

用語解説(50)

『超 電 導 応 用』

松 下 照 男

九州工業大学情報工学科
〒820 飯塚市川津 680-4

井・口 家 成

筑波大学物質工学系
〒305 つくば市天王台 1-1-1

超電導線材 (Superconducting Wire)

電流を流す目的で超電導材料で作った線。一般的には電流容量の小さいものをいい、大電流容量を得るために超電導線材を束ねたものを超電導導体または超電導ケーブルという。実用的な超電導線材に用いられている超電導材料には Nb-Ti, Nb₃Sn, V₃Ga がある。

超電導線材に電気抵抗なしに電流を流すことができるのは、量子化磁束がローレンツ力により動かされるのをピンングで妨げているためである。しかし、何らかの原因により超電導材料内の一部分の温度が上昇したとすると、その部分のピンングの強さが減少し、量子化磁束の一部が動いてしまう。このために損失が生じ、新たな温度上昇がもたらされることになる。こうした正帰還による不安定性のため、超電導線材材料内に磁束が一気に侵入し、超電導状態が破壊されることがあり、これを磁束跳躍 (flux jump) という。こうした不安定性をなくするには超電導線材の直径を小さくする必要があり、実用超電導線材では超電導部分を 10 μm 程度の細いフィラメントとし、これを数多く銅母材の中に埋め込んだ複合構造が用いられている。超電導部分で発熱し、超電導性が失われたときでも、銅母材は発生熱の速やかな除去と超電導性の回復を待つ間の電流のバイパスの役を果たし、安定化に寄与している。また、外部磁場の変化に対する時定数を小さくし、損失を小さくするために、超電導線材を振ることが一般的に行われている¹⁾。(松下)

文 献

- 1) 電気学会大学講座“超電導工学”(オーム社 1988) p. 67.

超電導マグネット (Superconducting Magnet)

超電導線材を用いたマグネット。電気抵抗がなく、永久電流が流せる点を利用したもので、消費電力がきわめて小さく、大きな磁界が発生できるという特長がある。現在までに応用されているものには、研究用高磁界マグネット以外に加速器、磁気浮上列車、MRI (磁気共鳴イメージング) 装置のマグネットなどがあり、このほかにもエネルギー貯蔵装置、発電機、核融合炉への応用も期待されている。

マグネットに用いる超電導材料には、上部臨界磁界と臨界電流密度ができるだけ大きいものが望ましいが、このほかにも線材を巻くときの歪みに対する耐歪み特性も重要な要素となる。上部臨界磁界と臨界電流密度はやや劣るものの、耐歪み特性が優れた Nb-Ti が現在最も多く用いられている。研究用の高磁界マグネットには、その中心の最も磁界が高い部分に、高磁界での臨界電流密度が大きな V₃Ga や Ti 添加により上部臨界磁界を高めた Nb₃Sn が用いられている。超電導線材には磁束跳躍などの不安定性を抑えるための安定化金属や、強大なローレンツ力から保護するための補強材が組み込まれており、また大型のマグネットでは冷媒である液体ヘリウムの通路が確保されている¹⁾。(松下)

文 献

- 1) 電気学会大学講座“超電導工学”(オーム社 1988) p. 143.

ピンング (Flux Pinning)

超電導体に電流を流したときに内部の量子化した磁束にローレンツ力が作用するが、この力による磁束の動きを止めて誘導電界の発生を妨げる機構。混合状態にある第二種超電導体において、電気抵抗なしに電流を流すことができるのはこの機構によっている。

ピンングに寄与するのは超電導体に含まれる各種の欠陥であるが、主なものとしては Nb-Ti などにおける転位や常電導析出物、Nb₃Sn における結晶粒界面などがある。こうした作用が生じるのは、量子化磁束の中心部の超電導状態の空間変化と欠陥部分の物質定数の空間変化との干渉によって、磁束が動くとエネルギーが変化するためである¹⁾。ピンングの作用をする欠陥をピンング・センターという。単位体積当たりのピンング・センターにより量子化磁束に働く力をピン力密度といい、臨界電流密度はピン力密度を磁束密度で割った値に等しい。したがって、臨界電流密度を大きくするためには、強いピ

TECHNICAL TERMS (50)

ニング・センターを高い濃度で超電導体に導入する必要がある。

薄膜では一般にバルク材料よりも臨界電流密度が高いが、これは表面の存在そのものがピニングに作用したり、表面付近に含まれる高濃度のピニング・センターが作用するためであると考えられている。こうした作用を表面ピニングという。(松下)

文 献

- 1) 松下照男: 低温工学 24, 143 (1989).

ジョセフソン素子 (Josephson Junction)

二つの超電導体を薄い絶縁バリアを介して結びつけ接合を形成したとき、二つの超電導体の間に電子対のトンネリングが起こり、その位相差に基づく超電導電流が流れる。この電流は接合の位相差を ϕ として $I = I_c \sin \phi$ と表わされる。これをジョセフソン効果と呼び、流れる超電導電流をジョセフソン電流という。 I_c はその最大電流であり、超電導体のエネルギーギャップ、接合のトンネル常抵抗により決まる。ジョセフソン効果を利用する素子をジョセフソン素子という。ジョセフソン素子の特性は位相差を磁場あるいは電圧を印加することで変えられるので、制御できる。たとえば磁場を印加すると位相差に空間的な勾配が生じ、ジョセフソン最大電流が印加磁束に対して周期 Φ_0 のフラウンホーファー回折パターンの変化をする。 $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2$ は磁束量子である。また接合部に有限電圧 V を印加すると周波数 $f = 2eV/h$ の交流電流が流れる。この周波数は 1 mV の電圧に対して約 483 GHz である。マイクロ波を接合に照射すると、マイクロ波とこの交流電流のビートによって接合の電流-電圧特性上にいわゆるシャピロステップを生じる。ジョセフソン素子は二つの超電導体の間に弱結合部ができればよいので、トンネル接合形だけでなくマイクロブリッジ形、ポイントコンタクト形、近接効果接合形などの素子でも実現できる。(井口)

SQUID

超電導量子干渉計 (Superconducting QUantum Interference Device) の英文縮約名である。動作方式の違いにより dc SQUID および rf SQUID がある。dc SQUID は二つのジョセフソン素子を並列につないだ超電導ループに直流電流を流して動作させる微小磁束計である。この超電導ループに外部磁束の出入りがある場合、二つの素子を流れるジョセフソン電流の干渉効果が

生じ、全ジョセフソン最大電流がループ内の磁束を Φ として $|\cos(\pi\Phi/\Phi_0)|$ の周期的な変化をする。 $\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2$ は磁束量子である。超電導ループの面積をある程度大きくとると、きわめて小さな磁場でも検出可能となる。たとえば 1 mm^2 のループ面積に対して Φ_0 の周期は外部磁場約 $2 \times 10^{-9} \text{ T}$ の変動に相当する。rf SQUID はジョセフソン素子を一つ含む閉ループを LCR 共振回路と結合させて、一つのジョセフソン素子でも dc SQUID と同様な動作が可能になるようにしたものである。いずれのタイプの SQUID も測定感度を上げるために入力信号の上に微小交流信号を重ねてロックイン検波する方式が一般的に行われている。

SQUID の分解能は現在 $10^{-6} \Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度のものが容易に得られる。この高感度な磁気センサーは生体磁気、岩石磁気、物性の精密計測、高層大気学などの研究に応用できる。(井口)

近接効果 (Proximity Effect)

超電導体 (S) が常電導体 (N) と接触しているとき、超電導体の凝縮波動関数が境界面を越えて常電導体側にしみでて常電導体中に超電導を誘起させる現象である。これは S 相と N 相が互いに干渉し、境界近くの電子対の密度を減少させることで超電導性を弱め、その分境界を越えて常電導体側に超電導性を上げたということで解釈される。近接効果は一般に境界面の状況、常電導体物質の特性によってその様子が異なってくる。常電導体に誘起される凝縮波動関数は、電子の平均自由行程がコヒーレンス長より短い汚れた極限、あるいは温度が高い場合のきれいな極限では指数関数的である。その空間的広がりの程度は電子対の常電導体中への侵入長で与えられ、汚れた極限では境界の構造の詳細にあまりよらずに常電導相の拡散過程によってきまる。実際に近接効果が起こることは、S/N/S 構造でジョセフソン電流が流れること、S/N 構造に対する超音波吸収実験で誘起された超電導により急峻な変化が現れること、S/I/N/S 形トンネル接合でフォノン特性に変化が現れることなどによって確かめられている。(井口)

文 献

- たとえば, "Superconductivity Vol. 2" Edited by R.D. Parks (Marcel Dekker Inc., New York, 1969) pp. 1005-1034.