

## 低温動作ヒートパイプの開発

三戸利行・夏目恭平

経済的な核融合炉の実現には、高温度のプラズマを安定に閉じ込める高性能かつ高効率な超伝導マグネットの開発研究が必要不可欠とされています。1911年に水銀の超伝導現象が発見されてから既に100年を経過し、医療用のMRI装置やリニアモーターカー等、超伝導機器は実用化の段階に入っています。更に1986年には、それまでの金属系の低温超伝導体に加え、陶磁器に似たセラミックス系の高温超伝導体が発見され、液体窒素温度(-196℃)でも使用可能なテープ形状の線材が開発されるなど、幅広い分野への応用を目指した精力的な研究が世界各国で進められています<sup>1)</sup>。核融合炉用の超伝導マグネットに高温超伝導体を用いることができれば、低温超伝導体を用いた場合に比べて、より高い安定性と経済性が期待できます。しかし、技術的に熟成されつつある低温超伝導に比べ、高温超伝導の応用には開発すべき様々な技術課題が残されています。その一つが高温超伝導マグネットに適した冷却方式の開発です。高温超伝導マグネットは低温超伝導マグネットに比べて運転する温度が高いことから、冷却し易い印象を受けます。しかしながら、実際には高温超伝導マグネットの方が、マグネットの巻線内部で発生した熱を外に取り出すことが難しく、局所的な温度上昇による熱歪みの発生や、それによる超伝導特性の劣化や機械的な損傷が起きる可能性が高いことが明らかになっています。このことは、運転温度の上昇

に伴ってマグネット構成材料の熱拡散率<sup>2)</sup>が低下してしまうことが原因と考えられています。

核融合炉に必要な大型の高温超伝導マグネットを実現するためには、マグネットの巻線内部で発生した熱をいかに効率よく短時間で外部へ取り出せるかが重要となります。一般に熱を伝える能力が高い(熱伝導率が高い)と考えられる金属板等を巻線内に挟み込む方法では、熱拡散率を同時に大きくすることができず、一定時間内に外部に取り出せる熱量には限界があります。そこで、高熱伝導率と高熱拡散率を同時に達成できる熱輸送素子としてヒートパイプ<sup>3)</sup>に着目し、ヒートパイプをマグネット巻線内部に組み込んだ新しい冷却構造の開発研究に取り組んでいます。

金属等の固体による伝導冷却とヒートパイプによる冷却の相違を図1に示します。どちらも加熱端での入熱を冷却端で取り去る場合の冷却の様子を示しています。銅棒などの金属による熱伝導では、加熱端から低温端までの距離に比例して銅棒の長手方向に温度差が生じます。また、熱は加熱端から冷却端へと固体内を順番に伝わって行くため、加熱端から冷却端に熱が伝わるには時間がかかります。一方ヒートパイプ冷却では、作動流体が加熱端から冷却端に瞬時に移動し、加熱端で液体から気体へ、冷却端では気体から液体へ相変化することで熱が輸送されるため、短時間に多くの熱を運べると共に、ヒートパイプ内部ではその距離に依存せず温度差がほとんどつきません。このことからヒートパイプを用いることにより、温度差や時間遅れがなく、熱を輸送することが可能になります。ヒートパイプには作動流体の移送方法によって、重力を利用したサーモサイフォンや、毛細管現象を利用したウィッグ方式等がありますが、ここでは、超伝導マグネットへの組み込みに適した薄いシー

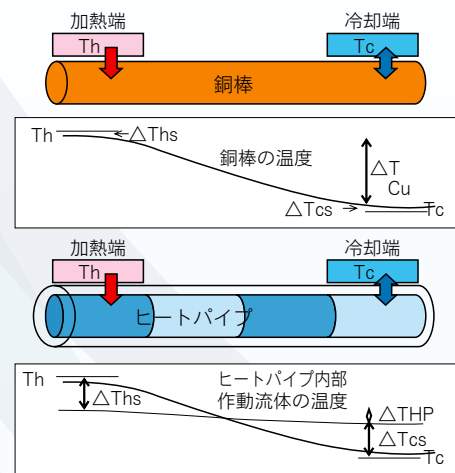
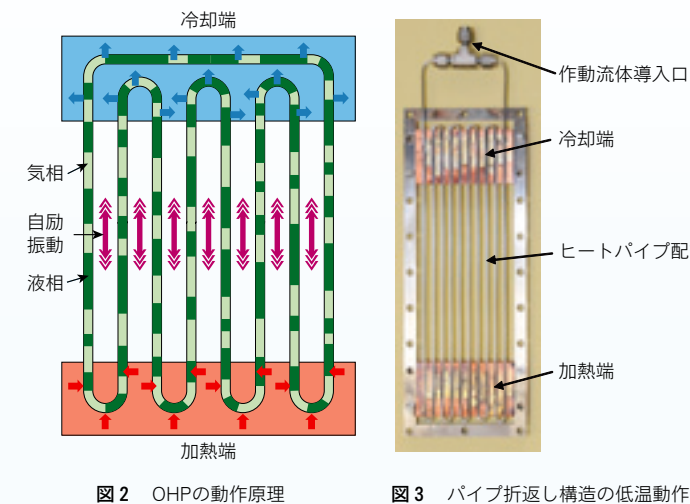


図1 固体伝導冷却(上図)とヒートパイプ冷却(下図)の相違  
銅棒では、加熱端と銅棒との温度差 $\Delta T_{Th}$ 、冷却端と銅棒の温度差 $\Delta T_{Tc}$ に比べて、銅棒の長手方向の温度勾配 $\Delta T_{Cu}$ が最も大きく、銅棒の長さが長くなるとそれに比例してこの温度勾配も大きくなります。一方、ヒートパイプでは、加熱端、冷却端でのヒートパイプとの温度差 $\Delta T_{Th}$ 、 $\Delta T_{Tc}$ に比べ、ヒートパイプの長手方向には温度差 $\Delta T_{HP}$ が殆どつかず、ヒートパイプの長さにも依存しません。

ト形状に加工でき、設置方向の依存性も少ない自励振動式のヒートパイプを採用することにしました。自励振動式ヒートパイプ(以後は英語の頭文字をとってOHP(Oscillating Heat Pipe)と略します)は、加熱端と冷却端の温度差によってヒートパイプ内に自発的に発生する自励振動を利用して気液混合の作動流体を移動する形式のヒートパイプです。図2に流路を折り返した構造のOHPの動作原理を示します。

室温で動作するOHPは市販されていますが、超伝導マグネットが運転される低温で動作するOHPは未開発のため、その開発研究から開始しました。低温と室温では作動流体の密度などの物性値が大きく異なるため、独自の工夫を施すことにより、OHPの低温域での動作を世界で初めて系統的に実証することに成功しました。図3にステンレスのパイプを繰り返し折り返した構造の低温動作OHPの実例を示します。作動流体に水素、ネオン、窒素を用いた場合の動作温度範囲はそれぞれ-256から-243℃、-246から-234℃、-206から-182℃と幅広いこと、および、実効的な熱伝導率が低温での純金属の値を凌駕する非常に高い値であることを明らかにしました。

実際の超伝導マグネットの巻線中に組み込むためには、薄い板状のOHPが必要となります。例として円形の高温超伝導ソレノイドコイルの巻線内にOHPを組み込んだ構成例を図4に示します。超伝導マグネットへの組み込みに対応するため、パイプの折り返し構造から金属板にヒートパイプの溝を加工した板状のOHPへの展開を図りました。その製作例を図5に示します。図5のOHPは自励振動によるヒートパイプ熱輸送特性の動作確認のため、透明なパネルで覆われており、作業流体としてエタノールを用い、室温での動作試験を行った様子を示しています。流路内に気体部と液体部が交互に現れる縞模様状の状態となり、



更に加熱部と冷却部の温度差によって自励振動が発生して加熱部から冷却部へ作業流体が移動すると共に熱が輸送される様子が観測されました。

([http://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/pdf/206\\_move.html](http://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/pdf/206_move.html))  
高温超伝導マグネットの冷却構造を最適化できる低温動作のOHPの開発に成功したことは、高温超伝導の核融合装置への適用に道を開く重要な研究成果と言えます。今後は、OHPを組み込んだ高温超伝導モデルマグネットによる実証へ向けた研究への展開を計画しています。

(連携研究統括主幹/装置工学・応用物理研究系 教授)  
(装置工学・応用物理研究系 COE研究員)

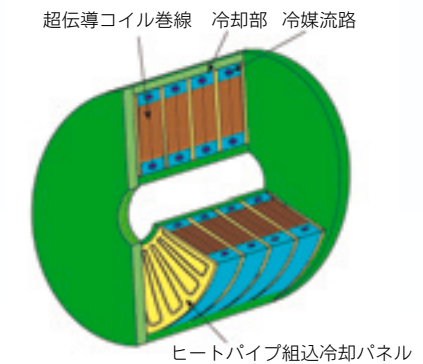


図4 OHP組み込み高温超伝導ソレノイドマグネットの構成例



図5 シート状OHPの室温動作実験

以下のURLよりシート状OHPの室温動作実験の動画をご覧ください。  
[http://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/pdf/206\\_move.html](http://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/pdf/206_move.html)

注1) 従来の金属系の低温超伝導体では液体ヘリウム温度(-269℃)での使用が必要だったため、液体窒素温度(-196℃)など、それに比べて高い温度でも超伝導状態になる材料を高温超伝導体と呼んでいます。

注2) 熱拡散率(熱伝導率を比熱と密度で割った値)は、熱伝導率が一定の温度勾配での熱エネルギーが伝わる量を示すのに対し、その温度勾配になるまでの速さを示します。

注3) ヒートパイプは、パイプ内に封入した作動流体の気体と液体との相変化を利用した熱輸送素子で、小さな温度差で多量の熱を輸送することができます。