

＜訳＞水素ガスに高温で暴露したジルコニア内に Ni と Cu のナノ金

属を分散させた複合材料中における He-3 の検出

Detections of He-3 in Ni-based binary metal nanocomposites with Cu in zirconia exposed to hydrogen gas at elevated temperatures

Tomoya Yamauchi ¹, Yutaka Mori ¹, Shuto Higashi ¹, Hayato Seiichi ¹,
Masahiko Hasegawa ¹, Akito Takahashi ², Akira Taniike ¹, Masato Kanasaki ^{1*}

¹ Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Kobe, 658-0022, Japan

²Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: kanasaki@maritime.kobe-u.ac.jp

要旨

本研究は、約 450℃の水素ガスに曝すと異常発熱を示していた、ジルコニア中にナノサイズのニッケル基合金をドープした複合材料の中にヘリウム-3 を検出することを目的とした。二つの相補的な分析技術を採用した： タンデム加速器からの 1.4 MeV 重陽子ビームを用いた核反応分析（NRA）と四重極質量分析計を用いた昇温脱離分析（TDS）である。双方の手法において試料中に He-3 が検出された。この同位体が極めて希少であることを考えると、この同位体の存在は、ニッケルを含む材料内で核反応が生じていることを強く示唆している。この発見は He-3 が主要な反応生成物の一つであることを独自に予測している、4H/TSC（4 水素/四面体対称凝縮）モデルを支持するものである。

1.はじめに

この研究は、高温で水素ガスに曝した、ジルコニア中に銅を加えたニッケルベースの二元金属ナノ合金を分散させた材料中にヘリウム He-3 を検出することにより、核反応の発生を実証する初めての試みである。この研究は、フライシュマンとポンズの重水電解に関する画期的な研究によって 1989 年に始まった「凝縮系核科学」または「常温核融合」の分野に属する（包括的なレビューについては、[1]を参照）。この分野における最近の進歩は、岩村[1]によって報告されたように、東北大学におけるナノ構造多層金属複合材料と水素ガス相互作用の開発によって推進された。

大気中のヘリウムにおける He-3 存在量は約 100 万分の 1 であり[2]、この組成は宇宙ビッグバン[3]における原始的な核合成に起因している。He-3 が極めて希少であることから、わずかに数百ミリグラムの物質から He-3 が検出されれば、軽水素の「クラスター」核融合過程

を含む核反応が起きている可能性を示す有力な証拠となる。

He-3 の生成を予測する理論モデルの一つに、4H/TSC (4 水素/正四面体凝縮) WS (弱・強核多段階融合) モデルがある [4, 5]。このモデルの概念を要約すると、立方体の 8 つの頂点に 4 つの陽子と 4 つの電子を対称に配置し、電子と陽子が立方体の 12 本の辺に対応する最短距離に位置するようにする問題を考えると、4 つの陽子によって作られる正四面体と、それに付随して直交する 4 つの電子によって作られる正四面体が得られる。これらの陽子と電子の静電ポテンシャルを古典的な点電荷として考えると、立方体が小さければ小さいほど、この系はより安定であるという結果になる。高橋[4,5]は、このような陽子と電子からなる体系の動的凝縮過程を、量子化したランジュバン方程式を用いて解いている。弱い相互作用 (電子捕獲) と直後の強い相互作用の結果として、系は不安定な Li^{*-4} 原子核になる。一つは He-3 と陽子を生成し ($4\text{Li}^* \rightarrow 3\text{He} + \text{p} + 7.72 \text{ MeV}$)、もう一つは重陽子と 2 個の陽子を生成する ($4\text{Li}^* \rightarrow \text{d} + 2\text{p} + 2.22 \text{ MeV}$)。この 2 つの崩壊過程の分岐比は実験的に決定される。私たちは、ナノサイズの Ni 結晶格子の中や表面で四面体構造が初期条件として起こりうるかどうかという議論を続けるよりも、結果としての He-3 に焦点を当てることにした。He-3 が検出されれば、4H/TSC モデルを支持する証拠となる。もちろん、これは He-3 生成を記述する他のモデルの将来の可能性を排除するものではない。

以前の研究でも、常温核融合反応の生成物としてヘリウムの捕獲が試みられたが [6]、この研究は、He-3 に特化した新しいアプローチである。この研究の革新的な前提は、He-3 が Cu-Ni/ジルコニア化合物マトリックス内に内包されているという仮説にある。この仮説を検証するために、2 つの異なる分析技術が採用された： 加速器からの重陽子ビームを利用した核反応分析 (NRA) と、四重極質量分析計と制御可能な加熱装置を備えた真空チャンバーとを組み合わせた昇温脱離分析 (TDS) である。Cu-Ni/ジルコニア化合物材料は、この研究における試みの実現可能性に必要不可欠であった。

2. 材料

本研究で分析した材料は、ジルコニア・マトリックスに担持された、銅含有量がわずかなニッケルベースの二元系金属ナノ合金である。これらのサンプルは、圧力約 300 kPa、温度約 450°C で水素ガスにさらされた。この Cu-Ni/ジルコニア・ナノコンポジットは、2015 年から 2017 年にかけての NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) プロジェクトで開発されたもので、東北大学、名古屋大学、九州大学、日産自動車株式会社、株式会社テクノバ、神戸大学の研究グループが共同で取り組んだ [7, 8]。

製造プロセスには 3 つの重要なステップがあった： まず、厚さ $10 \mu\text{m}$ の $\text{Cu}_x\text{Ni}_y\text{Zr}_z$ 複合合金の薄いアモルファス金属リボン (メルトスピニング) によって製造した。次に、これらのリボンを空气中 450°C で 60 時間焼成し、 Cu_xNi_y ナノ構造領域を持つ ZrO_2 マトリ

ックスを優先的に形成した。最後に、酸化されたりボンは、直径数から数十マイクロメートルの粒子に粉砕された。

NEDO プロジェクトは、この Cu-Ni/ジルコニア複合材料を含むいくつかの材料が、高温の水素ガス中で既知の化学反応に帰することが出来ない異常な発熱を示すことを確認して終了した[7, 8]。株式会社テクノバと神戸大学によるその後の研究により、これらの材料の発熱特性は大幅に改善された[9-14]。

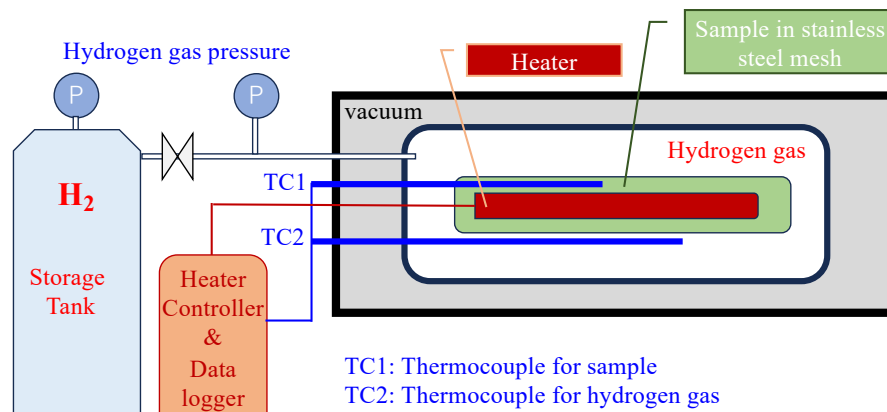


図 1 発熱実験装置の模式図。真空システムと油冷システムは無視している。

図 1 に発熱実験に用いた装置の模式図を示す。Cu-Ni/ジルコニア粉末試料はステンレスメッシュで覆われ、外側の貯蔵タンクと接続された水素ガスで満たされた内側の真空チャンバー、すなわち反応チャンバー（ICF70）の中央で円筒形の電気ヒーターと接触する。この反応チャンバーは、熱絶縁を維持し、安全を確保するため、外側真空室（ICF203）に固定されている。反応チャンバー内全体を粉末試料で満たしていた時期もあった。過剰熱は、Cu-Ni/ジルコニアサンプルとジルコニアサンプルのみを適用したときに到達した平衡温度と電気ヒーター入力との間の量的関係の差から推定された。

発熱特性を向上させるための重要な技術は、水素ガス中で発熱実験を行った後、Cu-Ni/ジルコニア試料を空気中にて 450°C で一定時間維持する熱処理工程である、再焼成の実施であった。再焼成を繰り返すことで、発熱特性がさらに向上することが確認されたが、最近の熱出力の進歩に関する詳細な特性については別途報告する。表 1 には、初期組成、熱処理および発熱実験の履歴、0.1 g あたりの積算発熱量、採用した分析方法など、今回の分析に使用した試料の包括的な概要を示す。

表 1 分析した Cu-Ni/ ジルコニア試料の一覧。

試料 ID	組成比 Cu:Ni:Zr	熱処理・発熱実験履歴	積算発熱量(J/0.1 g)	分析方法
#1	1:10:20	A+B+C+B+C+B	7.29×10^3	NRA

#2	1:10:20	A+B+C+B+C+B'+C	3.20×10^4	NRA
#3	1:7:14	A+B+C+B+C+B+C	5.50×10^4	NRA
#4	1:7:14	A+B+C+C+C	1.39×10^4	TDS

A：450℃で 60 時間焼成し、H₂ ガス中で発熱実験。

B: 450℃で 180 時間の再焼成 B'： 450℃で 60 時間の再焼成

C：H₂ ガス中での発熱実験。

3. He-3 検出のための予備的考察

3.1. 本仮説の妥当性

Cu-Ni/ジルコニアの試料は、Ni-Cu 合金と ZrO₂ マトリックスの 2 相から構成されていると考えるべきである。無機及び金属材料中のヘリウムの挙動について、原子炉材料研究の観点からまとめられた総説が Trocellier らによって報告されている[15]。Cu と Ni 及び ZrO₂ について、それぞれヘリウム保持特性が調べられている。仮説を検証するために採用した方法は、昇温脱離分析 (TDS) と核反応分析 (NRA) であるが、これらはこのレビュー論文でも紹介されている。TDS では、試料を真空中で一定の加熱速度で加熱し、真空中に放出されたヘリウムガスの分圧を質量分析計で測定する。温度の関数としてのヘリウム分圧の記録は、ヘリウムの昇温脱離曲線と呼ばれる。NRA では、高エネルギーに加速された診断ビームと試料中の標的同位体との核反応を利用する。これは、高エネルギーに加速された重陽子と He-3 との核反応 ($d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + 18.354 \text{ MeV}$) [15]を利用するもので、He-3 の同定に最も適した分析法であると考えられる。これによりアルファ線と陽子が生成される。特に陽子のエネルギーは 14 MeV 以上に達し、試料から容易に放出されるため、通常の放射線検出器 (CR-39 プレートや SSBD) で測定することが可能である。

TDS は、ヘリウムイオン注入後のヘリウムの昇温脱離挙動を解析するために、さまざまな種類の金属に広く適用されている。20 keV のヘリウムイオンを用いて Ni 中のヘリウムの保持特性が調べられた。そのヘリウムイオンの飛程は約 0.1 μm であり、室温、低フルエンスでほぼ 100%捕獲された。その結果、低フルエンスで 900℃までほとんどのヘリウムが Ni 中に保持されることが確認された[16]。Yamauchi らは Cu についても研究しており、低フルエンスで 850℃までほぼ 100%のヘリウムが保持されていた[17, 18]。10¹⁷ ions/cm² 以下であれば、Cu-Ni/ジルコニア試料の熱処理温度より高い 500℃程度まで温度を上げても、Ni と Cu は内部にヘリウムを安定に保持する。

ZrO₂ については NRA 分析が実施されており、Trocellier らの分析[19]では 830℃までの昇温で約半分の He-3 が試料から失われ、Costantini らの分析[20]では 927℃までの昇温で約 70%が失われる。ZrO₂ は一種のセラミックである。したがって、特にマイクロクラックがヘリウム保持特性に及ぼす影響を考慮する必要がある。しかし、ZrO₂ の結晶構造の欠陥が少なければ、500℃程度の昇温でほぼ 100%の He-3 が試料中に残留すると予想される。

すなわち、Cu-Ni/ジルコニア試料を加熱した場合、少なくとも Cu-Ni ゾーンの金属相では、生成した He-3 のほぼ全量が試料中に残存すると予想される。本研究で用いた Cu-Ni/ジルコニア試料は、TDS と NRA の両方ともに 0.1 g であった。

3.2. TDS

今回の昇温脱離分析 (TDS) 実験では、試料を 10°C/min の一定の昇温速度で室温から 1200°C まで昇温した。四重極質量分析計 (PrismaPro QMG250M2, Pfeiffer Vacuum, Germany) を用いて、様々な質量数の分圧を測定した。赤外線誘導加熱装置 (GVL298、サーモ理工株式会社、日本) を使用し、試料とそのホルダー以外の意図しない温度上昇を最小限に抑えた。図 2 に TDS システムの外観(a)と試料室内部(b)を示す。

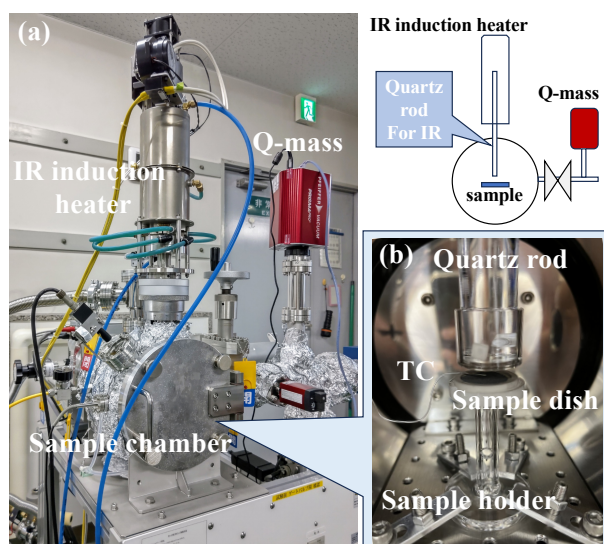


図 2 TDS システムとサンプルチャンバー内部の写真。

He-3 のシグナルは質量数-3 で現れるが、残留している水素含有ガスにより質量分析計のイオン源で必然的に生成される H_3^+ イオンもこのシグナルに寄与する。このような重複はあるものの、水素とヘリウムの真空中への熱放出挙動は大きく異なる。さらに、水素原子 (H または H^+) と H_2 との反応による H_3^+ の生成は、H、 H_2 、 H_2O の分圧と相関があると予想される。逆に、He-3 シグナルは水素を含む化学種とは相関しないはずである。質量数-3 シグナルは DH^+ (重水素とプロチウム分子イオン) からの寄与も含む可能性があり、これは H_2^+ と同様の温度依存性を示すと予想され、放出はヘリウムとは異なる温度範囲で起こる。トリチウム (T^+) は理論的には質量数-3 シグナルに寄与する可能性があるが、実験体系に意図的に導入されない限り無視できる。TDS は原理的には定性と定量の両方の分析が可能であるが、本研究では定性評価のみに焦点を当てた。

3.3. NRA

核反応分析 (NRA) 実験は、神戸大学大学院海事科学研究科粒子線・加速器実験施設 (TAcLKU) のタンデム型静電加速器 (5SDH-2, National Electrostatics Corp. USA) の M15 ビームラインを用いて行った [21, 22]。エネルギー 1.4 MeV、電流 5 nA の重陽子ビームを用い、各試料に 5 時間の照射を行った。陽子の検出には、高感度固体核飛跡検出器 (テクノトラック、千代田テクノル社製) CR-39 検出器[23]を用いた[24]。図 3 に本研究で採用した NRA システムの説明図を示す。

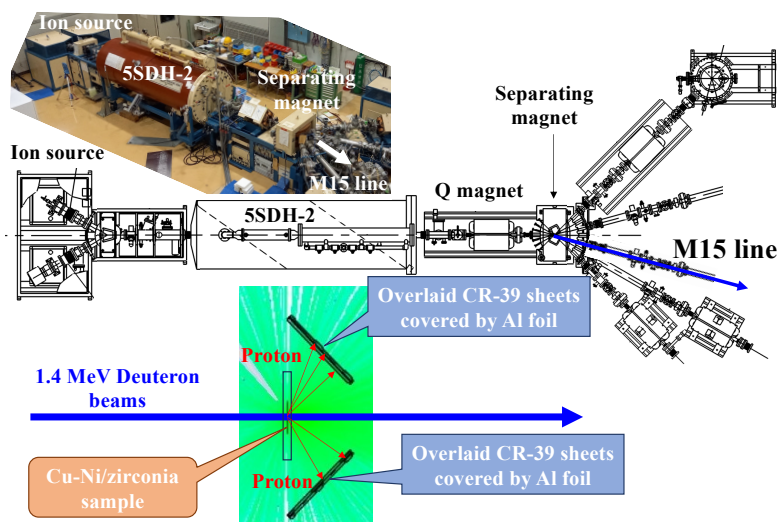


図 3 神戸大学タンデム加速器 5SDH-2 の重陽子ビームを用いた NRA システムの説明図。

粉末 Cu-Ni/ジルコニア試料は、ビームモニター用蛍光板の $9 \times 9 \text{ mm}^2$ の開口部内に収められ、両面をカプトン薄膜で固定した。2 台の CR-39 検出器を積み重ね、ターゲットに面した面をアルミホイルで遮蔽した。この構成により、厚さ 0.9 mm の CR-39 シートを透過して 2 番目の検出器に到達する 10 MeV 以上の陽子だけを選択的に検出することができた。モンテカルロコード PHITS は照射・分析システムの設計と最適化に利用された。試料中の He-3 の定量分析は、観察された陽子によるエッチピットの数に基づいて行われた[25]。

図 4 は、1.4 MeV 重水素ビームと Cu-Ni/ジルコニアターゲットとの相互作用に関する PHITS シミュレーションの結果である。ターゲットによって散乱された重水素ビームは一定の広がりを持つが、これは CR-39 検出器を適切な位置に配置することで回避できる。図 5 は、PHITS シミュレーションによる、ターゲット中の He-3 と重水素の反応により生成された陽子の挙動を示している。生成された陽子が CR-39 検出器に垂直に入射するような配置が選ばれている。この計算では、He-3 が Cu と同量試料中に存在すると仮定し、生成されるプロトンの量を強調している。CR-39 検出器を用いた陽子や他の粒子のエネルギー評価については、Kanasaki らの論文[26, 27]に詳しい。エッチングは 6 M KOH 溶液を用いて 70°C で 5 時間行った。エッチピットは神戸大学研究基盤センター・アイソトープ部門に

ある光学顕微鏡（VHX-5000, KEYENCE CORPORATION, Japan）を用いて観察した。

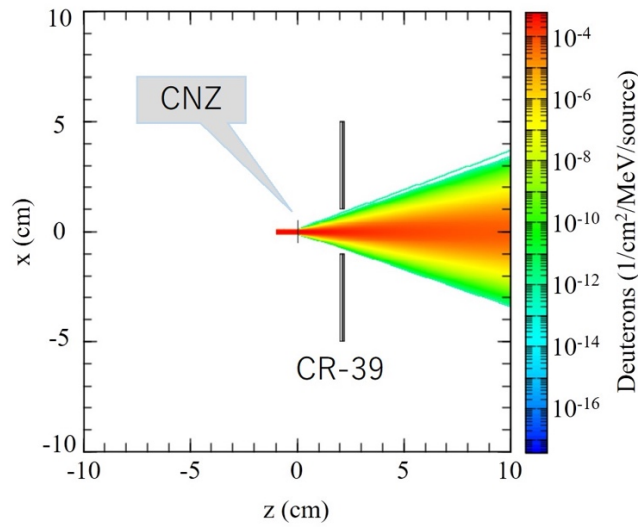


図4 PHITS シミュレーションによる 1.4 MeV 重陽子の Cu-Ni/ジルコニアターゲット (図中 CNZ) による散乱挙動。y の範囲は-10~10cm。

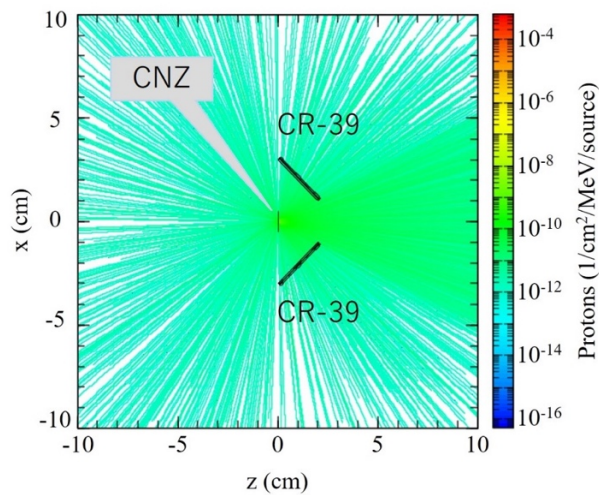


図5 1.4 MeV 重陽子を照射した Cu-Ni/ジルコニアターゲット（図では CNZ として示す）からの陽子生成挙動の PHITS シミュレーション。y の範囲は-10~10cm。

核反応分析(NRA)[15]における陽子測定には、通常、表面障壁型半導体検出器(SSBD)が用いられてきたが、本研究では CR-39 固体核飛跡検出器を用いた。この方法の主な利点は、潜在飛跡、微小な腐食孔であるエッチピットとして現れる陽子の軌跡、の生成にあり、これにより個々の陽子の信頼性の高い検出と同定が可能になる。10 MeV 以下のエネルギーの陽子が垂直に入射する場合、CR-39 検出器はほぼ 100%の検出効率を有する[24]。

今回の実験体系では、2 枚の CR-39 検出器を重ね合わせた。陽子は最初の CR-39 層を通過する間に減速し、その結果、約 10MeV 以上の初期エネルギーを持つ陽子だけが 2 枚目の検

出器に到達する。その後のエッチング過程で可視化されたエッチピットの幾何形状と成長挙動から、陽子起源であることが明確に確認された。

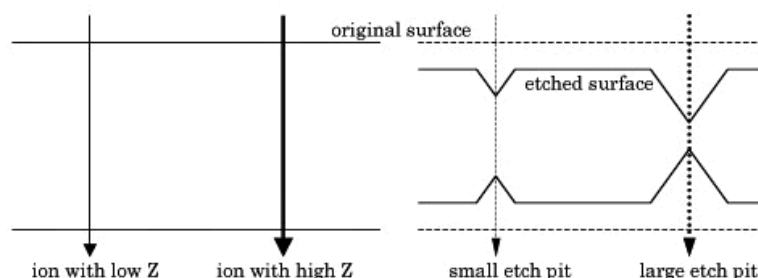


図 6 エッチングされた核飛跡検出器の動作模式図。これは相対論的高エネルギー粒子を用いた例で、 Z は核電荷である。

図 6 は、エッチングされた飛跡検出器の動作原理を模式的に示したもので、2 種類のイオンが検出器を透過する場合を描いている。このシナリオでは、イオンの潜伏飛跡に沿ったトラックエッチング速度 (V_t) がバルクエッチング速度 (V_b) を上回る。結果として生じるエッチピットの形状と寸法は、入射イオンの電荷とエネルギーによって異なる。ブラッグピークを超えるエネルギーを持つ陽子については、入射エネルギーと潜在飛跡の損傷密度の間に逆相関が存在する。その結果、より高エネルギーの陽子はより低いトラックエッチング速度をもたらし、エッチピットは小さくなる。トラックエッチング速度の深さ依存的性によって、エッチピットの形状は理想的な円錐からはずれることに注意が必要である。本研究の体系では、10 MeV を超えるエネルギーを持つ陽子は、2 枚目の CR-39 シート内に記録される前に 1 枚目の CR-39 シートを通過するので、高エネルギー陽子の選択的検出が可能となる。

3.4. Cu-Ni/ ジルコニア試料

以下では、定量分析に成功した NRA の結果を最初に述べ、次に TDS の結果を述べる。NRA 用に 3 試料、TDS 用に 1 試料を準備した。そのリストは先に表 1 に示している。これらの試料を選択に際して重視したのは、He-3 が多く含まれると予想されることであった。その結果、積算発熱量の高い試料が選択された。したがって、試料の発熱実験履歴は単純ではない。Cu-Ni/ジルコニア調製後の最初の発熱実験に加えて、試料は 2~3 回の発熱実験を経験している。NRA 分析に使用した試料の積算発熱量は、互いに 1.5 倍以上異なっている。試料#1 と#2 の初期組成比は試料#3 と異なり、TDS に用いた試料#4 の初期組成比は試料#3 と同じである。しかし、全 Cu と Ni と Zr の比率に有意な差はなく、分析結果に対する初期比率の影響はそれほど大きくないだろう。各発熱実験では約 40 g の試料が使用され、そこから 0.1 g が NRA または TDA 用に採取される。分析用の各サンプルは、発熱サンプルの中心付近の、ヒーターに近接した領域から採取された。試料の計量も含め、発熱量の計算には少なくとも 10% の誤差が予想される。仮に計算値の精度に問題があったとし

ても、評価値の大小関係に間違いは生じない。

4. 結果

4.1. NRA の結果

図 7 に試料#3 の NRA 分析結果を示すエッチング後の CR-39 表面の光学顕微鏡写真を示す。大きさの異なる複数のエッチピットが観察され、大きさから全てプロトンのエッチピットと判断できる。ここに示したエッチピットは検出器表面に対してほぼ垂直であり、中性子関連とは考えにくい。自然に発生したアルファ線である可能性は、エッチピットの大きさと、それらがすべてほぼ垂直に入射しているという事実の両方から否定される。この写真と同様の数密度の異なるエッチピットが試料#1 と試料#2 でも観察された。これらの試料に相応する量の He-3 が含まれていることは確かである。

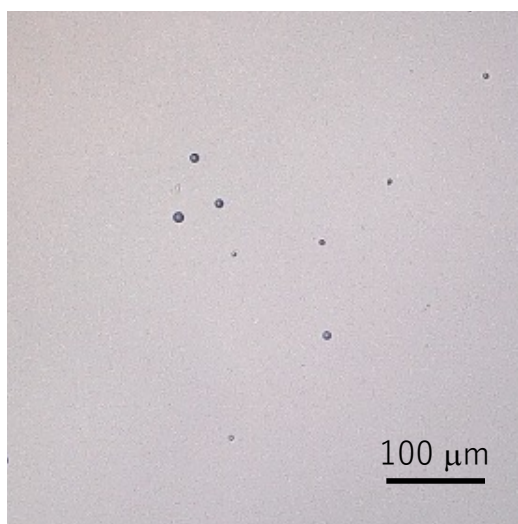


図 7 表 1 に示した試料#3 の CR-39 飛跡検出器上のエッチピットの光学顕微鏡写真。CR-39 上のエッチピット密度は $1,113 \pm 23$ ピット/cm² であった。

図 8 は、これら 3 つの試料について、水素ガス中での発熱実験における積算発熱量と CR-39 上に記録された陽子のエッチピット数密度との関係を示している。横軸の発熱量の誤差は各ステップでの発熱量計算から得られたものであり、縦軸のエッチピット密度の誤差は各統計誤差である。陽子のエッチピット密度は積算発熱量にほぼ比例して増加することが明瞭に示されている。さらに、3 つの実験点に対する最適直線は、ほぼ原点を通過している。このことは、本実験系では陽子のエッチピットの生成に He-3 以外の影響はほとんどないことを示している。

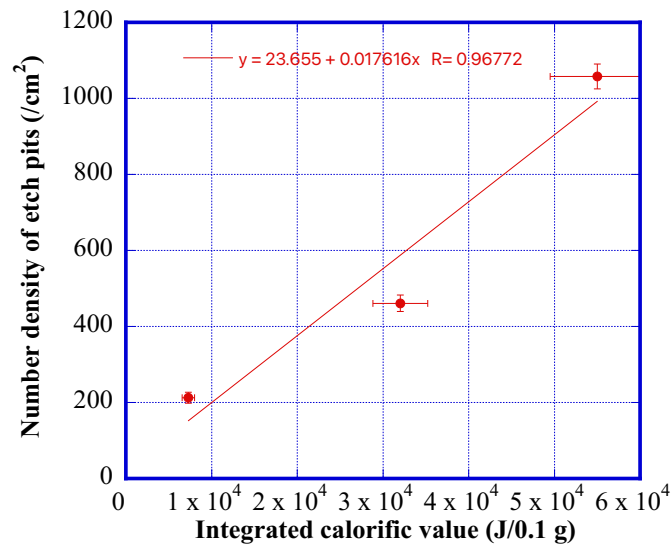


図 8 Cu-Ni/ジルコニア試料の積算発熱量と CR-39 検出器に記録されたエッチピットの個数密度との相関。

モンテカルロ計算コード PHITS を用いて、CR-39 検出器表面に到達すると予想される陽子数 (10~16 MeV) と測定された陽子エッチピット数密度の比から、試料#3 では約 5.0×10^{15} 個の He-3 が発生したと見積もられた。これによる発熱は、生成した Li*-4 の不安定核がすべて He-3 を放出する崩壊を起こすと仮定すると、 6.2×10^3 J/0.1 g と見積もられる。これは表 1 に示した積算発熱量より 1 桁低い。さらなる調査が必要であるが、2つの要因がこの不一致に影響している可能性がある。一つは、不安定な Li*-4 原子核から重水素が生成される分岐の影響であり、もう一つは、ZrO₂ 中に存在する He-3 が実験や焼成中に試料外に失われる影響であろう。He-3 の移動度は、マイクロクラックの導入やその他の欠陥によって高くなる可能性がある。もう一つの可能性は、4H/TSC 誘起核分裂による発熱が金属 (Ni, Cu, Zr) 核に寄与していることであり [4, 28]、これは TOF-SIMS や PIXE などの従来法による異物元素検出によってさらに調べることができる。この 5×10^{15} の He-3 量は、通常の質量分析計の検出限界かそれをわずかに超える程度である。

4.2.TDS 実験から得た結果

図 9 には、試料から質量数-3 の信号として検出された分子種の昇温脱離曲線が示されている。横軸は試料や試料皿の上面に接触した熱電対で測定された温度であり、縦軸の出力は He-3 と H₃⁺ の信号を合わせたものである。このシステムでは、T⁺ (トリチウムイオン) の可能性は十分な根拠に基づいて否定できる。DH⁺は、温度上昇に伴って H₂⁺イオンと同様に振る舞うはずで、その総量は He-3 と同じレベルに制限されるはずである。まず注目すべきは、900° C 以上の温度範囲での脱離である。900° C 以上で示される信号は、青でプロットされた試料皿、および赤でプロットされた水素ガス中の発熱実験前の Cu-Ni/ジルコニア

試料でも増加している。水素ガス中での発熱実験後の Cu-Ni/ジルコニア試料からの信号が、より高い値を示していることは明らかである。Cu および Ni へのイオン注入されたヘリウムの昇温脱離分析の結果は、He-3 がこの温度範囲で放出されることを示唆する[16-18]。Cu-Ni/ジルコニア試料からの水素ガス H₂の主な放出（ここには示されていない）は、ほぼ 800° C まででほぼ完全に抑えられるが、900° C を超えると再び顕著になる。水素ガス中での加熱実験後の曲線（緑でプロット）は、20° C から 100° C の間に高い放出ピークがあり、100° C から 600° C にかけていくつかの連なった放出ピークが見られる。これらは、分子水素 H₂ (m/e = 2) の信号とよく相関していることが判明した。これは、H₃⁺が主に、質量分析計のイオン源で H₂の分解により生成された H⁺との反応によって生成されていることを示しており、このことは予備的な考察で議論されました。しかし、900° C 以上の温度範囲における放出の信号は H₂との相関が低く、すべてを H₃⁺に帰することは難しい。また、この温度範囲で HD⁺が H₃⁺を上回る量に達する可能性も低い。

図 10 に示されているように、試料皿のみおよび水素ガス中での発熱実験前の試料からの 800° C 以上での質量数-3 の信号は、水の信号と良好な相関を示す（青と赤のプロット）。これに対して、水素ガス中での発熱実験後の試料#4 からの信号は、温度の上昇とともに水の信号の増加とは独立して増加し、さらに温度が 1100° C を超えると逆相関さえ示した。これは、水素に関連しない分子種の放出を示唆しており、消去法によれば He-3 の可能性だけが残る。

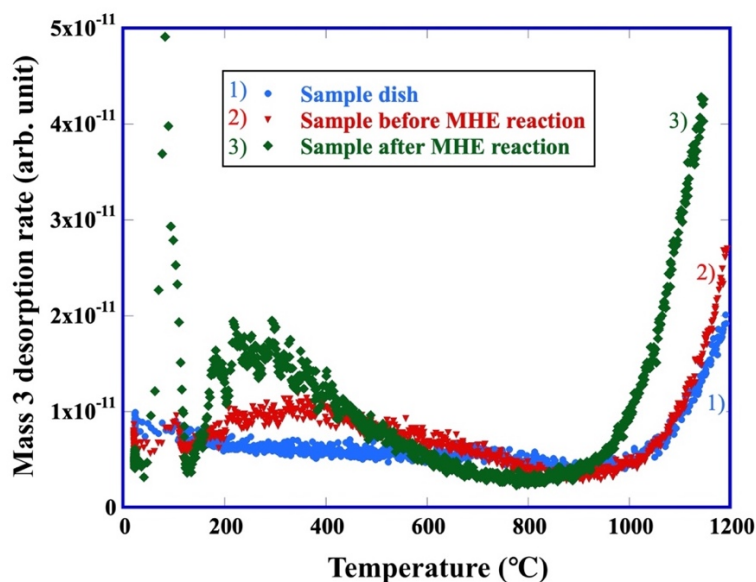


図 9 1)青は試料皿、2)赤は実験前の試料、3)緑は H₂ ガス中での実験後の試料#4 からの He-3 と H₃⁺の昇温脱離曲線。

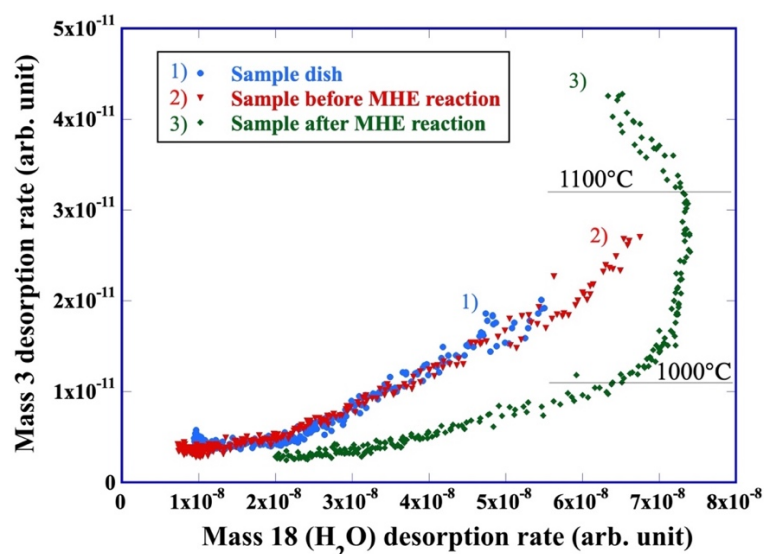


図 10 800°C以上の温度範囲における質量数 18 シグナル (H_2O) と質量数-3 シグナル (He-3 および H_3^+) の相関。

5. 結論

本研究は、水素ガス中での発熱実験後の Cu-Ni/ジルコニア試料において、核反応解析 (NRA) と昇温脱離分析 (TDS) という 2 つの異なる分析方法を使用してヘリウム-3 を検出した。ヘリウム-3 は自然環境中では極めて稀な同位体であることから、Cu-Ni/ジルコニア試料内で核反応が発生したことが強く示唆される。試料が高温で通常の水素ガスにさらされたことを考えると、He-3 の生成は水素原子の核融合に起因すると考えられる。

これらの発見は、高橋亮人大阪大学名誉教授が提唱した 4H/TSC (4 水素/四面体対称凝縮体) モデルを支持する。このモデルは He-3 を主要な反応生成物として予測している。実験的に観測された過剰な発熱と推定された He-3 生成量の間には約 1 桁の不一致が存在するが、これらの結果は、He-3 を生成しない不安定な Li^*-4 の他の崩壊過程の可能性、加熱実験中に ZrO_2 におけるヘリウム-3 保持特性の劣化、そして 4H/TSC による金属原子核の核分裂過程による核熱源の寄与を考慮すると、4H/TSC 理論と一致しているだろう。

今後の研究の方向性としては、発熱量と He-3 生成量の定量的な関係を明らかにすることに焦点が当てられる。これは、NRA を用いた分析例を増やし、特に現在の研究よりも高い発熱量を示す試料に対して、TDS の定量分析方法を確立することで達成できるだろう。

本研究は、1989 年にフライシュマンとポンズによる重要な研究から始まった常温核融合研究の重要なマイルストーンである。本論文で提示された結果は、常温核融合が理論上の作り物ではなく、観察可能な現象であることを強力に示す証拠であり、人類にとって脱炭素で脱放射能のエネルギー源となる可能性を示している。

核融合反応効率のさらなる向上は、Cu-Ni/ジルコニア材料の改良によって実現できるかも知れない。直近の研究の優先課題は、既存の方法を用いた Cu-Ni/ジルコニア試料調製の最適条件を決定すること、そして、代替の製造技術の探求である。さらに、新しい概念に基づく新規の水素融合材料の開発も研究が必要である。

本研究は、これまでの原子爆弾や水素爆弾の開発をルーツとする流れと明確に区別される、新しい原子核理工学のパラダイムへの道を示している。このような進展は、世界的なエネルギー問題に取り組む可能性を秘めており、従来の核技術による種々の社会的緊張に緩和をもたらすだろう。

謝辞

わたしたちは、実験中に温かい支援をしてくださった神戸大学海事科学研究科加速器・粒子線実験施設施設 (TAcLKU) のスタッフの皆さんに感謝します。本研究は、一般財団法人熱・電子エネルギー技術財団、神戸大学イノベーション基金プログラム、および JST START 大学エコシステム促進型 (大学促進型)、助成番号 JPMJST2051、の支援を受けて行われました。また、著者らは、科学哲学の視点を含む有意義な議論と、英語文体の改善に絶大なる支援をいただいた C. Gomez 教授に感謝の意を表します。