

Title	強制冷却超電導導体の安定性
Author(s)	山本, 純也
Citation	大阪大学低温センターだより. 58 p7-p.10
Issue Date	1987-04
oaire:version	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/12607
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

強制冷却超電導導体の安定性

低温センター 山本純也 (吹田4106)

最近の高温超電導体の発見は超伝導現象の社会生活への応用という観点では非常に明るい話題である。低温技術者としてはこの高温超電導体及び実用の超電導導体（電気を通す導体の意味で以下電の字を使う）に発展するか強い関心を持って見守っている。導体となるかどうかは電流密度、動作温度、臨界磁界（動作電流密度、温度での）と耐電磁力の4つの性質が重要なファクターとなる。

さて超電導導体に電流を流すと超電導という名前に反して予想外の発熱によって超電導状態がこわれる（一般にクエンチと呼ばれている）ことがある。この発熱にはたとえば導体の電磁力による摩擦、放射線照射、導体内の電流分布の不安定に伴うピンの移動などによる局所発熱と変動磁界内で電流が流れることによる交流損失が代表的なものである。したがって冷却・冷凍装置は導体を超電導となる動作温度に冷やすだけでなく、超電導装置からの発熱を除去して導体を動作温度に保つことができるだけの冷却能力を持たねばならない。この熱負荷は常電導の場合にはジュール発熱という電流の関数で与えられるが超電導の場合には交流損失以外の局所発熱の定式化はまだできていず冷却工学上の悩みがある。

前置きが長くなったが、筆者はここ数年超電導導体の強制冷却に取り組んでいる。これは導体を液体ヘリウムや液体窒素の中に浸すのではなく、導体と冷媒管路を一体化させて管路内を流れる冷媒によって導体からの発熱を除去する。この方式の利点はいわゆる液槽（デュワー）を必要としないから任意の形状のコイル等を作ることができるし、動作温度も自由に選べる点でまさに高温超電導時代の冷却法である。反面欠点は導体途中で受けた熱負荷によって冷媒の温度が上がりそのまま下流に流れていくことや、高温負荷を受けて一時的に冷媒の流れが止まることもあることである。そこで我々はまず計算機シミュレーションによって部分加熱を受けた時の導体温度の変化をみた。

シミュレーションには流体方程式（エネルギー保存、運動量保存、連続の3式）を用い、導体と冷媒との熱伝達量 $Q = hA(T_w - T_b)$ を支配する h として Giarratano の式

$$h = 0.0259 (k_w / D_w) \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} (T_b / T_w)^{0.716} \quad (1)$$

が成り立っているものとする。ここで Q : 熱伝達量、 h : 熱伝達率、 A : 熱伝達面積、 k_w : 導体の熱伝導率、 D_w : 水力直径、 $\text{Re} = mD_w / \eta$ レイノルズ数、 $\text{Pr} = c_p \eta / k_b$ 、プラントル数、 η :

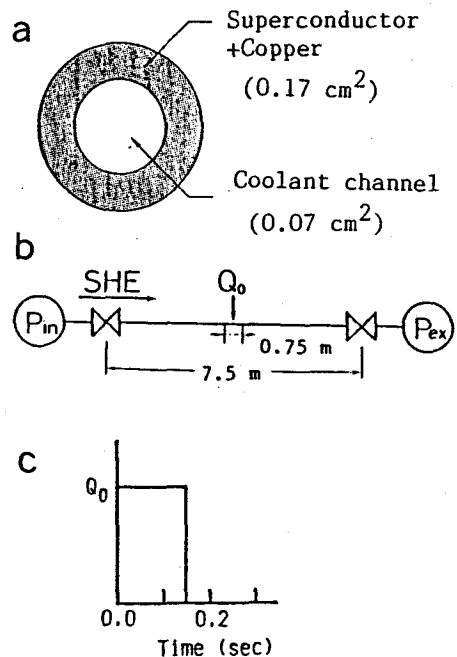


図1 シミュレーションのための条件 (a) 導体断面 (b) 計算長さ (c) 加熱パターン

粘性係数、 k_b : 流体の熱伝導率、 c_p : 流体の等圧比熱

図1 aは対象とした導体の断面図、図1 bは導体の長さ方向の条件、図1 cは加熱の時間的パターンをあらわしている。図2は導体温度のシミュレーション結果を表しており、他の条件を同じにして通電電流を500A、1000A、2000Aと変化している。この電流は導体温度と無関係に一定値を保っているので分流通開始温度6.2K以上ではジュール発熱を起す。500Aの時は加熱終了後すぐに導体温度が下がっているが、1000A では熱伝達率の劣下が1.5秒後位におこり導体温度が突然上がりはじめている。2000A では加熱直後からぐんぐん温度上昇がみられる。

導体と冷媒の流れ方向への温度分布は超電導破壊を予測する上で非常に重要である。図3は質量流量をかえて加熱直後の温度分布をみたものである。流速が遅い時は熱伝達が悪く導体に沿っての熱の動きがあらわれ上流側の温度が上昇した。これに対し流速が増すと熱伝達が大きく下流側へ冷媒によって熱が伝わり下流部の温度上昇がみられる。このように強制冷却導体では流速が導体安全性を決定する重要な要素である。

ところでシミュレーションでは短時間に変動の大きいところをみるのに適しているが、長い管路(100m程度)で分オーダーの時間での様子を見るのは計算時間の点から困難である。そこで図4に示すホロー導体を用いてソレノイドコイルを作り導体全長にわたる定常加熱時の流体挙動と超電導破壊の位置の時間変化を観測した。図5は測定回路を示しており、入口温度5.1K、流量0.8g/s、入口圧力0.8MPaを標準実験状態としている。図6はクエンチ発生位置と時間の加熱量依存性を示している。加熱量の小さい時は下流側でまずクエンチが発生するのにに対し加熱量が大いとう上流からまずクエンチしている。これは導体の流れ方向に沿った臨界温度分布と、加熱による導体の温度分布との交点の位置が最初のクエンチ位置を決めている。加熱が大いとう上流側で温度が早く上がって図6の結果が得られる。

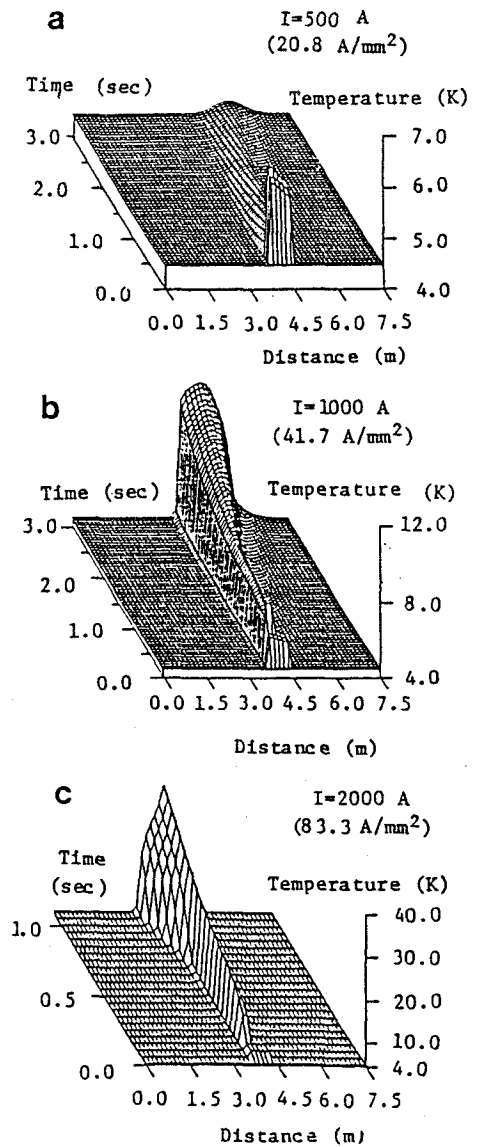


図2 超電導破壊後の導体壁温の変化。流速0.5g/s、加熱量87mJ/cm²、通電電流は(a) 500A、(b) 1000A、(c) 2000A。

一体どれだけの熱量が導体に加えられるとクエンチするかが実用上大きな問題である。管内の冷媒を初期温度 T_0 から超電導臨界温度 T_c まで上昇させるのに必要なエネルギー Q_j (cal) は次の式で表される。

$$Q_j \text{ (cal)} = A \int_{T_0}^{T_c} \rho c_p dT \dots\dots(2)$$

一方実験値 Q_j (meas) は加熱強度を Q_h 、最初にクエンチが観測される時間を t_q とすると次の式であらわされる。

$$Q_j \text{ (meas)} = \int_0^{t_q} Q_h dt \dots\dots(3)$$

図7は両者の比 $P = Q_j \text{ (meas)} / Q_j \text{ (cal)}$ を示したものでは1に近いところにあることがわかる。このことから導体の比熱が小さい結果冷媒の温度と導体の温度の間に差のないことが予測される。加熱量の大きい程 P が小さくなっているのは熱伝達の時間的遅れから導体の温度が上がりクエンチに至ったものである。

強制冷却導体は長い歴史を持つ浸漬冷却にくらべて冷却安全性だけでなく、多くの開発課題をかかえている。そこで我々はSHETEM (Supercritical Helium cooled Test Magnet) 計画をたてて初期冷却、パルス熱負荷時の冷却、電磁応力、冷凍機設計等に取り組んでいる。本研究は文部省科学研究費補助金エネルギー(核融合) 特別研究によって行っているもので、研究の遂行には大内徳人君、高見佳宏君、楨田康博君等が当たった。計算機シミュレーションには九州大学で開発されたPROPATH (熱物性値プログラムパッケージ) を用いた。テストコイルは住友電工研究開発本部の協力で作成したものである。

この研究を始めた時には予想しなかった高い臨界温度を示す超電導物質が発見された。その結果、これら新物質を用いた導体の開発には、動作温度を任意に選べる強制冷却が注

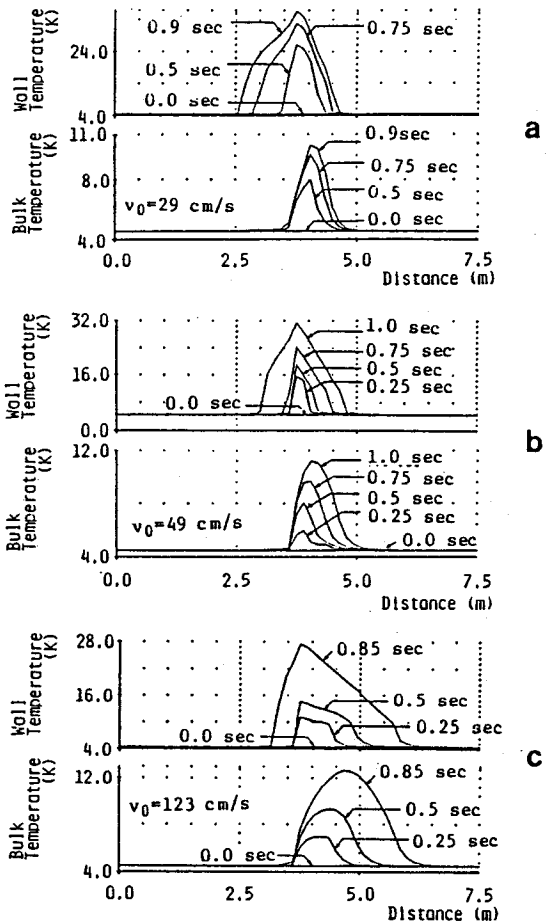


図3 超電導破壊後の導体および冷媒の温度分布。
 (a) 流速29cm/s (0.3g/s) 加熱量60mJ/cm³
 (b) 49cm/s (0.5g/s)、87mJ/cm³
 (c) 123 cm/s (1.25g/s)、174mJ/cm³。
 通電電流2000A。

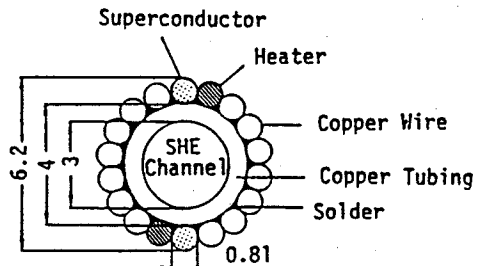


図4 テストコイル (SHETEM2) 用導体。
 2本の超電導線、2本のヒーター、14本のダミー銅線が冷却チャンネルのまわりにピッチ70mmで巻き付けられ、ハンダで固定されている。実用線では超電導線の比率を増し、電流密度を増す。

目を集めるようになった。新しい導体の実現するときの動作温度と冷却法を予測することは困難であるが、筆者は液体窒素温度のヘリウムガス強制冷却が当面の目標になると予想している。

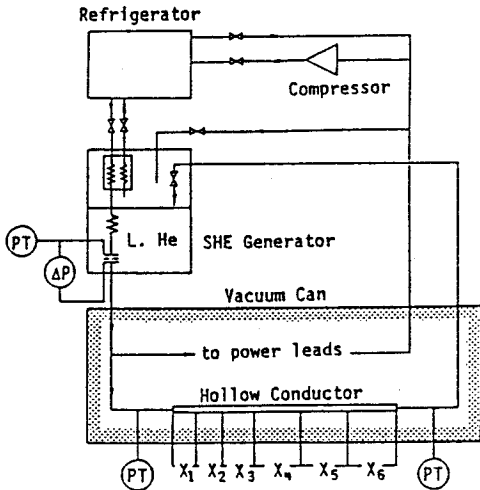


図5 強制冷却コイルの測定回路、区間 $X_1 \sim X_6$ は超電導破壊箇所測定用

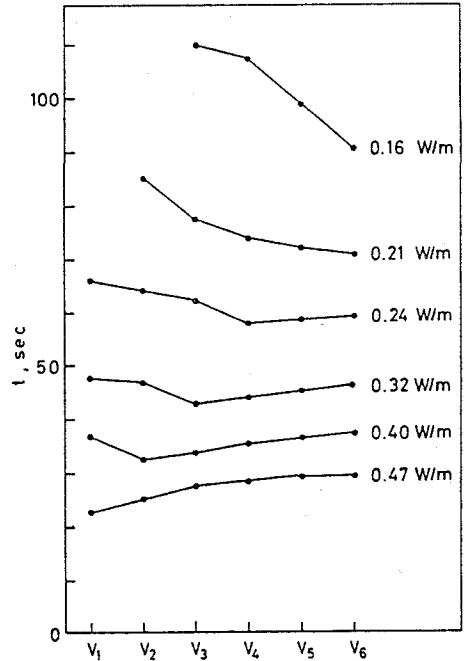


図6 全体一様加熱時のクエンチ発生時間の位置依存性。電圧 $V_1 \sim V_6$ は図5の位置 $X_1 \sim X_6$ に対応。通電電流400A、初期流量0.83g/s、入口温度5.2K、入口圧力0.8MPa

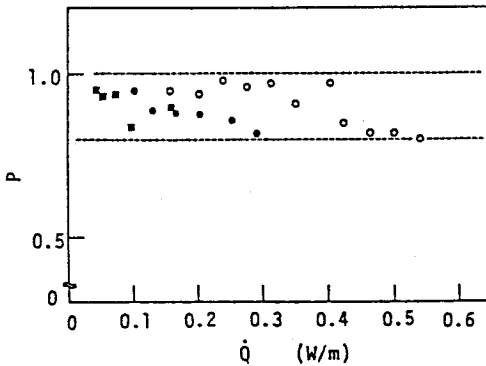


図7 定常加熱時のクエンチに要するエネルギー。P = (最初にクエンチが発生するまでに投入されたエネルギー) / (管内のガスの温度をクエンチの発生するまで昇温させるのに必要なエネルギー計算値)。横軸は長さ方向の加熱密度。

PROPATHの利用について

本稿で使用した熱物性値プログラムパッケージは九州大学の好意で大阪大学大型計算機センターのライブラリーになっており、FORTRANプログラム中で関数値として利用できる。ガスはヘリウムだけでなく窒素やフロン等の11種類が関数値としては蒸発熱や比熱など約60種が含まれている。詳しくは大阪大学大型計算機センターニュースVol.16, No.3 (1986)を御覧下さい。