

平成 21 年 5 月 8 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18760643

研究課題名 (和文) 極低温環境を利用した微小崩壊熱測定システムの開発

研究課題名 (英文) Development of decay heat measurement system with cryogenic environment

研究代表者

田中 照也 (TANAKA TERUYA)

核融合科学研究所・炉工学研究センター・助教

研究者番号：30353444

研究成果の概要：ヘリウム冷凍機を用いた極低温における微小崩壊熱測定装置の試作、試料発熱に対する応答試験を行った。Bi-2223をセンサーとした試作では、冷凍機温度を106Kに設定して、10mW程度の発熱の観測が可能であった。一方、V₃GaおよびNb₃Snをセンサーとした試作では、冷凍機温度を各々11.2K、13.6Kに設定して、1mW程度の発熱の観測が可能であった。測定可能な発熱量の下限を妨げる要因は、冷凍機自体の除熱量の揺らぎ、および発熱試料からセンサーへの熱伝達の2点である。各々、長時間測定による測定値の平均化や超伝導センサー配置方法の変更等による改善が見込め、本測定手法により放射化物の10 μ Wオーダーの崩壊熱の測定が見通せると考えられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,500,000	0	1,500,000
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	150,000	3,050,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：崩壊熱、極低温、熱量測定、超伝導

1. 研究開始当初の背景

重水素-三重水素(DT)反応を利用する核融合炉開発において、炉材料中に生成された放射性核種が崩壊時に放出する「崩壊熱」の評価は、冷却材喪失事故時の安全性や作業被ばく等の安全性の観点から、非常に重要なパラメーターの一つである。現在、炉材料の崩壊熱は、ビーム駆動型DT中性子源を用いた照

射実験により評価し、核データ・計算システムの検証が進められている。しかし、その中性子強度は核融合発電炉と比較して1/1000程度であり、中性子照射時間、試料体積ともに非常に限られたものとなるため、微小崩壊熱測定を行う必要がある。

崩壊熱に伴う温度変化の直接測定は、過去に μ W/ccオーダーで実施されており、また、

より高精度の測定に関しては、放射線検出器を用いる手法が開発されているが、試料形状、厚みが著しく制限されている。

2. 研究の目的

試料形状を制限せずに、高精度で微小崩壊熱を測定するため、測定試料を物質の比熱が室温の $\sim 1/500$ になる液体ヘリウム温度近傍の極低温に冷却し、特に超伝導物質の転移温度付近における急激な電気抵抗変化を高感度温度センサーとして利用する微小崩壊熱測定システムの開発研究を行う。

3. 研究の方法

低温環境については当初ヘリウム冷却デューワーの使用を提案していたが、取扱いの簡便性や放射線管理区域における使用を想定して、ヘリウム冷凍機を使用した。到達温度、約6Kのクールドヘッド(直径:5.5cm)の表面に、図1に示すように、試料ステージを設置し、クールドヘッドとの中間部に超伝導センサーを配置した。大きな発熱量をもつ放射化物測定のためには、Bi-2223高温超伝導材($2 \times 4 \times 10 \text{mm}^3$)を図1(a)のステンレス製シャフト部に設置し、応答取得実験を行った。より微小な発熱量を測定するための応答取得実験では、 V_3Ga および Nb_3Sn 超伝導線材($0.7 \text{mm} \phi \times 10\text{-}12 \text{mm}$)を図1(b)に示すように冷凍機のクールドヘッドに直接接触させ、その上に試料ステージを設けた。 Bi-2223 センサーには1-5mA、 V_3Ga および Nb_3Sn センサーには100mAを I_1 - I_2 間に通電し、 V_1 - V_2 間の電圧差を応答として測定した(4端子抵抗測定と同様)。試料発熱に対するセンサーの応答は、試料ステージ上の抵抗素子に通電することで取得した。

4. 研究成果

図2(a)にヘリウム冷凍機クールドヘッド温度と5mA通電したBi-2223センサー電圧の関係を示す。クールドヘッド設定温度が105-110Kと広い温度幅で超伝導から常伝導への転移が起こっている。これはBi-2223センサーの体積が大きく、内部の温度が一様にならなかったためと考えられる。

転位によるBi-2223センサー電圧変化の傾きが最も大きくなる106K付近にクールドヘッド温度を設定し、試料ステージ上の抵抗素子を発熱させた際の応答例を図2(b)に示す。100mWの発熱に対して、1mAを通電したセンサー電圧の変化は $2 \mu\text{V}$ 程度であった。測定電圧の揺らぎが最大 $1 \mu\text{V}$ となっており、測定器の平均化機能、もしくは測定データの移動平均処理により数分の1に低減することが期待できるものの、本報告の試作ホルダーでは10mWオーダーの測定が限界であると考えられる。

図3(a)にヘリウム冷凍機クールドヘッド温度と100mAを通電した V_3Ga センサー電圧の関係を示す。クールドヘッド設定温度が10.6-11.4Kと、金属超伝導線材としてはかなり広い温度幅で超伝導から常伝導への転移が起こっており、また転移領域での傾きが一定ではない。これは、センサーとクールドヘッドや試料ステージとの接触状況、また、センサー中心付近に抵抗素子を配置しているために、抵抗素子から除熱されてくる熱もセンサーに流入し、線材内部の温度が一様にならなかったと考えられる。

クールドヘッド温度を転移領域の中間となる11.2Kに設定して取得した、抵抗素子の発熱に対する V_3Ga センサーの応答を図3(b)に示す。抵抗素子の発熱4mWに対して、100mAを通電した V_3Ga センサーの電圧値には $3 \mu\text{V}$ の変化が現れた。一方、電圧値測定における揺らぎは $1 \mu\text{V}$ 程度であり、今回試作した V_3Ga センサーで可能な発熱量は数mWオーダーとなった。

同様の配置で行った Nb_3Sn センサーの応答についても、冷凍機クールドヘッドの温度が13.3-13.8Kの範囲で超伝導から常伝導への転移が見られた。また、温度設定を13.6Kとした際に、100mA通電したセンサー電圧には、9mWの発熱に対して、 $0.55 \mu\text{V}$ の変化が見られた。電圧値測定の揺らぎは $0.08 \mu\text{V}$ であったことから、 Nb_3Sn についても、測定可能な発熱量は数mWオーダーとなる。

今回の試作において、さらに微小の発熱を測定する際に問題となっている課題は(1)センサー電圧測定に現れる測定値の揺らぎ、(2)抵抗素子からセンサーへの熱伝達、の2点があげられる。

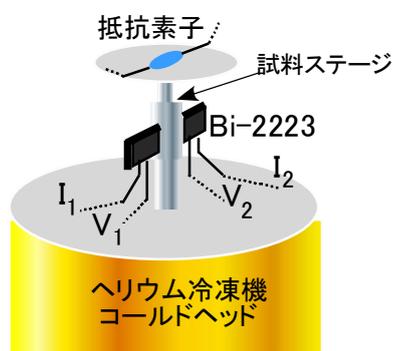
センサー電圧測定における揺らぎは、非常に遅い周期でランダムに変化しており、冷凍機クールドヘッド部分の微小な温度変動によると考えられる。クールドヘッドの温度は、温度調節計によりヘッド内部のヒーター発熱量をPID制御することで調整されるが、PID制御を停止してヒーター発熱量を一定に保持した際にも、センサー電圧値に同様の揺らぎが観測される。そのため、原因として冷凍機そのものの除熱量が微小に変動しており、それに追従してクールドヘッドおよび超伝導センサーの温度も微小に変動していると考えられる。電圧測定における揺らぎの大きさ、超伝導から常伝導に転移する際の電圧差、転移が生じる温度幅から、センサー自体の温度に関しては、約0.05K程度の変動が生じていると計算される。この温度変動の影響については、長時間の電圧測定を行い、測定データの平均化を行うことで1桁程度の改善は見込めると考えている。また、試料の発熱を測定する超伝導センサーとは別に、クールドヘッドの温度を測定する超伝導センサ

一を設置し、揺らぎ成分を差し引くことで、測定精度を上げることが考えられる。

抵抗素子からセンサーへの熱伝達の改善については、今回試作した試料ステージでは、抵抗素子の発熱量のかなりの部分がセンサーに到達せずに、コールドヘッド部分に流入していると考えられる。図4に示すように、金属超電導線材を複数配列し、試料発熱の大部分がセンサー部分を通り、かつ試料の冷却が可能な試料ステージの改良を継続している。

試作試料ステージを用いた応答測定結果と上記の2点の改良により、試料形状や厚みの制限を緩和して、数十 μ Wオーダーの発熱測定を見通せると考えられる。

(a)



(b)

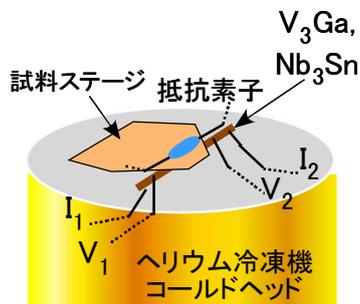
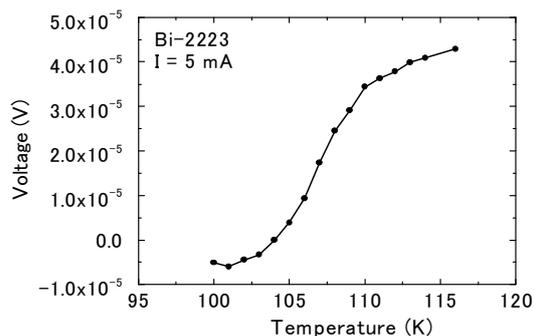


図1. 超伝導材料を用いて試作した崩壊熱測定システムの概略図

(a) Bi-2223 センサー

(b) V_3Ga もしくは Nb_3Sn センサー

(a)



(b)

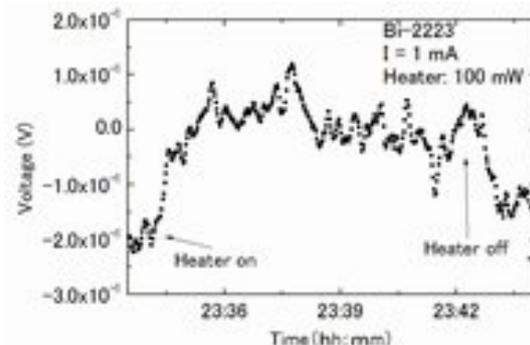
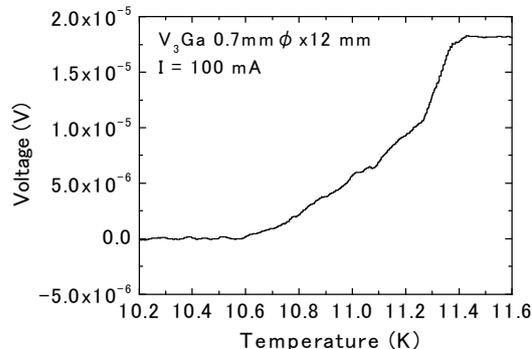


図2. Bi-2223 センサーの(a)冷凍機設定温度と電圧測定値の関係、および(b)試料部発熱に対するセンサー電圧の応答

(a)



(b)

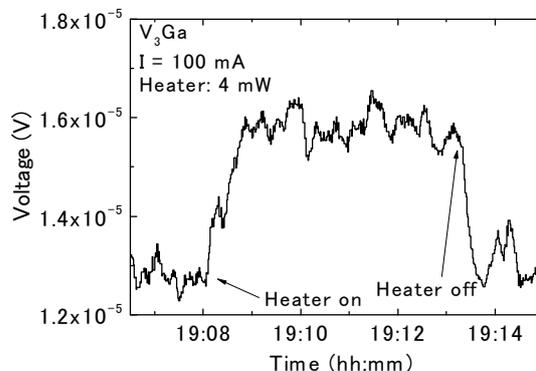


図3. V_3Ga センサーの(a)冷凍機設定温度と電圧測定値の関係、および(b)試料部発熱に対するセンサー電圧の応答

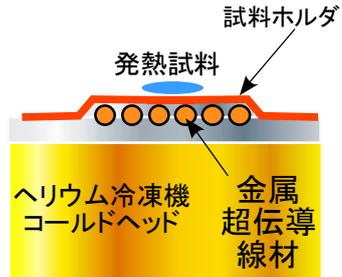


図4. 超伝導センサーへの熱伝達を改善するための配置改良案

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

- ① 田中照也、佐藤聡 他、Li/V合金模擬体系内の反応率およびトリチウム生成率測定、第7回核融合エネルギー連合講演会、2008年6月19日、青森

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中照也 (TANAKA TERUYA)

核融合科学研究所・炉工学研究センター・
助教

研究者番号：30353444