中800℃で長時間処理しても合金相に変化は起こらないため、この周期的変化は合金相の変化によるものでもない。この原因はまだ不明であるが、このように金属が長時間発熱し、しかも周期的に変動する現象は極めて珍しい。この実験では72時間で測定を停止したが、まだ発熱は続いており、72時間までの総発熱量は約22 kJ/gにもなった。Cu-Ni系試料であることを考慮すると、この値を既存の科学で説明することはほとんど不可能である。以上のように、不均一な部分を有するCu-Ni系試料が異常発熱を起こすことが明らかとなった。

なお、図9では瞬間的に大きな発熱・吸熱の変動が起こっているように見える。これは電源ノイズの可能性もあるが、この異常発熱の観測後にはDSCのセンサーが必ずと言って良いほどの頻度で切れるため、瞬間的に大きな発熱が生じている可能性もある。

5.5 今後の展望と応用の可能性

異常発熱現象の発熱メカニズムは未だ不明であるため、まずは発熱メカニズムを解明することが最も重要である。そのための研究は、本小特集第7章で述べられているように国内でかなり進んできている。また、異常発熱や元素変換の観測例は世界的に増加してきており、一般学術誌へも掲載されるようになってきている[1, 5-7]。このような状況を鑑みると、異常発熱のメカニズム解明もそれほど遠く

ないと期待される。

本章で示した異常発熱現象はいずれも熱出力が小さいためただちに応用できるものではない。しかし、CuNi系試料に関しては他のグループ（本小特集の2-3章）がナノスケール厚さで積層したCuNi試料から大きな異常発熱を観測しており、応用可能性が十分に考えられる。その場合、異常発熱を起こす温度域が高いことを考慮すると、ボイラーなど高温で利用する装置を補助する役割を果たせるのではないかと。一方、PdNiZr系試料はCuNi系よりも低温で異常発熱を起こすことが特徴である。しかし、この応用を考えると、さらに低温で持続的に発熱する材料の探索が重要と考えている。そのような材料を見い出せば、冬の住居・自動車などの暖房補助などに応用できると期待される。

5.6 まとめ

本章では、示差走査熱量計（DSC）を用いた水素中の金属の異常発熱現象の観測について述べた。

異常発熱は、一定速度で昇温して短時間で終える通常のDSC測定では観測しにくかった。Pd-Ni-Zr合金では、水素の脱離による吸熱中に異常発熱が隠されていたため、脱離する温度で保持することで持続的な発熱を観測できた。また、Cu-Ni合金では異常発熱が生じるまでの時間が長く、10時間以上温度を保持して初めて異常発熱を検出できた。

異常発熱現象は、試料の組成とも深く関連していた。Ni-Zr合金では異常発熱が起こらないが、Niの一部をPdに置換したPd-Ni-Zrで異常発熱が起こった。Cu-Ni合金でも、組成が均一なCu-Ni合金は異常発熱を全く起こさないが、後からNiを添加して不均一な状態にすると異常発熱を起こした。その発熱挙動と総発熱量はともに異常と言えるものであった。

謝 辞

この研究は、(株)日産自動車および(一財)熱・電気エネルギー技術財団の支援を受けて実施されました。

参考文献

- [1] A. Kitamura *et al.*, Int. J. Hydrogen Energy **43**, 16187 (2018).
- [2] Y. Sato *et al.*, J. Condens. Matter Nucl. Sci. **35**, 111 (2023).
- [3] H. Shaaban *et al.*, Int. J. Hydrogen Energy **18**, 571 (1993).
- [4] M. Hara *et al.*, J. Alloys Compounds, **352**, 218 (2003).
- [5] L. Spitzer, Jr., *Physics of Fully Ionized Gases* (Interscience Publishers, Inc., New York, 1959) p.20.
- [6] Y. Iwamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **63**, 037001 (2024).
- [7] B-J. Huang *et al.*, Sci. Rep. **14**, 214 (2024).

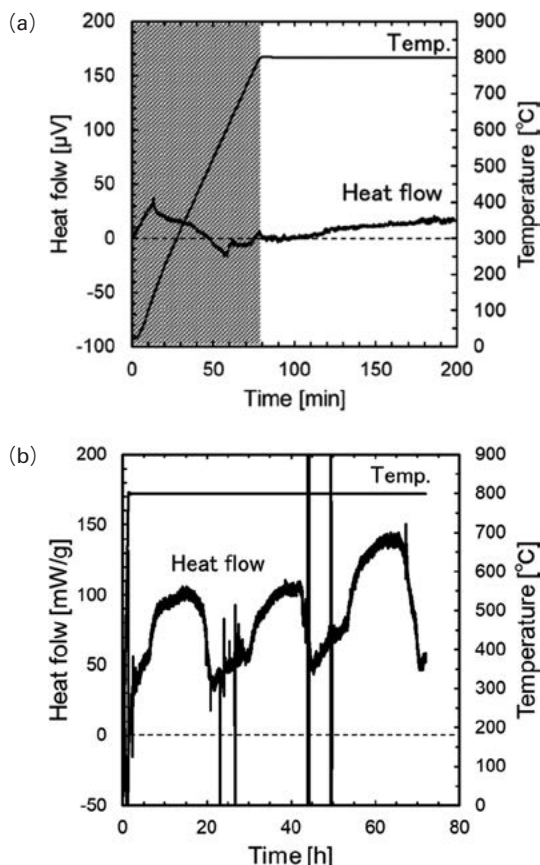


図9 Ni/Ni/Cu 試料の水素中での DSC 測定結果。
a) 初期部分, b) 測定結果全体。



小特集 凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱

6. 世界の動きと実用化への道すじ

6. Global Trends and Roadmap to Commercialization

林 雅美

HAYASHI Masami

株式会社クリーンプラネット

(原稿受付：2025年6月11日)

本章では、放射性廃棄物を出さない次世代クリーンエネルギー技術「凝縮系核反応」の国際的な研究動向と、実用化に向けた取り組みを紹介する。欧米では政府主導の研究が進み、日本ではクリーンプラネット社が量子水素エネルギーとして製品開発を推進中である。生成AIの普及による電力需要増への対応や、カーボンフリー社会実現に向け、本技術がエネルギー革新の鍵となる将来像を示す。

Keywords:

Clean tech, Deep tech, Fusion startup, Breakthrough energy, Quantum Hydrogen Energy (QHe), Solid-state fusion, Low Energy Nuclear Reactions (LENR), Advanced energy systems, Carbon-free energy, Sustainable innovation, Commercialization strategy

6.1 はじめに

近年、凝縮系核反応の研究と開発は飛躍的な進展を遂げている。従来の原子力技術とは異なり、放射線や放射性廃棄物を伴わず、持続可能なクリーンエネルギーとしての可能性を秘めたこの技術は、国際的な研究機関や民間企業の取り組みにより、実用化への道筋が明確になりつつある。ナノテクノロジーや高度な計測技術の進化により、過剰熱発生のメカニズムも次第に解明されつつあり、技術の確立と実用化が目前に迫っている。

本章では、欧州と米国における本分野の研究開発の動きと、筆者の所属する株式会社クリーンプラネットの実用化に向けた取り組みについて簡潔に紹介する。凝縮系核反応が将来的にエネルギーシステムへどのように組み込まれていく可能性があるのか、その展望を示すことで、本分野の意義と課題を理解する一助としたい。

6.2 世界の研究開発の動向

6.2.1 米国の動き

米国では本分野は「低エネルギー核反応 (Low Energy Nuclear Reactions, LENR)」と呼ばれており、2010年代半ば以降、民間および公的資金の投入により大きな進展が見られるようになった。

MIT (マサチューセッツ工科大学) のFlorian Metzler 研究員によると、その契機となったのが、Google 主導による5年間の研究プロジェクト (2015年開始) である。総額1,000万ドルが投じられ、材料特性の評価、パラメータ空間の探索、診断技術開発や熱量計の設計など、多岐の要素にわたる研究が、系統的かつ透明性を重視して行われた。最終的に27本の論文が公開され、再現性の確認には

至らなかったものの、学術誌『Nature』に掲載されるなど、若手研究者の参入や研究の信頼性向上に貢献した[1]。

Google プロジェクトの成果は、米国エネルギー省の先端研究計画局 (ARPA-E) におけるLENR研究プログラム採択にもつながった。ARPA-Eは2019年から2年間にわたり本分野を精査し、2021年にはワークショップを開催。その後、2023年2月から2025年末までを対象とした1,000万ドル規模の研究プログラムがスタートした。参加機関にはMIT、ローレンス・バークレー国立研究所、スタンフォード大学、ミシガン大学、テキサス工科大学などが名を連ねる。

このプログラムは、「新しい核反応は本当に存在するのか?」という根源的な問いを中心に据えており、外部の理解と信頼を得るためには「反論の余地のない証拠 (irrefutability)」と「再現性 (reproducibility)」の両立が必須とされている。そのため、高エネルギー粒子の検出が重視されている。

現在、6つの実験チームと2つの支援チームが活動しており、Pd複合材料からのガンマ線放出、共析法、グロー放電、ナノパウダーによる過剰熱生成の確認、ヘリウム検出、ガス負荷レーザー照射実験など、多様な手法が用いられている。支援チームは、核粒子検出と材料評価技術の高度化に貢献している。

MITのPeter Hagelstein教授をリーダーとする理論的研究も進展しており、同グループのJonah Messinger研究員は、2025年9月に開催された第16回国際ワークショップIWAHLM (後述) において、超放射とフォノン・核エネルギー交換を活用した量子力学モデルが、観測される核融合反応の発生頻度 (10%/秒) や、それに伴う過剰熱生成のしくみを説明できると報告した。さらに、Pdの共鳴状

態を崩壊パスの一つに組み込むことで、核変換等の実験結果との整合性を持つ理論的枠組みが構築されたという。

ARPA-Eは、核エネルギー技術において単一のアプローチに偏るのではなく、多様なポートフォリオへの投資が必要だとし、LENR研究プログラムを開始した。目標は、「最高レベルの学術誌に掲載可能な再現性のあるLENR実験成果」を少なくとも1件確立することであり、これによって分野全体の信頼性と資金調達環境の改善、さらには新たなエコシステムの形成が期待されている。本研究の成果は、2025年末から2026年頃にかけて公開される見通しである。

また、NASA (National Aeronautics and Space Administration, アメリカ航空宇宙局) や米国海軍研究所も長年この分野に取り組んできた。特にNASAの研究チームは、パラジウム (Pd), エルビウム (Er), 重水素を用いた「格子閉じ込め融合 (Lattice Confinement Fusion)」に成功している。2020年4月には『Physical Review C』誌に2本の論文を発表し、金属格子の電子による遮蔽効果 (electron screening) により、クーロン障壁が低下し、融合確率が飛躍的に向上することを示した[2]。

6.2.2 欧州の動き

米国のGoogle主導の研究が国際的に注目されたことで、欧州でも同様の研究をEU主導で推進する機運が高まり、2020年、EUのイノベーション促進政策である「HORIZON 2020」の枠組み内で、2件のプロジェクト「Clean Energy from Hydrogen-Metal Systems (Clean HME)」および「Breakthrough zero-emissions heat generation with hydrogen-metal systems (HERMES)」がスタートした。

Clean HMEは2020年8月から2025年1月にかけて実施されたプロジェクトで、欧州9か国16の研究機関が参加し、総額550万ユーロ (約9億円) の予算が投じられた[3]。目的は、①水素-金属系における異常発熱の再現性確立、②発熱量の向上をめざした材料開発、③加速器を用いた理論的検証、④産業応用のための技術開発である[4]。

2025年1月に開催された最終報告会において、ポーランド・シュチェチン大学のKonrad Czerski教授が率いる研究チームは、重水素-重水素反応において ^4He の励起状態としてDD閾値共鳴の存在を支持する高エネルギー電子-陽電子 (e^+e^-) 放出を初めて観測したと報告した[5]。また、フランス・エクス=マルセイユ大学出身、株式会社VegatecのJean-Paul Biberian名誉教授のチームは、新開発のハイドロタルサイト (hydrotalcite) ナノ粉末による再現性の高い異常発熱を、精密な熱流カロリーメトリーで定量的に確認したと発表し、現在は実用化に向けた発熱量のスケールアップに取り組んでいる[6]。

HERMESプロジェクトは、2020年11月から2025年4月にかけて、イギリス、ドイツ、フランスなど6か国7機関が参加し、総額400万ユーロ (約6.5億円) の予算で進められた。Pd-D (パラジウム-重水素) 系における発熱再現性の確立をめざし、シンクロトロン放射光、中性子源、質量分析、電子常磁性共鳴 (EPR) などの大型設備を用いて実験が行われた。また、密度汎関数理論 (DFT) に

よるPdナノ粒子のモデリングと、電気化学的水素吸収に関する解析手法の開発・検証が行われた[7]。

こうした成果により、欧州ではエネルギー変換効率の高い次世代技術としての応用可能性に対する産業界の関心が徐々に高まっている。今後、これら2件のプロジェクト成果がEUの次世代エネルギー政策にどのように位置づけられるかが注目される。

6.2.3 国際学会と業界団体

凝縮系核反応に関する国際的な学術交流の中心となっているのが、国際常温核融合会議 (ICCF: International Conference on Cold Fusion) である。1990年に第1回が開催されて以降、アジア・アメリカ・欧州の三地域を持ち回りとする形式で、継続的に開催されてきた。直近では2025年5月、岩手大学主催により第26回会議 (ICCF-26) が盛岡で開催された。オンラインを含め約180名の研究者が参加し、42件の口頭発表のうち10件は日本の研究者によるものであった。

ICCFの他には、欧州を中心とする国際ワークショップ「IWAHLM (International Workshop on Anomalies in Hydrogen Loaded Metals)」がある。1994年の第1回以来、これまでに16回開催されており、米国やアジアからの主要研究者も参加している。近年では、ARPA-EやClean HMEプロジェクトに関わる研究者が、理論と実験の両面から議論を交わす場となっている。

分野全体の国際的な枠組みを支える組織としては、2003年に設立された、国際凝縮系核科学会 (ISCMNS: International Society for Condensed Matter Nuclear Science) が挙げられる。査読付き学術誌『The Journal of Condensed Matter Nuclear Science (JCMNS)』の継続的な刊行に加え、研究成果や講演の動画公開などを通じて、本分野の認知向上 (アドボカシー)、知見の共有、国際的なネットワークの形成が進められている。

国内では、1999年に設立されたCF研究会 (Japan CF Research Society) が中心的な役割を担っており、24回の年会が開催されてきた。また、国内の新たな取組みとして、2025年6月2日に、東北大学主催・株式会社クリーンプラネット協賛による第1回クリーンエネルギーセミナーが開催された。本セミナーは、原子核物理学のみならず、AI、計算科学、流体科学、材料科学、物性物理学など他分野の研究者の参加を促し、分野横断的な研究の発展を目的としている。第1回は55名が参加し、盛況のうちに終了した。今後は年2~3回の定期開催が予定されている。

6.3 実用化への道すじ

気候変動に起因する災害の頻発や環境負荷の増大を背景に、持続可能なエネルギー源への転換は喫緊の課題となっている。従来の再生可能エネルギーには、天候への依存や広い設置面積の必要性といった制約があり、安定供給や迅速な普及には課題がある。加えて、生成AIをはじめとするデジタル技術の急速な進展により、世界のエネルギー需要はかつてない速度で増加しており、エネルギー供給の逼迫が現実味を帯びている。

こうした背景を受けて、株式会社クリーンプラネット（本社・東京）は「安全・安定・安価な次世代クリーンエネルギーの実用化」を掲げ、2012年に設立された。クリーンプラネットは、凝縮系核反応技術を活用した新しいエネルギー源を「量子水素エネルギー（Quantum Hydrogen Energy, QHe）」と名付け、基礎研究から応用開発、実装に至るまで一貫した開発体制を構築している。

2015年から10年間、東北大学電子光物理学研究センターに凝縮系核反応共同研究部門を設置し、金属-水素系の異常発熱反応の研究を推進してきた。2015年から2017年にはNEDOプロジェクトに参画して、ニッケル-銅系ナノ構造金属と軽水素を用いた安価かつ安全な発熱手法の確立に成功した。この成果を受け、2020年、実用化を見据えた研究開発拠点「KAWASAKIベース」が開設され、量子水素エネルギーを利用した製品開発が本格的に進められている。

量子水素エネルギーの最大の特長は、少量の水素で安定

的かつ高密度な熱エネルギーを発生できる点にある。放射線や放射性廃棄物を出さないことから、居住環境や市街地近傍での設置も可能である。わずか10グラムの水素で一般家庭の1か月分の電力と熱を供給できると試算されており、分散型エネルギー社会の実現を後押しする技術と位置づけられる。

現在、クリーンプラネットでは、三菱地所、三浦工業、三菱商事など複数の大手企業と連携し、産業用熱源、データセンター向け発電、地域の分散電源といった用途を見据え、実製品仕様の試作機の開発を進めている。円筒形モジュール（直径10 cm、高さ120 cm）1本で24 kWの出力をめざし、これを25本組み合わせることで、1トン規模の産業用ボイラーに代替可能な熱源となる計画である（図1）。さらに、有機ランキンサイクルなどの既存発電技術との組み合わせにより、2030年代前半には発電システムの実用化をめざす（図2）。

実用化に向けた主な課題として、各モジュール間の性能

量子水素エネルギー(QHe) 発熱モジュール

- 非常に小型・軽量で、どこにでも設置可能
- 24kWのモジュール1本で1世帯の1か月分のエネルギー需要（電気・熱）をカバー
- 直列・並列に連結することで様々な温度や出力のニーズに対応

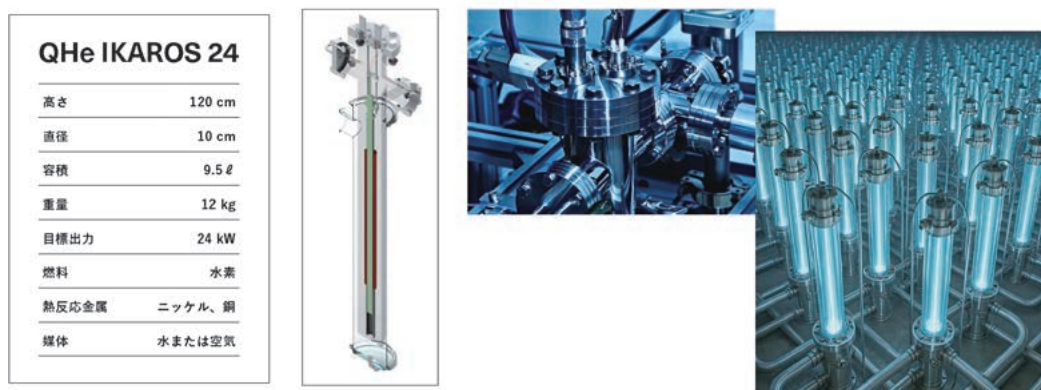


図1 量子水素エネルギーを実装した製品「QHe IKAROS 24」の概要。

量子水素エネルギーが実装される社会予想図

- 単なる代替エネルギーを超える可能性
- 発熱モジュールの完成から、QHe産業用ボイラーの開発を経て、メガワット・レベルの分散型発電システム/コジェネシステムの実現へ



図2 量子水素エネルギー分散型システムが普及する社会予想図。

ばらつきを最小限に抑えるための高精度な加工・組立技術の開発と、出力密度の向上によるコストダウンが重要なテーマとなっている。

将来的には、量子水素エネルギーは単なる再生可能エネルギーの代替を超え、自動車、船舶、航空機、さらには宇宙開発など幅広い分野への応用も視野に入る。クリーンプラネットは、国際的な技術的関心を背景に、革新的エネルギーの実用化に向けた歩みを着実に進めている。

6.4 おわりに

世界の凝縮系核反応研究は、科学的探究から実用化をめざす段階へと確実に移行しつつある。欧州では学術と産業の連携、米国では国家主導による再現性検証が進んでおり、日本では株式会社クリーンプラネットによる実用化開発が進展している。

凝縮系核反応技術は、エネルギー産業、ひいては地球の将来を大きく変える可能性を秘めている。本章が、次世代エネルギー開発に関心を持つ読者の想像を広げる一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] F. Metzler (2024, September 5). *LENR Research in the USA* [Conference presentation video]. Solid-State Fusion. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=dpGy60aVsNE>
- [2] NASA Glenn Research Center. (n.d.). *Lattice Confinement Fusion* [Webpage]. NASA. <https://www1.grc.nasa.gov/space/science/lattice-confinement-fusion/>
- [3] European Commission. (2020). *CleanHME – Clean energy from Hydrogen–Metal systems*. CORDIS EU research results. <https://cordis.europa.eu/project/id/951974>
- [4] CleanHME Consortium. (n.d.). *Project objectives and overview*. Retrieved June 13, 2025, from https://www.cleanhme.eu/?page_id=13
- [5] CleanHME Consortium. (n.d.). *News article: CleanHME final event held at the University of Szczecin*. Retrieved June 13, 2025, from <https://www.cleanhme.eu/?p=710>
- [6] K. Czerski (2024, September 5). *Overview of the advances of the European project CleanHME* [Conference presentation video]. Solid-State Fusion. YouTube. <https://youtu.be/YuAnFdT7-Y0>
- [7] HERMES Project Consortium. (n.d.). *Objective of the Project*. Retrieved June 13, 2025, from <https://hermesproject.eu/research/>



小特集 凝縮金属系中の水素拡散による異常発熱

7. 今後の展開

7. Future Developments

笠木 治郎太

KASAGI Jirohta

東北大学 先端量子ビーム科学研究センター

(原稿受付：2025年3月24日)

金属と水素に起因する異常な発熱現象は、化学反応熱を遥かに上回る熱エネルギーを発生し、しかも、核反応に特有の高エネルギー放射線は殆ど発生しない。1989年以来‘Cold Fusion’ = Confusionと言われ多くの人には無視されてきた大きな謎に、現在、確かな光が差し込まれてきている。今後の展開は、このミステリアスな異常発熱現象の全てを、明るい輝きの下に、真に理解すること、更に、金属と水素が生み出す膨大なエネルギーの実用化を実現すること、この二つの大きなチャレンジである。

これは、取りも直さず、核エネルギー生成から熱エネルギーへの変換への過程を完全に理解することである。多くの努力がなされてきているが、研究者の多くが納得できる理論的な説明は、現在までなされていない[1]。‘Cold Fusion’は、陽子(とニュートリノ)、重陽子、金属イオン、格子、伝導電子、とそれらの励起状態を基礎とした、物質階層を跨いだ粒子群の量子力学的運動である。核融合始状態でのクーロンの強い斥力を乗り越えることが可能なのか、放出される核エネルギーのほとんど全てが凝縮系の熱エネルギーに変換されることは可能なのか。本質的には、この2点が問われ続けている。実験的には、Pd電極を用いた重水の電気分解による異常な過剰熱発生 of 衝撃的なアナウンスから36年経た現在、研究の多くは、実用化に有利と考えられるNi合金系と水素ガスを用いた系を対象にと、変化してきている[2]。この系において、最先端の実験方法、測定装置、金属試料素材等を基盤にしたリファインされた実験により、以下の疑問に答えを出していくことが、今後の展開の基本である。

7.1 「金属凝縮系の異常発熱は超低エネルギーの核融合か？」

繰り返し問われてきたこの疑問は、「実験が再現できない、結果が不正確、核生成物の欠如、等々」の批判に起因する。これらの批判に対して、過剰発熱を起こす金属試料の特異性が判るにつれ、再現性は大きく改善され、更に、カロリーメータの改善により過剰熱の正確さも向上してきた。その結果、異常な過剰熱量発生は確かであるという認

識は広がってきている。しかしながら、核融合の直接的証拠は未だ乏しい。通常の核反応に特有の放射線が観測されない以上、核融合残存物を信頼度高く測定することが、今後の展開に必要な最重要課題である。

これまで、Pd電極を用いた重水電気分解による発熱実験においては、dd融合の残存物とされる ^4He の検出量と発生エネルギーとの相関測定により[3]、 $\text{dd} \rightarrow ^4\text{He} + \text{熱エネルギー}$ (23.8 MeV)との解釈がなされているが、実験データは乏しく、測定値もバックグラウンドレベルに近い。また、水素/重水素ガスとNi系金属の発熱実験では、残存Heの測定はなされていない。

7.2 「核融合残存物測定と過剰発熱量に明確な相関は？」

核融合の直接証拠となる ^3He (水素ガスの場合)や ^4He (重水素ガスの場合)の測定例を増やすと同時に、残存物の測定量は過剰熱パワーが増大するに従い増大する筈である。この相関を精度良く測定する。これにより、核融合残存物1個当たり発生するエネルギーが明らかになり、核反応過程のより厳密なチェックが可能となる。上述のPdと重水素の場合においても、 ^4He 計測との比例関係の測定は乏しく、測定精度が高く定量的に考察できる実験が必要とされている。高分解能Q-massを用いて、Niベースのナノ構造複合金属と水素ガス (or 重水素ガス) との発熱実験における発熱量- ^3He (or ^4He) 生成量をオンラインで相関測定が必要とされている。

7.3 「異常発熱反応中の高エネルギー放射線は？」

Pdと重水素の系での過剰熱発生では、核融合の直接的証拠として、トリチウムと中性子の測定がなされ、金属中dd反応と真空中dd反応との大きな違いが指摘され、 $\text{dd} \rightarrow ^4\text{He} + \text{熱エネルギー}$ (23.8 MeV) が主反応過程であると考えられ、dd融合からの陽子 (3.0 MeV)、中性子 (2.2 MeV) の放出は非常に小さいと認識されている[4]。このような高エネルギーの粒子は、試料や反応容器の物質中で引き続き核反応を生じる。それらの2次反応からの

γ 線を含めて、高エネルギー放射線がどの程度発生しているのか。これまでの多くの実験では、反応容器近傍に設置した放射線モニターにより、バックグラウンドレベル以下という結論を得ているが、現在数Wの発熱パワーが 10^6 倍になった場合、反応容器外のモニターはどうなるのか。各種放射線の発生率の定量的な測定は、核反応過程の詳細な情報を得ることのみならず、クリーンエネルギー実用化開発にとって最重要課題の一つである。

高エネルギー粒子の直接測定は難しいが、2次反応による特性X線、 γ 線の測定により、高速粒子の同定と放出率の定量的測定が可能である。

7.4 「異常発熱反応は金属試料のどのような環境下／構造下で？」

最初に提起されたPd電極中での重水素反応に於いては、D/Pd比が0.8以上ということが、過剰熱発生の必要条件とされた[4]。しかしながら、第2章～第5章に述べられているNiベースの試料と水素ガス（及び重水素ガス）に於ける異常発熱では、H/Ni比は非常に小さいにもかかわらず（NiCu/Ni 薄膜では $H/Ni < 10^{-3}$ ）、過剰熱パワーは数Wにも達している。このことは、過剰熱発生は金属試料の全ての部位で生じるのではなく、ある条件下で局所的に水素濃度の高い領域が存在することを示している。水素が集積される領域として、空孔、ボイド、表面、結晶粒界、異相界面、等々の様々な格子欠陥やナノ粒子構造が候補として考えられており、最近では、Pd-H やNi-H 系でのSuperabundant vacancy、或いはNiCu合金でのKirkendall効果による空洞等も対象として考えられている。反応に関与する水素が金属中の何処に濃縮されているのか、このことの解明は、より大きな発熱のための素材開発には、必要不可欠である。これまでも発熱試料にたいするSEMによる観察／分析、SR放射光によるX線回折測定がなされてきたが、更なる展開は、過剰発熱が生じている試料のin-site測定である。

これらの問いかけに対して、本小特集に寄与したグループは、現在既に、実験的に応え始めている。

神戸大学グループ（金崎達）は核融合残存物 ^3He の測定を行い、既にポジティブな結果を公表している[5]。水素ガスの場合、新奇核融合の過程は単純ではない。重水素と同様に、 $pp \rightarrow d + \text{熱エネルギー} (+ \text{陽電子} + \text{ニュートリノ})$ という過程を考えると、反応後の電子・陽電子対消滅で生じる511 keV γ 線が必ず大量に観測されなければならない等、過剰発熱時の放射線観測結果と矛盾する。神戸大グループが考えているのは、Takahashiが提起している反応過程で、初期状態が2個の陽子ではなく、4個の陽子と4電子が同時に融合過程に関わる反応である[6]。この

場合、 $4pe^-$ 核融合の結果、終状態は $^3\text{He} + p (+\nu_e)$ となり、過剰熱を生成した試料中に ^3He が残存しているか、否かの問いかけが重要となってくる。この実験で、 ^3He と解釈できる粒子が本当に ^3He ならば、水素ガスとNi系での異常発熱の起源が超低エネルギーの核融合生起の証拠を示すものとして非常に貴重なものとなる。今後、発熱量との相関データの蓄積が期待される。

横浜市大グループ（岩村達）は、2色式熱画像計測装置を導入し、NiCu薄膜試料の表面温度の2次元分布のオンライン計測を開始している[7]。試料の放射温度は不均一な分布を示しており、ヒートバースト現象が生じた時の局所的なホットスポットの観測に成功している。発熱後のSEM観測と組み合わせることにより、 μm の精度で過剰熱発生の源を定めようとしている。

東北大学グループ（伊藤達）は、試料表面からの輻射強度スペクトルの波長範囲を広げ、輻射による熱量測定の信頼度の向上を図っている。高分解のQ-massによる、dd融合からの ^4He 、4p融合からの ^3He 生成のオンライン測定を組み合わせ、核融合残存物と過剰熱発生量との相関データの精度良い測定が開始される。

これらのリファインされた実験による基礎的なデータの蓄積が、金属凝縮系の異常な発熱現象の解明を加速し、実用化への道を広げていくものと期待される。

最先端装置・計測機器を導入し、長期間に渡る実験研究は、机上での‘Fusion’と言えども（我々にとっては）多額の研究資金なしでは遂行できない。この小特集で記述した研究は、NEDOプロジェクト、熱・電気エネルギー技術財団（TEET）、（株）テクノバ、（株）クリーンプラネットのサポートで遂行された。各機関の研究支援に関してこの場を借りて謝意を表明したい。

参考文献

- [1] D.J. Nagel, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **26**, 15 (2018).
- [2] L.O. Freire and D.A.d. Andrade, J. Electroanal. Chem. **903**, 115871 (2021).
- [3] M.H. Miles *et al.*, J. Electroanal. Chem. **346**, 99 (1993); M. McKubre *et al.*, Proc. ICCF8 (2000); A. Lomax, Current Science **108**, 574 (2014).
- [4] E. Storms, Naturwissenschaften **97**, 861 (2010).
- [5] T. Yamauchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **64**, 017004 (2025).
- [6] A. Takahashi *et al.*, J. Condensed Matter Nucl. Sci. **33**, 14 (2020).
- [7] Y. Iwamura, Talk presented at ICCF25, 26-30 May 2025.

小特集執筆者紹介


 いわむら やすひろ
 岩村 康弘

横浜市立大学 生命ナノシステム科学研究科 物質システム科学、客員教授。1990年東京大学工学系大学院原子力工学専攻博士課程終了、工学博士。1990年三菱重工業(株)に入社し、凝縮系核変換反応の研究開発に従事。2015年から東北大学 電子光理学研究センター 凝縮系核反応共同研究部門 特任教授として研究開発に取り組んできた。2025年、横浜市立大学に移り、関連研究を継続中。


 いとう たけひこ
 伊藤 岳彦

東北大学先端量子ビーム科学研究センター 研究教授、兼 横浜市立大学生命ナノ物質研究科 客員研究員。1989年京都大学理学研究科修士課程修了。1989年三菱重工(株)に入社し、凝縮系核反応による元素変換の研究に従事。2015年より東北大学電子光理学研究センターにて、引き続き、凝縮系核反応研究に取り組んできた。


 かさぎ じろうた
 笠木 治郎太

東北大学先端量子ビーム科学研究センター・名誉教授。50年以上にわたり原子核物理実験に従事。1989年から固体・液体金属中の超低エネルギー核反応研究が加わり、最近では異常発熱金属薄膜からの輻射スペクトル測定に深化。1年半程前の白内障の手術後、眼前全てがまぶしく輝きだしました。


 はせ がわまさひこ
 長谷川 雅彦

神戸大学 海事科学研究科 学術研究員。1984年名古屋大学大学院 応用物理学修了(修士)。(株)アイシンで、スターリングエンジン、化学蓄熱、燃料電池車などのエネルギー関連開発に国内外で従事。2020年より(株)テクノバと神戸大の凝縮系核科学の共同研究に参画。この革新的新技術の実用化への橋渡し役を担いたい思いで、研究開発とゴルフや旅行を共に楽しみながら推進中。


 かな さき まさと
 金崎 真聡

神戸大学大学院海事科学研究科・准教授。2014年3月神戸大学大学院海事科学研究科博士課程後期課程修了、博士(工学)。主な研究分野は、レーザー駆動イオン加速で、固体飛跡検出器を中心とした種々の放射線検出器を用いたレーザー加速イオン計測を行っています。趣味はルアーフィッシングで、夜の大阪湾の堤防に出没します。


 やま うち ともや
 山内 知也

神戸大学大学院海事科学研究科教授、同附属国際海事研究センターIMaRCセンター長、付属粒子線・加速器実験施設TAcLKU施設長。金属にイオン注入したヘリウムの昇温脱離の研究で学位(大阪大学1993年)。固体飛跡検出器の基礎と応用を25年以上にわたって研究。プロトンとデューテロン、トリトンの応答特性を求めた唯一の人物であることを自負。卓球愛好家。人生の12分の1は自転車の上で過ごしている。


 きし だ まさひろ
 岸田 昌浩

九州大学大学院 工学研究院 化学工学部門。研究分野：触媒反応工学・材料工学。専門分野とは異なりますが、約10年前から本特集分野の研究に取り組んでおります。


 はやし まさみ
 林 雅美

株式会社クリーンプラネット 執行役員グローバル戦略室長。国連開発計画(UNDP)、マイクロファイナンス・ネットワーク代表、世界銀行CGAPソーシャルパフォーマンス・タスクフォース運営委員等、SDGs関連での国際経験を豊富に持つ。東京大学法学部卒、サセックス大学開発学修士。4男(社会人、大学生、高校生、ネコ)の母。