

超電導の交流応用

解説

塚本修巳*

AC Applications of Superconductor

Osami TSUKAMOTO

1. 序

1986年にベトノルツ、ミュラーによつて高い臨界温度を持つ超電導体が発見され昨今の超電導ブームが起きた。しかし、それより3年前に、一般にはあまり知られていないが、超電導の応用に大きなインパクトを与えると考えられる重要な技術開発がフランスで行われた。従来より用いられていた超電導線は直流的には抵抗は零で電流を流しても損失を生じないが、交流を流すと等価的な抵抗が生じ、かなりの損失を発生する。そのため、冷却をよほど良くしなければ超電導線の温度が上昇し安定に交流が流せない。また、仮に安定に交流電流が流せたとしても、極低温領域での冷却効率は非常に悪く、一般に4.2Kにおける1Wの発熱を冷却するため500~1kWの電力を必要とするため、室温で銅線を使う方が損失が少ないことになり交流超電導応用は実用上のメリットがなかつた。これに対し、50/60Hz交流でも安定に電流が流せ、損失も冷却効率の悪さを考慮しても十分に損失の少ない低損失交流超電導線がフランスで開発された¹⁾²⁾。これにより、交流電気機器の超電導化の可能性が出てきたため、従来直流もしくは準直流に限られていた超電導の応用分野が大きく広がった。交流超電導線の特徴は低損失、高電流密度であり、交流電力機器の効率向上、大幅なコンパクト化は無論のこと従来の機器では実現できないような高性能化が可能になるほど大きなメリットが期待されている。交流超電導線に使われている超電導材料は従来より広く使われているNbTiであり、従つて液体ヘリウムで冷却せねばならないが、そのメリットはこのような不利な点を十分補うものであると考えられる。

本稿では、低損失交流超電導線の原理と構造、応用分野、応用技術上の問題点について解説する。

2. 第2種超電導体と交流損失

2.1 第2種の超電導体と臨界電流密度

超電導体には臨界磁界の比較的小さい第1種の超電導体と大きい第2種の超電導体とがあり、両者の超電導的性質は大きく異なる。

第1種の超電導体に外部磁界を印加した場合、過去のヒステリシスにかかわらずそれが超電導状態にある限り超電導体内部の磁界は零である。このような完全反磁性は完全導電性からは説明できず超電導固有の性質で、発見者の名を取つてMeissner効果と呼ばれる。 H_c 以上に印加磁界を増すと、導体は常電導状態になりマイスナ効果は破れ磁界は導体内部に侵入し、磁化曲線は図1に示したようになる。第2種の超電導体でも、印加磁界がある値 H_{c1} (一般には H_c より小さい)以下ではマイスナ効果を示すが、それ以上になると磁界は少しずつ導体内部に侵入していく。この状態では、常電導-超電導の境界ができる超電導体のエネルギー状態が下がるので、より安定な状態として超電導相と常電導相とが混在している。この状態を、混合状態と呼んでいる。印加磁界を増し続けると導体内部にさらに磁束が侵入し、 H_{c2} 以上に

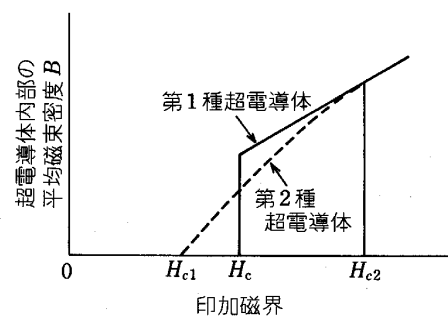


図1 第1種および第2種超電導体の磁化曲線

昭和63年6月4日受付 (Received June 4, 1988) (依頼解説)

* 横浜国立大学工学部教授 工博 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

Key words : AC loss of super conductor ; hysteresis loss ; coupling loss ; fine multi-filament wire ; super conducting linear motor ; AC application of superconductor ; winding technique ; stability.

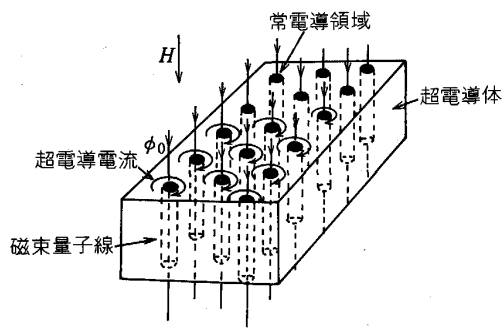


図 2 混合状態にある第 2 種の超電導体

なると、印界磁界と導体内部の磁界は等しくなり、導体全体が常電導になる。第 2 種の超電導体の $B-H$ 曲線は図 1 に示したようになる。 H_{c1} を下部臨界磁界といい、 H_{c2} を上部臨界磁界という。

第 2 種超電導体の平板に、面に垂直な H_{c1} 以上の磁界を印加すると、超電導平板は混合状態になって、図 2 のように印加磁界に平衡な非常に細い線状の常電導部が生ずる。この線状常電導部を心としてそのまわりにうず状の超電導電流が流れており、心の部分にはちょうど 1 磁束量子化単位 ϕ_0 ($h/2e = 2 \times 10^{-15} \text{Wb}$) の磁束が入っている。これを磁束量子線と呼んでいる。心の部分の半径は $50 \sim 100 \text{ \AA}$ 程度である。十分焼なましされた均質な理想的第 2 種超電導体では、この磁束量子線は自由に動け、一定磁界中では磁束線同士の反発のため三角格子状に規則正しく配列される。混合状態にある平板に電流を流すと、磁束線にローレンツ力が働き電流と直角の方向に動き出し、その心の部分にうず電流損が生ずる。このような理想的第 2 種超電導体では H_{c1} 以上の磁束がかかっている場合には電流を流すと損失を生ずる。しかし、超電導中に格子欠陥・結晶粒界・転位析出物などの不均質点があると、磁束線はその不均質点にピン止めされ運動がさまたげられる。従つて、電流を流しても磁束線は動けず損失は生じない。そのため実用超電導線では機械加工や熱処理を行いわざわざ不均質点を多くしている。

2.2 交流損失

交流用超電導線も含め現在実用化されている超電導線には不均質な第 2 種超電導体がいわれている。不均質超電導体に電流を流したり磁界をかけたりすると磁束は磁束線となつて導体表面から侵入していく。しかし、ピン止め効果のため磁束の侵入は導体表面から一定の深さまでとどまる。例えば厚さ $2d$ の超電導平板に平行な磁界を印加したときの平板の内部の磁束分布は図 3 のようになる。磁束分布には傾きがあり、その傾きに比例した電流が平板内に流れる。この電流密度を J_c とし、平板中の磁束密度を B とすれば、磁束線には $B \cdot J_c$ のローレンツ力が働いている。平衡状態ではこのローレンツ力と

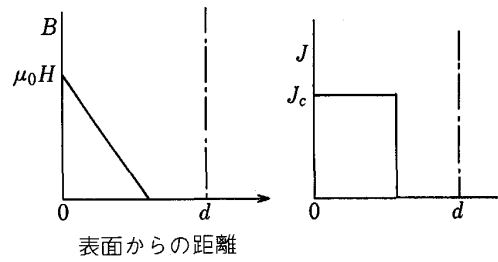
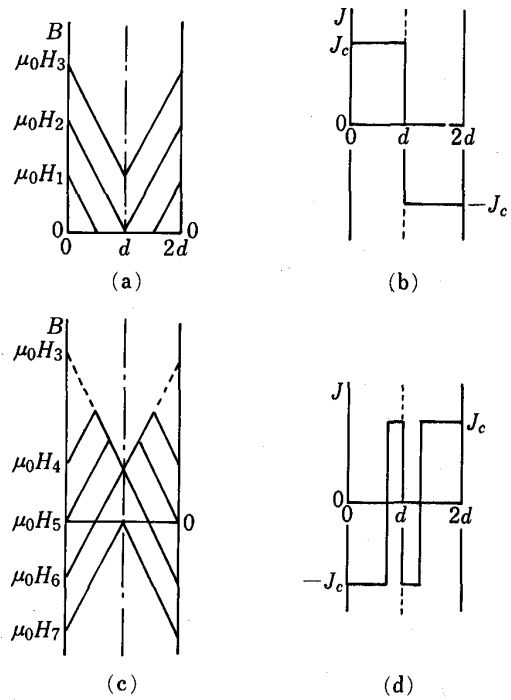


図 3 超電導体内部の磁束分布および電流分布

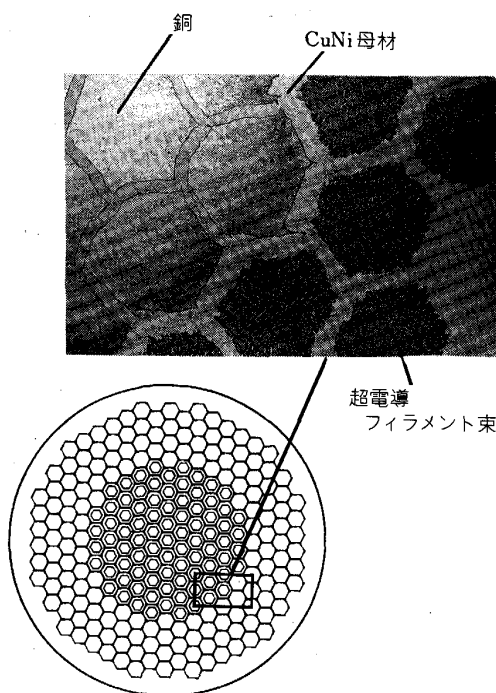


(a) 印加磁界が上昇する場合 (b) $B = \mu_0 H_2$ または $\mu_0 H_3$ の場合
(c) 印加磁界が下降する場合 (d) $B = \mu_0 H_5$ のときの電流分布
図 4 超電導平板中の磁束および電流の分布

ピン止め力とがつり合うように超電導体中の磁束分布が決まる。ピン止め力が B に比例すると仮定すると J_c は一定 (Bean モデルという) となる。図 4 に印加磁界を増減させたときの磁束分布と電流分布の変化が示してある。この図からわかるように、ヒステリシス現象が生ずる。このような磁界分布にヒステリシスがあれば、超電導体に交流磁界が印加されると周波数に比例したヒステリシス損失が生ずる。ヒステリシス損失の大きさは外部磁界のピーク値に比例し、また超電導体の厚さ、または超電導体が線状の場合にはその径に反比例する。

周波数 f 、ピーク磁束密度 B_m の交流磁界にさらされる直径 d_f の超電導体に生じるヒステリシス損失 P_h は、単位体積あたり、

$$P_h = \frac{8}{3\pi} f d_f J_c B_m \dots\dots\dots (1)$$



線径: 0.14 mm NbTi フィラメント: 0.5 μm φ × 14 280

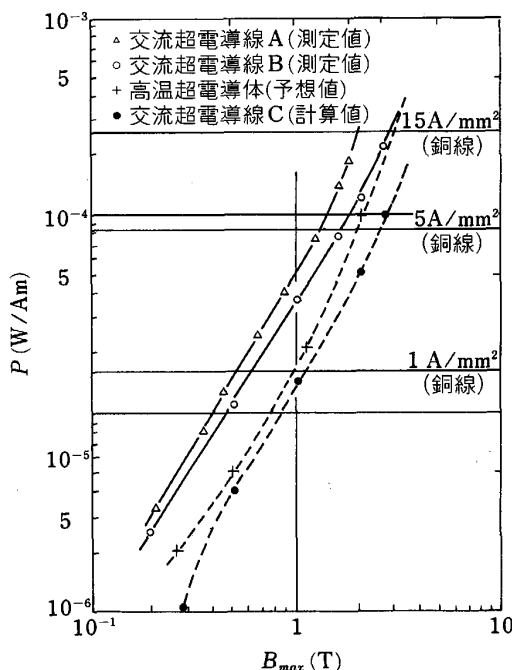
図 5 50/60 Hz 用超電導線断面図

で与えられる³⁾。ただし J_c は超電導体の電流密度である。この式から明らかに d_f が小さければそれに比例して P_h は減少する。典型的な 50/60 Hz 交流超電導体では $d_f = 0.5 \mu\text{m}$ 程度の非常に細いフィラメントになっている。フィラメント一本の電流容量はわずかであるので、図 5 に示すようなこれらのフィラメントを 1 万本~20 万本束ねて常電導金属中に埋め込んだ極細多心構造の複合導線にして用いる。常電導金属母材中の超電導フィラメントは低抵抗で短絡されているので、そのままでは磁束が複合導線内部に侵入する時定数は非常に長くなる(例えば線長が 10 km であると時定数は 1 年程度になる)。従つて、早く変化する交流磁界に対しては多数のフィラメント全体が一本の超電導体としてふるまい、フィラメント化の効果はなくなり大きな損失を生ずる。これを防ぐために、超電導フィラメントと常電導金属母材が作る電流ループに鎖交する磁束が打ち消されるように導線によりがほどこされている。フィラメント間の結合時定数 τ はねじりのピッチ l_p が短いほど、フィラメント間横断抵抗率 ρ_1 が大きいほど小さい。 τ は次式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_0}{\rho_1} \left(\frac{l_p}{2\pi} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

ρ_1 は母材の抵抗率を ρ_n とし、複合導体中の超電導体の体積率を λ とすれば次のような範囲になる。

$$\rho_n \frac{1-\lambda}{1+\lambda} < \rho_1 < \rho_n \frac{1+\lambda}{1-\lambda} \dots\dots\dots (3)$$



P: 導体 1m あたり通電電流 1A についての損失
B_{max}: コイルにした時のコイル最大磁界

図 6 交流超電導線の 50 Hz における損失 (図には比較のため室温における銅線の損失を、4.2 K における損失に換算して示してある)

よりをほどこしても外部磁界が変動し導線に磁束が入り出す過程で、フィラメント間に常電導金属母材を介し結合電流が流れるため損失が生ずる。これを結合損失と呼んでいる。結合損失 P_c は (4) 式で与えられ、全交流損失 P は (5) 式で与えられる³⁾。

$$P_c = B_m^2 (2\pi f)^2 \frac{\tau}{\mu_0} \dots\dots\dots (4)$$

$$P = \lambda \cdot P_h + P_c \dots\dots\dots (5)$$

常電導金属母材として銅は ρ_n が小さすぎて使えず、比抵抗が銅の数百倍あり、NbTi 超電導フィラメントとの機械的ななじみのよい CuNi (キュプロニッケル、 $\rho_n = 1.3 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$) が通常用いられる。CuNi を用いても 50/60 Hz の交流磁界に対し、 P_c を P_h より小さくするためには l_p を 1 mm 以下にする必要がある。線に機械的な損傷を与えないようにするためには、実用的には l_p は線径の十倍程度が限度であるので導線の径は 0.1 mm 程度となる。図 6 には現在開発されている交流超電導線の 50 Hz における損失特性が示してある。縦軸には線 1 m あたりの損失をその線の臨界電流で割った値で示してある⁴⁾。また、同図には液体ヘリウム液化機の効率を 500 として、銅線を常温で使用した場合の損失を 4.2 K 領域の損失に換算して示してある。銅線に比べ交流超電導線の方があまり高磁界でなければ有利であることがわかる。

3. 交流超電導応用

交流超電導線は開発されてからまだ年数がたつておらず、700 kVA 級の円筒超電導コイルが日本で、220 kV の超電導変圧器がフランスで試作されている程度である。しかし、交流超電導線は銅線に比べ電流密度が大きい、損失が少ない、容易に高磁界を発生できるなどの特徴を持っており、産業分野、電力分野に種々の応用の可能性がある。

3.1 産業分野

1) リニアモーター

現在リニアモーターは溝のついた積層鉄心に銅コイルを入れた構造となつているが、銅コイルの電流密度は高々 5 A/mm^2 程度であり、鉄心の磁気飽和もあり空隙の磁束密度はあまり大きくできずトルクも限られてしまう。また、空隙の大きさが大きくなると磁束密度は急速に減少するので、2次導体が厚くなると得られるトルクは小さくなつてしまう。リニアモーターを超電導化すると、線の電流密度は 100 A/mm^2 以上と大幅に増すのみならず、鉄心を省くことができるので、リニアモーターの一次側の表面に並べる導体数を大幅に増すことができるため、従来のリニアモーターに比べ大きな空隙に大きなトルクを発生させることが可能になる。図7には超電導リニアモーターの概略が示してある⁵⁾。

高トルクの超電導リニアモーターの応用例としては、金属圧延工程の非接触張力コントロール、大口径の電磁流体ポンプ、その他金属材料の非接触搬送駆動、さらには電磁カタパルトなどが考えられる。

2) 電磁攪拌器

溶融金属や、金属体の混合した液体に移動磁界や交番磁界をかけることにより液体を電磁誘導により攪拌できる。超電導を利用すれば大きな空間に強い変動磁界を効率よく発生することができるので強力でしかも大量の液体を処理できる電磁攪拌装置を実現できる。

3) 電磁誘導浮上装置

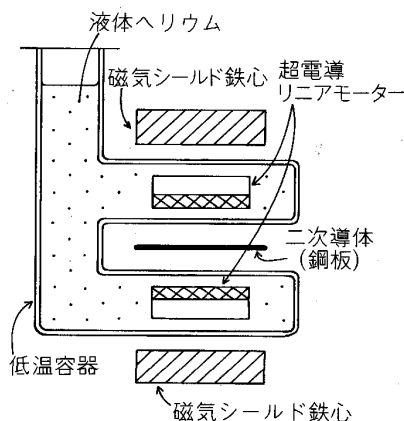


図7 超電導リニアモーターの構成の概略

非磁性金属に交流磁界を加えると、金属中に誘導電流が発生し浮上力が生じる。

実際に物体を誘導浮上させるためには、かなり強い交流磁界を必要とし、銅コイルを使つたのでは消費電力が大きくなりすぎて実用的でなく、交流超電導コイルの利用が必須となる。電磁誘導浮上とリニアモーターを組み合わせれば高温の溶融金属を浮上させつつ、非接触で移動させることが可能となる。溶融金属の非接触搬送が可能となれば冶金工程は従来のものとは全く異なつたものになると期待される。

3.2 電力分野

1) 全超電導発電機

現在日本を初め世界各国で開発が進められている超電導発電機はいわば半超電導形で直流励磁される回転子のみが超電導で、交流電力を発生する電機子巻線は銅コイルとなつている。交流超電導線が実用化されれば電機子巻線も超電導化した全超電導発電機が可能となる。全超電導発電機は、半超電導形に比べ重量、寸法が半分近くになり、さらに効率も向上することが期待されている。

現在フランスで 20 kVA 級の全超電導発電機が試作中である。

2) 超電導変圧器

超電導変圧器は交流超電導線の実現によりはじめて現実性が出てきた。現在考えられている超電導変圧器は鉄心は室温領域にあり鉄損は室温域で冷却され、巻線のみが液体ヘリウムで冷却される。超電導変圧器の巻線に印加される磁界は超電導発電機の場合に比べ低く、技術的には全超電導発電機より容易であると考えられている。変圧器を超電導化することにより、変圧器のコンパクト化、高効率化が期待されている。ただし、変圧器は従来形でも効率はかなり良く、大形器では 99.9% 近くになつており、超電導変圧器に期待されるのはコンパクト化によるメリットである。

3) その他

最近では都市部の送電は地下ケーブルによることが多いため、夜間に一般の電力負荷（インダクタンス分を多く含む）が無くなると地下ケーブルのコンデンサー的な特性の影響が現れ発電機の負荷が進み力率になる。これを補償するために送電系に人為的にインダクタンスを入れる必要がある。このインダクタンスを超電導コイルにすることにより損失を減らすことが考えられている。

現在では送電系に多数の発電機が連系しており、送電系のどこかで短絡事故が起こると大電流が流れるので遮断器の容量を非常に大きくしなければならない。将来さらに電力系統の容量が増していくと短絡時の電流が大きくなりすぎて遮断できなくなる可能性がある。このような場合、交流超電導線が常電導転移すると大きな抵抗を持つようになるのを利用し、事故により一定の値以上の電流が流れるようになると常電導転移するような超電導

限流器も考えられている。

4. 交流超電導線の巻線技術

4.1 安定性

すでに述べたように、交流超電導線では数万本の超電導フィラメントを母材の中に埋め込んだ構造になっており、フィラメントが電磁的に結合して交流損失が増すのを防ぐために母材に抵抗率の高いCuNiを使用している。図8に示すように超電導線に長さ L_c の常電導部が生じたとして、この状態で熱的なバランスが取れているとすると近似値に次式が成立する⁶⁾。ただし χ =超電導線の熱伝導率、 θ_c =超電導線臨界温度、 θ_0 =冷媒温度、 J =超電導線の電流密度、 ρ =超電導線の常電導時における抵抗率である。

$$L_c = \left\{ \frac{2\chi(\theta_c - \theta_0)}{J^2\rho} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

もし、なんらかの擾乱によって生じた常電導部が L_c より長ければ拡大し、短ければ縮小し消滅する。 L_c を最小伝播領域と呼んでいる。いま、 χ および ρ の値としてCuNiの値を取ると、それぞれ4.2Kで、1.3W/m \cdot K、 $10^{-7}\Omega\cdot m$ である。

($\theta_c - \theta_0$)=1K、 $J=10^9 A/m^2$ として(1)式を計算すると $L_c=5\mu m$ となり非常に短い。この程度の長さの常電導部を作るのに必要なエネルギーは線径を0.1mm

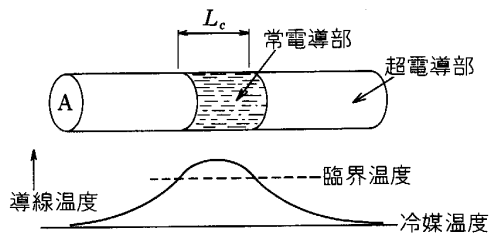


図8 通電中の超電導線の一部に生じた常電導部

とすると $10^{-9}J$ 程度となる。これは1Tの磁界下で通電中の線の長さ1cmにわたり1 μm 程度突発的に動くクエンチを起こしてしまうことを意味する。母材の一部に銅を入れることにより、 L_c の大きさを増すことができるが、あまり銅の量を多くすると交流損失が増してしまい、 L_c の値としては数倍程度増すのが限界である。

交流超電導巻線を安定に動作させるためには、超電導線の細部にわたつてずれが起きないようにしなければならない。そのための方法として、(a)巻線をエポキシで含浸する方法、(b)巻棒にコイル状に溝を作りそこに強いテンションをかけながら線を入れていく方法が考えられている。(a)の方法は巻線構造が複雑な場合でも線は比較的容易に細部にわたり固定される。しかし、交流損失はエポキシの熱伝導を通して冷却されているのでエポキシの層の厚さを適正に選ばねばならない⁷⁾。(b)の方法は摩擦力で線の固定が行われるわけで、巻線各層ごとに巻棒を作る必要があり、大型巻線や複雑な形状の巻線に対しての適用は困難になる可能性がある。

4.2 大容量化

以上で述べたように交流超電導素線の径は非常に細く、大型導体を作るためには数百~数千の素線を束ねた図9(a)、(b)のような導体構造にせねばならない。束ねられた素線が電氣的に接触すると電磁的な結合が生じ交流損失が増してしまうため、素線はおのおの電氣的に絶縁しなければならない。素線はわずかな擾乱でもクエンチを起こし、素線が一本でもクエンチすればそれを束ねた導体全体がクエンチしてしまう。以上の点を考えると交流超電導体の大容量化にあたっては次のような問題点がある。

- i) 導体の大きな温度上昇を伴わず交流損失を冷却しなければならない。
- ii) 導体を構成する素線はわずかでも動いてはならない。

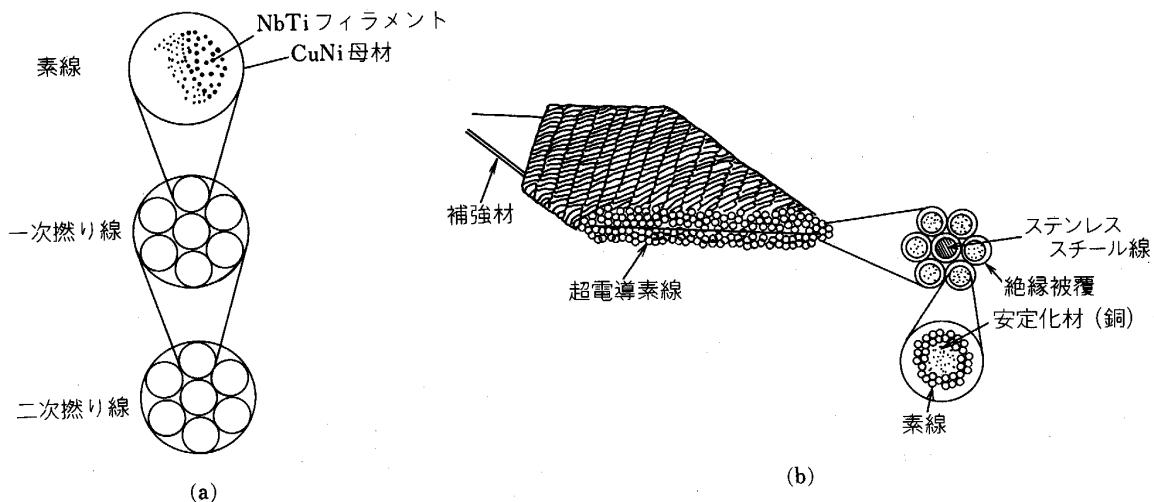


図9 交流超電導線の大容量化

表 1 試作された交流コイルの使用と性能

名 称		コ イ ル A		コ イ ル B		コ イ ル C	
諸 元							
設計容量 (50 Hz)		20 kVA		500 kVA		20 kVA	
定格電圧 (50 Hz)		1.1 kVA		5 kVA		1 kVA	
定格電流 (50 Hz)		18 A		100 A		20 A	
インダクタンス		0.19 H		0.162 H		0.170 H	
巻 数		2.065 ターン		2.645 ターン		1.9855 ターン	
巻線の大きさ	内外高	50 mm		40 mm		45 mm	
	径 径 径	90 mm		145 mm		113 mm	
	径 径 径	50 mm		195 mm		60 mm	
巻線方式		FRP スペーサ方式		溝付巻わく巻線方式		FRP スペーサ+エポキシ樹脂含浸方式	
使用素線	フィラメント直径	0.3 $\mu\text{m}\phi$		0.46 $\mu\text{m}\phi$		0.5 $\mu\text{m}\phi$	
	フィラメント本数	21 672 本 (301 本 \times 72 束)		14 478 本 (127 本 \times 114 束)		14 280 本 (85 本 \times 168 束)	
	ツイストピッチ	1.1 mm		0.98 mm		1.9 mm	
絶縁外	NbTi/CuNi/Cu 比	1/3.3/0.4		1/2.5/0.1		1/3.5/1	
	絶縁厚	PVF 10 μm 厚		なし		ポリエステル 10 μm 厚	
	絶縁径	0.12 mm ϕ		0.112 mm ϕ		0.16 mm ϕ	
使用素線数		7		7 \times 6		6	
性 能	電流値						
	線材の臨界電流 [㊤]	38.3 A (0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)	100%	217 A (1 $\mu\text{V}/\text{cm}$)	100%	55.5 A (10 ⁻¹² Ωcm)	100%
	直流クエンチ電流	39.0 A	102%	195 A	89.9%	54.5 A	98.2%
交流クエンチ電流	14.4 A rms (20.4 A peak) [51.07 Hz]	53.2%	122 A rms (173 A peak) [50.16 Hz]	79.5%	38.8 A rms (54.9 A peak) [48.96 Hz]	98.9%	

㊤ 臨界電流の定義はコイルにより異なる。

交流損失そのものは素線表面積当たりの熱流束にするとわずかであり、液体ヘリウム等の冷媒に素線が接していれば問題なく冷却できる。しかし、線の突発的なずれによる発熱はピーク値が大きく冷却が困難である。素線はおのこの電氣的に絶縁する必要があり、素線を束ねたままでは導体の機械的一体性が悪い。従つて、導体を巻線にした場合、素線は容易に動き得る状態にあるので交流損失の冷却を行いつつ素線をすみずみまで固定する必要がある。前項で述べたよう素線の固定方法には二つの方法がある。

現在はどちらの方法が良いかの結論は得られていないが、一般への応用を考えると含浸法によらざるを得ないと考えられる。

4.3 交流コイルの励磁特性例

表 1 に示したコイル A, B, C のクエンチ履歴が図 10 (a), (b), (c) に示してある⁸⁾⁹⁾。コイル A は FRP スペーサによる冷却チャンネルを持つ非含浸コイルである。線の固定が十分でなく、図 10 (a) から明らかなように直流励磁においてクエンチ電流が線の短尺 l_c に達するのにかなりのトレーニング (クエンチの繰返し) が必要であつた。交流励磁の場合クエンチ電流は直流のときの半分程度に低下している。これは、液体ヘリウムが導体に十分良く接触していない部分があり、交流損失の冷却が十分でなく導体の温度が上昇し、臨界電流値が下がつたためと考えられる。

コイル B は溝付巻わくに線に強いテンションをかけて巻いてあり、含浸はされていない。このコイルは交流超電導コイルとして現在世界最大のものである。図 10 (b)

から明らかなように、やはり線の固定が十分でなく、直流励磁のときにトレーニングがあり、クエンチ電流の最大値は導体の短尺 l_c の 90% 程度であつた。交流励磁の場合交流損失による導体の温度上昇の影響で、クエンチ時のピーク電流は直流励磁の場合より低く、導体の短尺 l_c の 80% となつている。また、線のずれによる影響もあつて、交流のクエンチ電流にはばらつきが見られる。

コイル C は FRP スペーサによる冷却チャンネルをもつエポキシ含浸コイルである。図 10 (c) に示してあるように、直流励磁の場合、1 回のトレーニングで導体の短尺 l_c に達している。また交流励磁の場合、2~3 回のトレーニングでクエンチ時のピーク電流値はほぼ導体の短尺 l_c に達している。これは非含浸の場合に比べ線の固定が良いこと、また、交流損失の冷却も非含浸の場合よりも良いことが示されている。励磁周波数を増していくとクエンチ電流がわずかに低下しており、これは交流損失の増加により線の温度が上昇したものと思われる。

5. む す び

以上、超電導の交流応用について述べてきた。交流超電導線が開発されてまだあまり年数がたつていないため、具体的な交流超電導機器が作られた例はあまり多くない。具体的な機器に応用していくためにはまだいくつかの基礎的な技術的課題、a) 導体の大容量化、b) 巻線技術の開発、c) よりいつそうの低損化、d) 機器に仕様される状態での交流超電導巻線のふるまひの解明、がある。a), b) については本文で述べたとおり開発の方向

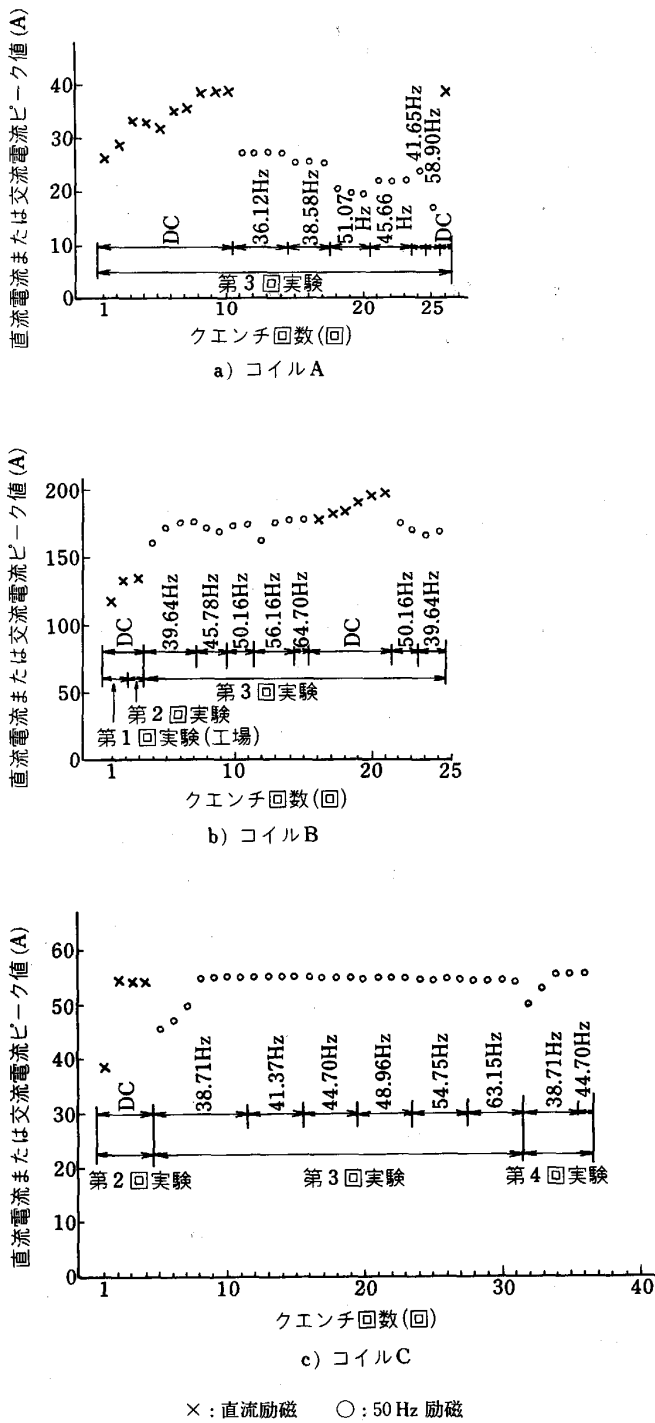


図 10 交流コイルのクエンチ履歴

性は明らかになりつつある。c) に関しては交流超電導応用が実用化されるために現状よりさらに損失を数分の一にした方が好ましい。現在この分野での努力も続けられており、徐々にではあるが進歩しつつある。d) に関しては、現在あまり研究が進んでいない。円筒状のコイルの実験では素線の損失とコイルにした時の損失にはくい違いがあると考えられているがそのくい違いを正確に予測することは現在のところできない。また、種々に機器に応用した場合、交流超電導線に印加される磁界変化のモード、損失特性について今後研究を進めていく必要がある。

以上の基礎的技術課題を解決するための地道な努力を今後精力的に続けていく必要があると同時に、具体的な交流超電導機器を試作しつつ応用技術の開発も並行して進められるべきであると思われる。

現在のところ、交流超電導線の材料としては NbTi が一般的であり、Nb₃Sn を用いたものも開発が行われているが、いずれにしても液体ヘリウム温度で使用するようになる。昨今ブームになっている高臨界温度酸化物超電導体に関しては、また十分電流密度の高い直流導体が得られておらず、交流超電導線については、単に机上計算による検討にとどまっている。しかし、液体窒素温度で使える酸化物交流超電導線が開発されれば、冷却効率は液体ヘリウムの場合より 50 倍程度良くなり、低温容器の構造もより簡単になり、実用的には非常におおきなメリットがあるので、その開発に大いに期待したい。

文 献

- 1) I. HLÁSNÍK and P. DUBOTS: Proc. MT 8 (1983), p. 459
- 2) I. HLÁSNÍK and P. DUBOTS: Proc. MT 8 (1983), p. 467
- 3) 小笠原武, 久保田洋二, 八十浜和彦: 低温工学, 22 (1987), p. 76
- 4) A. FEVRIER: IEEE Trans. on Mag., 24 (1988), p. 787
- 5) 塚本修巳: 昭和 63 年電気学会全国大会 (1988), p. 976
- 6) M. N. WILSON: Superconducting Magnets (1983) [Clarendon Press Oxford]
- 7) O. TSUKAMOTO, M. YAMAMOTO, T. ISHIGOHKA, Y. TANAKA and H. KOBAYASHI: IEEE Trans. on Mag., 23 (1987), p. 1592
- 8) 田中紀捷, 石川忠夫, 秋田 調: 電・情関連学会連合大会, 分冊 1 (1987), p. 45
- 9) 秋田 調, 石川忠夫, 田中紀捷: 電気学会研究会資料 (1987), SA-87-59