

Title	超電導スイッチ
Author(s)	村上, 吉繁
Citation	大阪大学低温センターだより. 1975, 11, p. 4-8
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/8109">https://hdl.handle.net/11094/8109</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

# 超電導スイッチ

工学部 村上吉繁 (吹田 4568)

## 超電導スイッチ

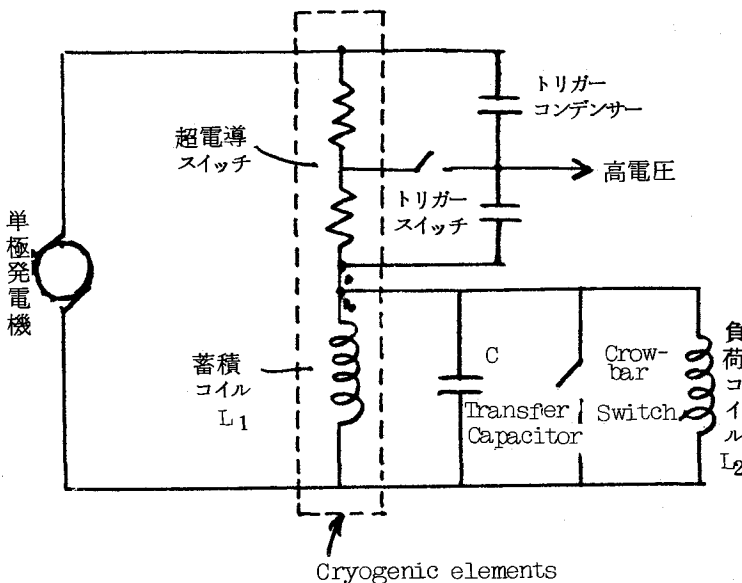
超電導電力機器の制御のためには超電導スイッチは不可欠のものである。大容量超電導機器は超電導マグネットと超電導発電、送電などの交流機器に大別される。

超電導マグネットのエネルギー蓄積装置としての用途には、超電導スイッチと組合わせて核融合プラズマ、高出力レーザー、粒子加速器のための高出力パルス装置がある。強磁界発生用としてはMHD発電、磁気浮上、風洞中の試料保持などが主たるものである。超電導マグネットによるエネルギー蓄積は1MJ以上、放電時間1msec~1secにおいて経済的に有利とされている。 $10^6 \sim 10^8 \text{ J}$ を蓄積し急速放電により $10^6 \sim 10^9 \text{ W}$ を放出することができる。現在数百KJのオーダ開発中であるが、 $\theta$ -ピンチ核融合炉には50GJが必要といわれている。

Los Alamosでは、300MJの試験炉(FTR)をまず実現することを目標にしている。そのために300KJが現在進行中で、その完成後475KJのモジュールを作成し、これを600集めて300MJを実現するとしている。

## 超電導スイッチ回路

FTR用パルス発生装置の基本回路を第1図に示す。超電導スイッチは電流パルスによるS→N転移



第1図

エネルギー蓄積モジュール300 KJ

$$L_1 = L_2 = 6 \text{ mH},$$

$$C = 187.5 \mu\text{F} (40 \text{ KV})$$

伝達時間 2.35 msec.

発電機 6 V, 10 KA.

方式で、コンデンサに蓄積した電荷の放電による電流パルスを超電導体に印加してトリガーする。超電導コイル $L_1=6\text{mH}$ は、6V、10KAの単極発電機により増加率1KA/secでランプ状に10KAに充電される。そこでcrowbar switchを投入すると同時に超電導スイッチを開く。コイルエネルギーはcrowbar switchを通じて流れる永久電流となる。crowbar switchを開くと蓄積電流はtransfer capacitor(187.5 $\mu\text{F}$ )と負荷コイル $L_2$ にエネルギーを与える。transfer capacitorによりエネルギーを一旦たくわえcrowbar switch開放時のアーク損失をおさえているので、この回路で最もよいエネルギー伝達効率を得られる。300KJについて40KV、2.35msecのパルスを生じる。crowbar switchは高耐圧のため機械式であるが、超電導スイッチはS-N転移方式である。

交流回路超電導スイッチは交流損の検討などの基礎的段階にある。

### 超電導スイッチの諸方式

第1表に各種のパルス出力用超電導スイッチを示している。S-N転移による超電導スイッチとしては熱、磁気、電流、放射線の各方式がある。熱式は最も簡単で臨界温度によるS-N転移を利用するため熱伝導をいかに速めるかを検討している。しかし熱の伝播には限界があり数msec以上に高めるのは困難であろう。

第1表 各種の超電導スイッチ

エネルギー	出力パルス	スイッチ要目 電圧×電流、オフ低抗、クエンチ時間	トリガー装置	スイッチ材料
26J	600V×10A, 10msec	10K $\Omega$ , 10msec	熱式、銅巻線ヒーター 680 $\Omega$ (298K)	Nb25%-Zr, 0.005in×700m
	600V×60A, 2msec	60A, 195 $\Omega$ , 2msec	磁気式、銅巻線 (バイファイラ巻)	Nb-Ti multifilament in Cu-Ni Matrix, 480m
300KJ	40KV×10KA 2msec	20KA, 8.42 $\Omega$ , 2~10 $\mu\text{sec}$	電流式、コンデンサー 15 $\mu\text{F}$ (15KV)×2	Nb-Ti filament 0.02cm $\phi$ ×54 in Cu-Ni Matrix, 45.7m
$\frac{3}{8}$ MJ	60KV×20KA	20KA, 20~40 $\Omega$		
$\frac{1}{8}$ MJ	22KV(25MW) 25msec			Nb-Ti multifilament in Cu-Ni Matrix, Nb-Ti単体, Pb-Bi薄膜 Milar 蒸着
1~100MJ	1~1000MW			
交流回路用		18KV×1300A, 5 $\Omega$ 交流損 $5\times 10^{-4}$ W/m <sup>2</sup>	電流式	Nb, 5 $\mu\text{m}$ (厚)×7.5m(巾), 2.34Km 半導体100 $\mu\text{m}$ ×7.5m, 2.3Km, 圧着

磁気式、電流式が現在開発の主流である。msecのオーダーから2~10 μsecも可能とされている。急速スイッチングはスイッチ自身のクエンチング保護のためにも必要である。すなわちスイッチ開放時の抵抗を数オームから数十、数百オームにするためにはスイッチ超電導体の長さが数十メートルから数キロメートルにもおよぶことになる。一部で超電導がやぶれたとき急速S-N転移を行えば焼損を防ぐことができる。磁界および電流の build up を速めるため両方式とも無誘導の bifilar 巻（互に逆方向の電流を重ねる巻き方）を採用している。磁界式は  $\frac{dB}{dt}$  による電流損、磁束流抵抗増加が転移に寄与するものと思われる。

放射線による転移方式においては、X線または高エネルギー電子ビームを超電導体に放射し、そのエネルギーを熱として吸収せしめ温度による転移を生ぜしめる。蓄積エネルギーに比してわずかの放射線エネルギーで μsec オーダーのスイッチング可能という計算がある。

スイッチ材料としては、各方式とも Nb-Ti 単体、Nb-Ti フィラメントを Cu-Ni マトリクスに埋め込み、Pb-Bi 合金層をマイラリボンに蒸着、Nb-Ti 層と半導体層の重ね合せなどの構成法が試みられている。

#### 超電導スイッチ転移現象

上述のごとく、超電導スイッチは方式、構成ともに高速スイッチング、大容量化、安定化を課題とする多くの問題点が未解決である。その基礎となるのは転移現象の解明であると考えられ、筆者らもこれを重点として研究を行っている。

S-N 転移の引き金となる常電導の核を生ぜしめるのはそれぞれ熱、磁気、電流であっても、①温度上昇により遮へい電流が減少し、②侵入磁束が増加そのためまた温度上昇するというサイクルが超電導状態で生じて混合状態に移り、そこで温度上昇により ③臨界電流減少、このため、④起電力増加、⑤強度上昇というサイクル③→④→⑤→③があり、これらのサイクルの正帰還により臨界温度に達し常電導に転移するものと考えられる。この因果関係を正確に記述するシミュレーションにより S-N 転移を考察してスイッチ設計法の指針を得ることが期待される。スイッチの簡単なモデルとして第2図の構成を考え、ヒータによる温度上昇にもとづく常電導転移が拡散する模様を解析する。

熱拡散は次の偏微分方程式で定式化される。

$$S(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = K(\theta) \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{P}{A} h(\theta) \theta + g + f(x, t) \quad (1)$$

$\theta = T - 4.2(K)$  : 超電導体とヘリウムとの温度差

P : 周長 (cm)

A : 断面積 (cm<sup>2</sup>)

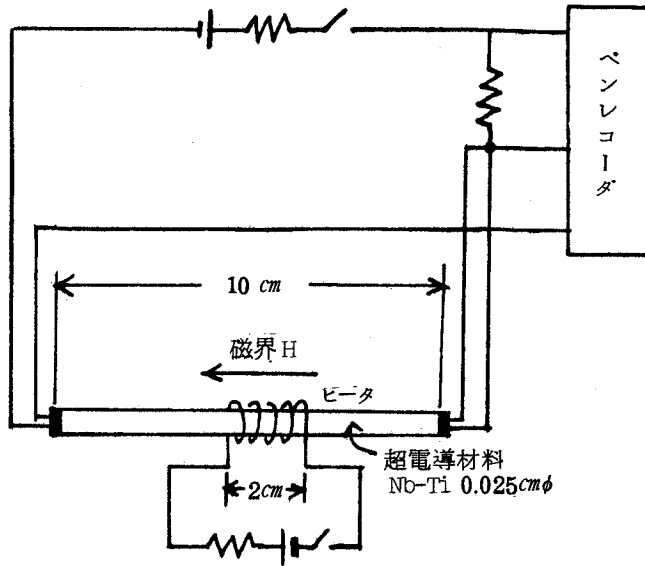
S(θ) : 熱容量

$K(\theta)$  : 熱伝導係数

$h(\theta)\theta$  : 液体ヘリウム中の熱伝達量

$g = p \cdot j^2$  : ジュール発熱量

$f(x, t) = f_0(x) (1 - \exp(-t/\tau))$  : 外部より印加する熱量



第2図 超電導スイッチ転移測定

③→④→⑤→③ のサイクルのうち④は(1)において比抵抗  $\rho$  を

$$\rho = \rho_n \left( \frac{H}{H_{c2}(0)} \right) \cdot (1 - J_c/J) \quad (2)$$

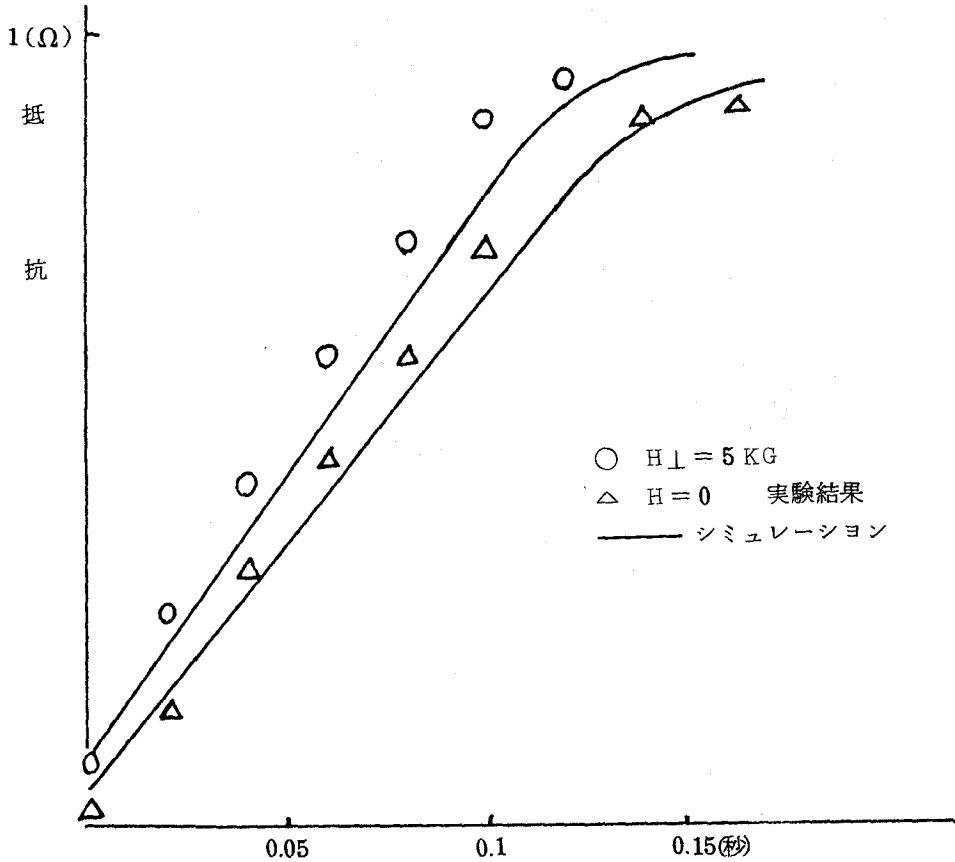
とし、③は②式の  $J_c$  を

$$J_c = J_{c0} \left( 1 - T/T_0 \right) \quad (3)$$

とすることによって表現される。ここで  $J_c$  は磁界侵入の臨界電流、 $\rho_n$  は常電導時の抵抗、 $H_{c2}(0)$  は  $0(K)$  における臨界磁界、 $T_0$  は臨界温度である。常電導への転移はこれらの関係を入れて、(1)式を解き、温度  $T$  が臨界温度

$$T_c = T_0 \left( 1 - H/H_{c2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

をこえたときに生じることになる。0.025 cm 径の Nb 61% - Ti についてシミュレーションを行なった。S, K,  $h(\theta)$   $\theta$  は物性論の成果を参照して温度の関係として表現した。第3回は S 状態で 3 (A) を通電中、ヒータに電流を印加してからの超電導体の抵抗増加を示している。



第3図 S → N 転移過程 Nb 61% - Ti シミュレーションと実験結果

以上システム工学の手法と物性論の結合により超電導スイッチの構成法に手がかりをつけることを目標としている。