

# 超伝導コイル用30kA級直流遮断装置の開発

Development of the 30kA Class DC Breaker for Superconducting Coils.

棚橋秀伍<sup>\*1</sup> 丹羽裕彦<sup>\*2</sup>  
Shyugo Tanahashi Hirohiko Niwa  
佐藤 徹<sup>\*2</sup> 青山浩二<sup>\*2</sup>  
Toru Satoh Koji Aoyama  
戸松均治<sup>\*2</sup> 河合俊哉<sup>\*2</sup>  
Kinji Tomatsu Toshiya Kawai

We developed a 30 kA class heavy-current DC circuit breaker which protects large superconducting coils from quenching. Large commutation condensers have usually been necessary for this purpose. In this newly developed circuit breaker, we further applied a unique method that the main current is commutated from a vacuum interrupter to a high-voltage current-limiting fuse so that the current can be broken by the fuse.

Generally available 3 kV- or 6 kV- rating electrical parts may be used as its main components, and then commutation condensers are no more necessary. Thus, the DC breaker can be assembled in a most economical way.

We conducted current-breaking tests up to 32 kA using this new DC breaker; the results were satisfactory and the effectiveness of the new apparatus was confirmed.

This report also introduces the design method of a commutation circuit and the calculation method of the temperature rise of fuse element for short-time range.

## 1 まえがき

核融合分野での超伝導磁場コイルは、近年ますます大型化の傾向にある。特に核融合科学研究所(以下、核融合研)において、現在、設計・製作中の大型ヘリカル装置(以下、LHD)は、その超伝導磁場コイル群の総合蓄積エネルギーがギガジュール( $10^9$ J)にも達する世界的にも類を見ない大規模な装置である。

これらの超伝導コイルを駆動する直流電源は、低電圧(数10V)、大電流(数10kA)の電源装置となるが、超伝導コイルを負荷とするため、そのコイルの保護用にコイル電流を速やかに減衰させる特別な直流遮断装置の設置が必須になっている。しかし、このような大電流直流遮断装置の汎用品は未だ製品化されておらず、一般に設置されているのは、特殊な開発設備である。このための開発の費用や期間が大きな問題となり、低価格で汎用性の高い直流遮断装置に対する期待が高まっている。

当社はこれらのニーズに応える直流遮断装置の研究・開発を核融合研と共同で進めてきた。その結果、汎用品を用いて、経済性に優れた新方式の直流遮断装置の開発に成功した<sup>(1)(2)</sup>。

本稿では、まず直流遮断について通常の方法を説明し、次に新開発の直流遮断装置の概要とその実験結果を報告する。

## 2 超伝導コイルの保護

### 2.1 クエンチ保護

超伝導コイルの直流抵抗は厳密に零であり、このため細い線材で大電流を流すことが可能である。超伝導状態を保つために、線材は液体ヘリウムで極低温に冷却しておくことが必要である。しかし、何らかの原因(異常な温度上昇、強磁場など)で超伝導状態が破られ、常伝導状態に陥ることがある。この常伝導転移のことをクエンチという。

通電中にクエンチが発生すると、コイルの蓄積エネルギーが大きいくらい程、コイルに大きな損傷を与える。このため、超伝導コイルや冷却系などにはクエンチ防止のための種々の工夫がなされている。安定化導体もその一方法であり、細い超伝導素線を電気伝導・熱伝導共に良好な銅材で厚く囲み、電気的にも熱的にもバッファの働きをさせ部分的なクエンチの発生を防止している。

しかし、冷却系の問題など予期せぬ原因でクエンチが発生する場合も考えられ、この場合には直流電源側で電流遮断とコイルの蓄積エネルギーの処理を行わなければならない。

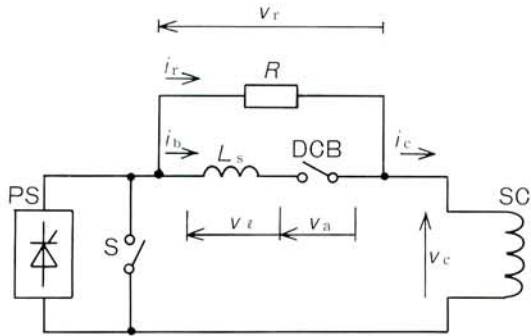
## 2.2 直流遮断と転流

### (1) 直流遮断

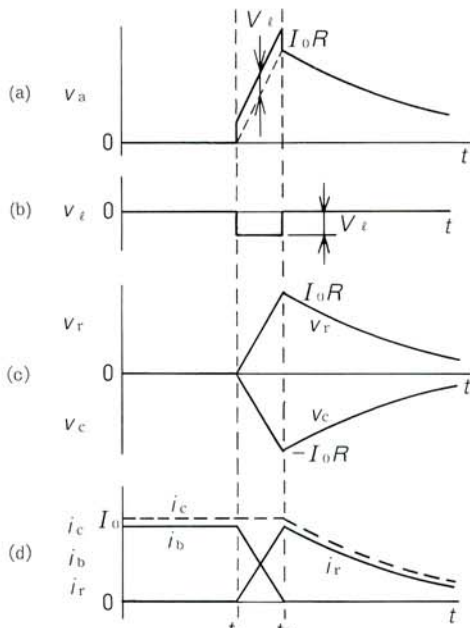
電源側で行なうクエンチ保護の一般的方法を図1に示す。

通常の小電流・低インダクタンス負荷の場合の直流遮断と異なる点は、保護抵抗 $R$ の有無である。 $R$ が無ければ、図1(d)において、 $i_b = i_c$ となり、直流遮断器 DCB には長時間アーク電流が流れ続け、コイルの蓄積エネルギーのすべてを DCB の接点間アークで消費しなければならない。これを避けるため、大電流の直流遮断には、主電流をエネルギー消費回路に移す動作を行なう転流遮断方式が用いられる。

電鉄用途の直流遮断器には、 $R$ の代わりに ZnO バリスタを用いた転流方式が採られている。核融合用超伝導コイルでは蓄積エネルギーが大きい(LHDでは数100MJ)ので ZnO バリスタでは吸収しきれず、大電力抵抗器が用い



PS: 直流電源 S: 短絡スイッチ DCB: 直流遮断器  
Ls: DCB回路インダクタンス R: 保護抵抗 SC: 超伝導コイル



初期電流 $I_0$ でSを閉じた後、時刻 $t_0$ でDCBを開極した時の各部波形。 $t_1$ でDCBから $R$ への転流は完了する。

図1/電源回路と保護動作

Fig.1/Power supply circuit and wave-forms at protection operation

られる。このように、大電力用途には、必ず何らかの転流方式による直流遮断器が用いられる。

なお、図1の直流電源 PS のインバータ運転(出力電圧極性を反転)でコイル電流を減衰させようとした場合は、PS の出力電圧が小さく(数10V)、かつコイルのインダクタンスが大きい(数H)ため、相当の時間(数10分)が必要となり、緊急の場合には到底間に合わない。このため、S を閉じてから DCB で遮断し、主電流を $R$ に移して、その電圧降下( $R \times i_r$ )を、起電力として電流を速やかに減衰させる(図1の(d))。

### (2) 転流の原理

抵抗分を無視した転流の原理を図2に示す。大電流回路においてはインダクタンス分を無視することはできず、転流は、主に電流値( $I_0$ )、インダクタンス( $L_s$ )、転流起電力によってその様相が決まる。ここでの転流起電力は、DCB の極間に発生するアーク電圧( $V_a$ )である。

図2の回路においては、転流時間 $t_c$ は、

$$t_c = \frac{L_s I_0}{V_a} \dots\dots\dots (1)$$

になる。また $V_a$ が時間により変化する一般的な場合には、

$$L_s I_0 = \int_0^{t_c} V_a dt \dots\dots\dots (2)$$

となり、インダクタンス・電流積(LI積=総磁束)と電圧・時間積(VS積)とが等しくなる。これは磁束の原理関係式 $LI = VS$ を示している。

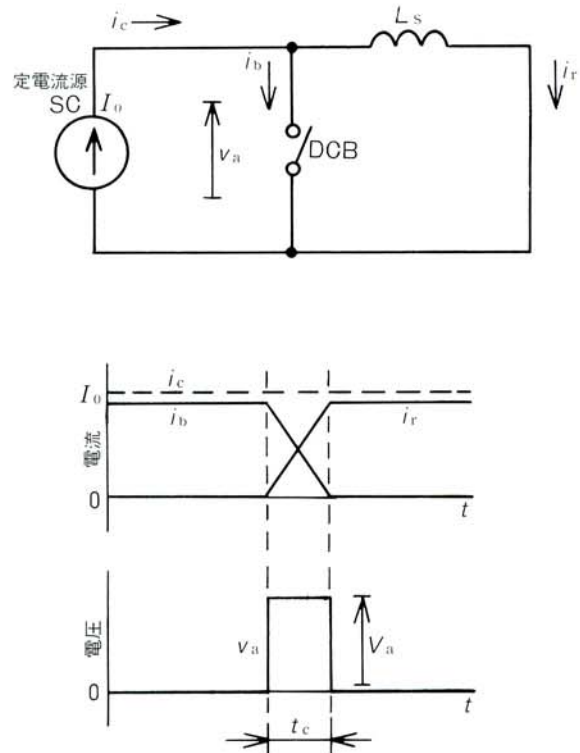


図2/転流の原理

Fig.2/Principle of commutation

すなわち、アーク電圧が高い程、転流は速やかに行なわれ、また $LI$ 積が大きい程、転流が困難になってくる。なお、転流時間が短い程、DCB接点の損傷が少なくなるのはもちろんである。

図1の回路では、被転流側の電圧( $R \times i_r$ )は転流が進むにつれ上昇するため、DCBはその電圧以上のアーク電圧( $V_a$ )を発生しなければ、転流起電力( $V_i$ )が確保できず転流失敗に陥る。このため、数kVのアーク電圧を発生する特別な工夫をした遮断器が必要となる。

(3) コンデンサ転流方式

真空遮断器(VCB)のような通常の交流遮断器においては、電流遮断は電流の自然零点で行なわれるのでアーク電圧は必要ではなく、その値は数10V程度である。したがって、VCBは、そのままでは直流遮断装置には適用不可である。

VCBを用いた直流遮断装置には、図3に示すような、コンデンサによる二段転流方式が用いられる<sup>3)</sup>。これは、一段目の被転流側コンデンサ( $C$ )を予め充電しておき、これを転流起電力としてVCBから $C$ に転流させ、その後二段目の被転流側すなわち保護抵抗 $R$ に転流させるものである。このような場合、開閉部に低いアーク電圧しか発生しなくても転流が可能となる。

しかし、この方式では、大容量コンデンサバンク、充電装置、放電スイッチ、タイミング制御装置などの周辺機器の大型化や、経済性、タイミング制御の確実性などの諸問題があった。

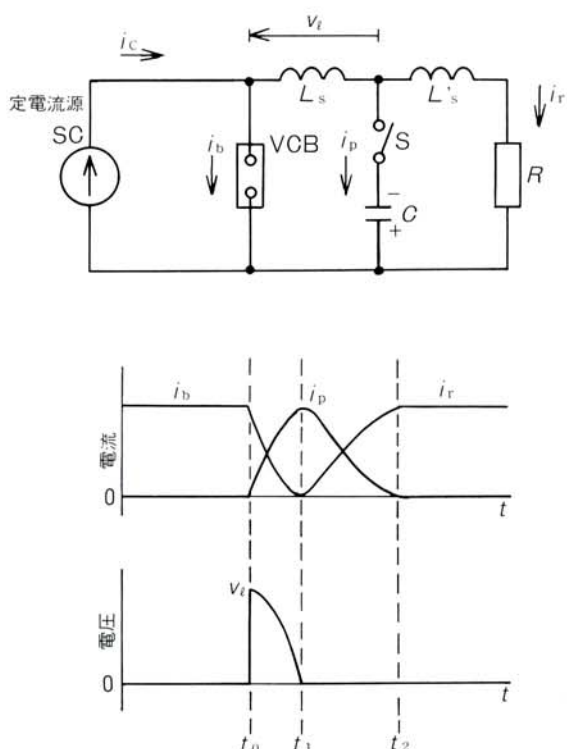


図3/コンデンサ転流方式  
Fig.3/Capacitor commutating method

(4) ヒューズ転流方式

筆者らが新規に考案した VCB・ヒューズ転流方式を図4に示す。

この方式は、VCBの低いアーク電圧によっても、転流先が十分低インピーダンスであれば転流可能であることと、汎用の交流用限流ヒューズが十分高いアーク電圧を発生することなどに着目したものである。この基本的考えを次に示す。

①真空遮断器 (VCB)

- VCBのアーク電圧は10V~40V程度である。
- 一旦電流が零になると、VCBの極間は $\mu s$ オーダーの短時間で絶縁回復する<sup>4)</sup>。これは真空中の荷電粒子の拡散速度が非常に大きいためで、6kV級のVCBで320V/ $\mu s$ 以上の回復性能をもつ(JEC-2300)。

②高圧限流ヒューズ(F)

- 交流用限流ヒューズでも直流遮断が可能<sup>5)</sup>。
- 汎用ヒューズで40kA以上の遮断能力をもつ。
- AC 3kV定格のヒューズであれば6kV以上のアーク電圧は必ず確保でき(JEC-2330)、抵抗への転流は確実に行なわれる。
- 定格電流が400A程度の汎用品が適用できる。

③VCB+F

- VCBのアーク電圧がヒューズの電圧降下以上の値を持続すればVCBからFへの転流は完全に行なわれる(図4)。アーク電圧が確保されなければ、転流は途中で止まり分流状態を持続する。

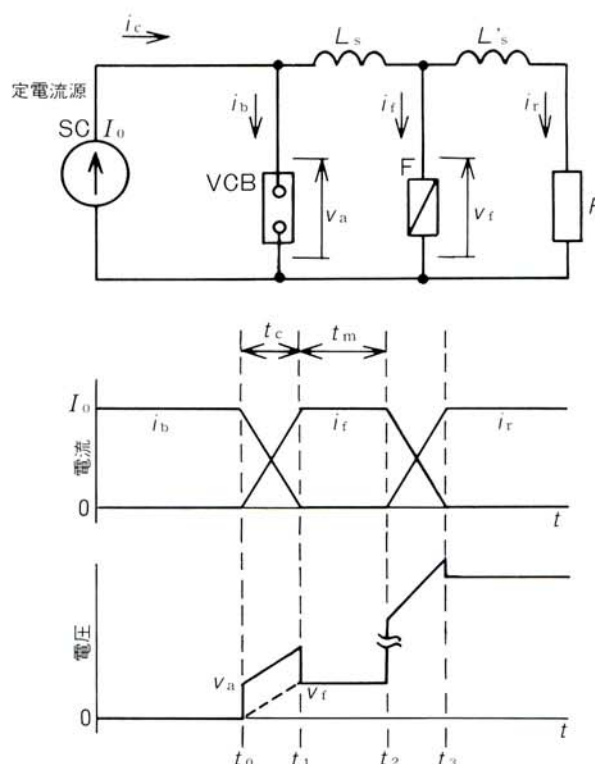


図4/ヒューズ転流方式  
Fig.4/Fuse commutating method

- ・溶断時間  $t_m$ (図4)が零以上であれば、ヒューズ発弧電圧に対して VCB が再点弧することは無い。
- ・VCB から F への転流途中で、F が溶断発弧すると VCB はアークを持続して転流失敗となる。

上記の原理から、本方式を実現するためには図4において、下記の条件を満足させる必要がある。

- 転流時間  $t_c$  を短くする。
- 溶断時間  $t_m$  を長くする。
- アーク電圧  $v_a$  を高くする。
- ヒューズ電圧降下  $v_f$  を低くする。
- 転流インダクタンス  $L_s$  を小さくする。

これらの条件をもとに、基本的な概念設計と理論検討を行なった結果、本方式で 30kA 級の直流遮断装置が十分実現できることが判明した。

## 3 新開発の超伝導コイル保護回路

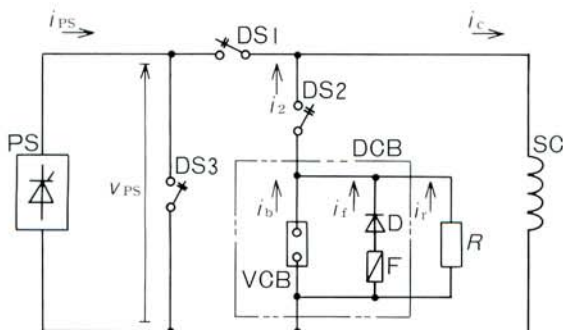
### 3.1 基本構成

新しいヒューズ転流遮断方式の直流遮断器(DCB)を適用した超伝導コイルの保護回路を図5に示す。基本定格は、LHDの最大級のコイルに適用できるように設定した。

図5に示す電源・保護システムを開発する上で、最も問題となるのがDCB部分であり、これについては実験レベルでの実験検証が必要である。

他の部分においても、重要な要素については別途、要素開発を行なった。断路器(DS1~DS3)は電解炉に用いられている大電流断路器が適用できるが、高速動作を必要とするため、駆動部を電動機からエアシリンダに変更したものを試作し、実験検証を実施した。

また、電源を含めた全体システムの制御動作については、電流定格を低減した1/100モデルシステムを試作し、良好な動作検証結果を得ている。



PS : 直流電源 (サイリスタ式) DS1~3 : 断路器  
 R : 保護抵抗 SC : 超伝導コイル  
 DCB : 直流遮断器  
 (VCB : 真空遮断器 F : 限流ヒューズ)  
 D : 分流阻止ダイオード

図5/新開発の超伝導コイル保護回路

Fig.5/Newly-developed protection circuit for superconducting coils

### 3.2 基本動作

図5の回路は、図1の回路と異なりDCB部分には常時電流を流さない構成としている。これは、常時30kAもの大電流を通電可能なVCBが存在しないという理由による。このため、遮断動作時には電流を電源側からDCB側に転流させ、その後DCBで遮断するという方式になっている。

その動作タイムチャートを図6に示す。

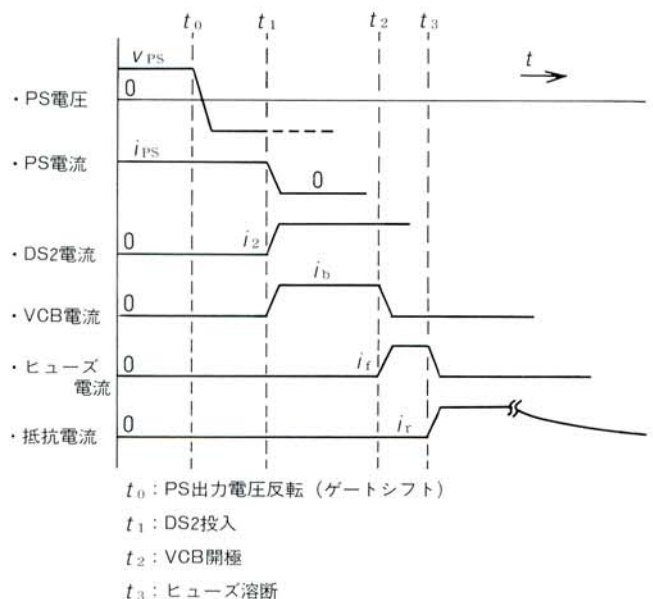
まず、時刻  $t_0$  で PS の出力電圧を反転させ、 $t_1$  で DS 2 を投入すると (VCB は予め投入されている)、PS の出力電圧を転流起電力として、電流は DCB 側に転流する。PS 電流が零になると同時に DS 1 電流も零となるので、 $t_1$  以後に DS 1 を開極する。これで、電源 PS と負荷側が分離される。

次に  $t_2$  で VCB を開極すると、後は自動的に、電流は、VCB から F、F から R へと転流する。

時刻  $t_3$  で DCB の両端は 2 kV 程度 (コイル電流と抵抗の積) の電圧が発生するが、電源 PS は DS 1 で分離されており、PS には過電圧は印加されない。

$t_0$  から  $t_3$  までの動作は 0.5 秒以内に行なわれる。この時間は、 $t_3$  以降の電流減衰時定数が 20 秒程度であることを考えれば、十分短い時間といえる。

なお、電源 PS の異常時には、交流電源遮断と DS 3 短絡を同時に行なうことによりコイル電流を PS から DS 3 に移して、電源 PS を停止させるようにしている。その後、クエンチが発生した場合は前述同様の保護動作を行なうが、この場合は電源 PS の電圧反転による転流ができないので、DS 1 のアーク電圧で転流を行なうことになる。



$t_0$  : PS出力電圧反転 (ゲートシフト)  
 $t_1$  : DS2投入  
 $t_2$  : VCB開極  
 $t_3$  : ヒューズ溶断

図6/保護動作タイムチャート

Fig.6/Time chart of protection operation

このためDS1の接点は損傷を受けるが、この断路器には、主電流を常時通電する接点とは別に特別なアーキング接点を設けて、その接点のみをメンテナンスする構造を採用している。

### 3.3 新しい保護回路の特徴

本保護回路は、従来のコンデンサ転流方式に比して経済的であることが最も大きな特長である。しかし、本方式に特有な欠点もあるので、次にその利点と欠点を挙げる。

#### (1) 利点

- ・安価な汎用 VCB (3 kV, 6 kV用) が適用できる。
- ・安価な汎用高圧限流ヒューズ (3 kV, 400A程度) が適用できる。
- ・VCB の開極指令のみで、後の転流動作は自動的にこなわれ、特別なタイミング制御は不要。
- ・VCB およびヒューズは、常時、通電されていないので、通電電流による劣化は無い。

#### (2) 欠点

- ・遮断動作毎にヒューズの取替が必要。
- ・小電流時に遮断時間が長くなる (ヒューズの溶断特性による)。
- ・遮断電流の下限がある (ヒューズの最小溶断電流による)。

しかし、これらの欠点も、超伝導コイルのクエンチ保護を目的とした用途に適用する場合には、さしたる障害とはならない。すなわちクエンチ発生は非常に稀であり、一旦クエンチ保護動作を行なった後にすぐに再通電することはないので、ヒューズ交換は特に問題にならない。また、小電流時のクエンチは更に稀にしか発生せず、蓄積エネルギーも小さい (電流の2乗に比例) ので、直流電源の回生運転などで対処可能である。

## 4 転流と溶断の理論検討

本方式の直流遮断の要であるヒューズへの転流とヒューズの溶断については、2.2(4)で概要を述べたが、ここでは詳細な検討を行なう。

### 4.1 VCBからヒューズへの転流

#### (1) 等価回路

前出図5に示すDCB部分において、VCBが開極し、電流がヒューズに転流する過程の等価回路を図7に示す。

#### (2) 分流阻止ダイオード

VCBの開極前は、 $V_2 = 0$  であるので、分流阻止ダイオードを挿入しておかないと  $V_1 = 0$  になり、VCBの開極前に主電流がヒューズに分流してしまう。

したがって、

$$V_1 = nV_d > I_0 R_2 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$n$ : ダイオードの直列数

$V_d$ : 1素子の順方向降下電圧 (0.7V)

となるように  $n$  を選ぶ。

また、ダイオードの容量は、

$$\text{ダイオードの } I^2 t > \text{ヒューズの全遮断 } I^2 t \dots\dots\dots (4)$$

となるように選定する。

#### (3) 転流時間 $t_c$

転流は  $i_1 = 0$ ,  $i_2 = I_0$  で開始し、 $i_1 = I_0$ ,  $i_2 = 0$  で終了する。 $i_2 = 0$  時点で VCB は瞬時に絶縁回復する。再起電圧は  $[V_1 + R_1 I_0]$  であり、もともとアーク電圧よりも低い値 (数10V程度) であるので再点弧する心配は全くない。

転流過程の電流は、VCB開極時を  $t = 0$  としてヒューズ電流  $i_1$  に着目すると、

$$i_1 = I_m (1 - e^{-t/\tau}) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$I_m = \frac{V_2 - V_1 + R_2 I_0}{R_1 + R_2}$$

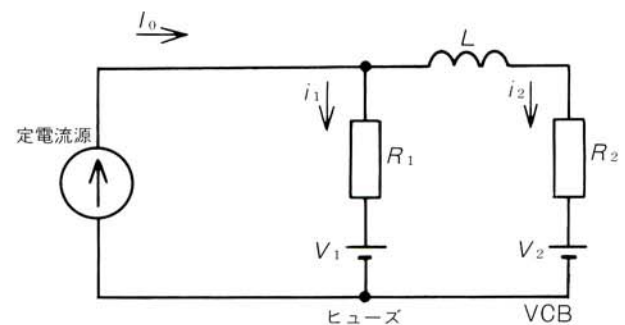
$$\tau = \frac{L}{R_1 + R_2}$$

となる。 $i_1 = I_0$  で転流完了であるので、転流時間  $t_c$  は(5)式から、

$$t_c = -\tau \log(1 - \frac{I_0}{I_m}) \dots\dots\dots (6)$$

で求められる。

実際には、アーク電圧  $V_1$  とヒューズ抵抗  $R_1$  は転流中に変化するので、正確に  $t_c$  を求めるには計算機によらなければならない。しかし、アーク電圧自体が正確に計算では求められないので、実用的には(6)式で十分である。



- $I_0$ : 負荷電流 (定電流)
- $L$ : 転流インダクタンス (VCB-Fループ)
- $i_1$ : ヒューズ電流  $i_2$ : VCB電流
- $V_1$ : ダイオードの順方向降下電圧
- $V_2$ : VCBのアーク電圧
- $R_1$ : ヒューズ抵抗  $R_2$ : VCB回路抵抗

図7/VCBからヒューズへの転流等価回路

Fig.7/Equivalent circuit for commutation from VCB to fuse

$t_c$ を短くするには、転流インダクタンス  $L$  を小さくし、アーク電圧  $V_2$  を大きくすることが必要である。 $L$  は、汎用の VCB の形状他の構造的制限から  $2 \sim 3 \mu\text{H}$  が限度である。

#### (4) VCB のアーク電圧の増大化

汎用 VCB の開極速度は、平均  $1 \text{ mm/ms}$  程度である<sup>6)</sup>。しかし、開極直後の速度は更に遅く、開極後  $2 \text{ ms}$  後では、せいぜい  $1 \text{ mm}$  程度の開極距離しかなく、アーク電圧も低い値にとどまっている。通常、VCB のアーク電圧が  $20 \sim 40 \text{ V}$  といわれているのは、極間距離が十分ある場合であって、本例のように距離が小さい時点では、アーク抵抗分はほぼ零であり、アーク電圧は陰極降下電圧のみと考えられる。銅電極の陰極降下電圧すなわち最小アーク電圧は  $12 \text{ V} \sim 13 \text{ V}$  であり<sup>7)</sup>、その値は接点間距離や電流値によらず一定である。このため、その電圧は、接点が開極すると瞬時 ( $\mu\text{s}$  オーダ) に発生するという特徴がある。

汎用の VCB は 3 相構成であり、各相間の開極時間のバラツキが  $1 \text{ ms}$  以下であることに着目し、本装置においては 3 相分を直列に接続し、アーク電圧を 3 倍にする方策を採ることにした。これによりアーク電圧  $V_2$  は  $40 \text{ V}$  程度になると予想される。転流回路の設計定数とこのアーク電圧から(5)式、(6)式により計算すると、転流時間  $t_c$  は  $2 \text{ ms}$  以下になり、短時間転流の実現が可能となる。

## 4.2 ヒューズの溶断

### (1) ヒューズの動作責務

ヒューズの動作責務は、2.2(4)で述べたように、

- ① VCB から F への転流途中に溶断発弧しないこと、
- ② 保護抵抗に転流可能なアーク電圧を発生すること、

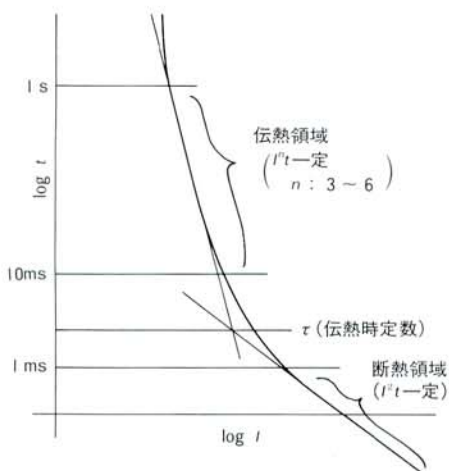


図8/ヒューズの溶断特性の概念図

Fig.8/General prearcing time/current characteristic of a fuse

の二点である。②については AC  $3 \text{ kV}$  級のヒューズを適用すれば問題ないが、①の責務については十分な検討が必要である。

汎用の高圧限流ヒューズの溶断特性については  $10 \text{ ms}$  以上の領域しか公表されていない。今回の使用目的では  $1 \text{ ms}$  前後が問題であり独自の検討が必要になる。

### (2) ヒューズの溶断特性

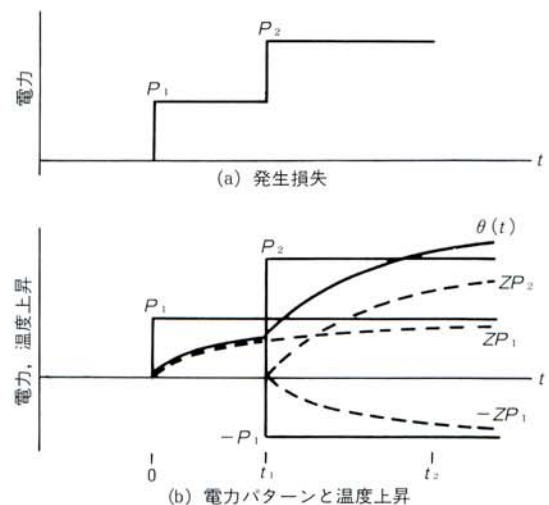
大容量限流ヒューズに用いられるヒューズエレメントは、小容量ヒューズのような均一形状(丸線、リボン)ではなく、多数の溶断個所(エレメントの断面積をその部分のみ小さくしている)を備えて高速限流動作を可能としている。

このため、数  $\text{ms}$  以下の短時間領域(断熱領域)では、溶断個所の温度上昇は、 $I^2t$  に比例すると考えられる。しかし、それ以上の長い時間(伝熱領域)では、溶断個所の発熱はエレメントの他の部分(断面積大の部分)に伝達し、温度上昇は  $I^2t$  による断熱温度上昇よりも低くなる。

この視点からヒューズの溶断特性を見ると、この特性はヒューズエレメントが溶断温度に達する温度上昇特性を示していると考えられ、図8に示すように、断熱領域と伝熱領域とに分けて考えることができる。図8の伝熱領域の電流乗数  $n$  は  $3 \sim 6$  程度である。伝熱領域よりも長時間の領域は、ヒューズエレメントからヒューズボディや電極などへの放熱領域となり、 $n$  は更に増大する。図8に示す断熱領域 ( $I^2t$ ) と伝熱領域 ( $I^n t$ ) とがクロスオーバーする時間が伝熱時定数 ( $\tau$ ) と考えられる。

### (3) エレメントの温度上昇

通常、エレメントの溶断点の温度上昇計算は容易ではない。特に電流波形が問題となる短時間領域の温度上昇計算はユーザー側では不可能といえる。



$$\theta(t_1) = Z(t_1) P_1$$

$$\theta(t_2) = Z(t_2) P_1 - Z(t_2 - t_1) P_1 + Z(t_2 - t_1) P_2$$

図9/過渡熱インピーダンス  $Z(t)$  を用いた温度上昇計算

Fig.9/Temperature rise calculation applying thermal transient impedance  $Z(t)$

しかし、本装置においては、転流時間中にヒューズが溶断するかしないかは、直流遮断が成功するかしないかの根本問題であるので、簡易的な計算方法を考えて温度上昇計算を行なった。

温度上昇計算方法は素材の物理特性から求める方法と、基本となる温度上昇特性データから求めた過渡熱インピーダンスを用いる方法とがある。後者は半導体製品の温度上昇計算に広く使用されている<sup>(8)</sup>。その計算方法は、図9に示すように重ね合せの原理を用いる方法である。これは、入力電力と温度上昇とが線形関係にあることを前提条件にしている。

この方法はヒューズにも適用可能と考えられるが、ヒューズの場合は電力損失  $P$  で考えるよりも、 $I^2t$  で温度上昇を考えた方が理解が容易になる。厳密にはヒューズ抵抗が温度により変化するので、 $I^2t$  で考えると線形関係は崩れてしまうが、ここでは簡易的に  $I^2t$  が入力エネルギーに比例すると考える。そこで、過渡熱インピーダンスの代わりに、新たに過渡熱係数  $C(t)$  を導入する。

ステップ電流に対するエレメント温度上昇  $\theta$  は

$$\theta = C(t) i^2 t \dots\dots\dots (7)$$

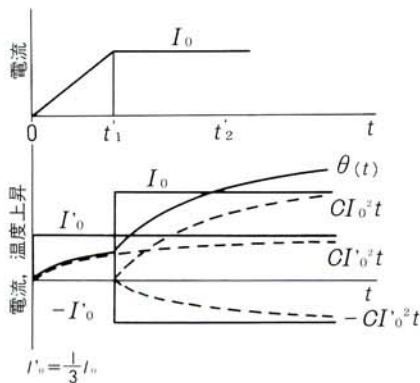
ただし、

$$C(t) : \text{過渡熱係数 } (^\circ\text{C} / \text{A}^2\text{s})$$

で計算することになる。

次に、 $C(t)$  を求める方法であるが、これは図8の溶断特性から逆算して求めることができる。溶断特性は、エレメント(銀)が融点に達するまでの時間-電流特性とみなすことができる。通電開始時の温度を20°C、銀の融点を962°Cとすれば、(7)式で  $\theta = 942^\circ\text{C}$  とした場合が溶断特性といえる。

ヒューズ溶断特性が  $I^2t$  一定の断熱特性と、 $I^n t$  一定の伝熱特性が時定数  $\tau$  でクロスオーバーすると仮定すれば、



$$\theta(t) = C(t_1) I_0^2 t_1$$

$$\theta(t_2) = C(t_2) I_0^2 t_2 - C(t_2 - t_1) I_0^2 (t_2 - t_1) + C(t_2 - t_1) I_0^2 (t_2 - t_1)$$

図10/C(t) による温度上昇計算

Fig.10/Temperature rise calculation applying C(t)

過渡熱係数  $C(t)$  は、

$$C(t) = C_0 \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{t}{\tau} \right)^2} \right\}^{-\alpha} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$C_0$  : 断熱領域の  $C(t)$  で一定値

$$\alpha = 1 - \frac{2}{n} \quad (n \text{ は } I^n t \text{ 特性の } n)$$

で近似できる。

この式は、 $t \ll \tau$  の場合には、

$$C(t) \doteq C_0 \dots\dots\dots (9)$$

となる。また、 $t \gg \tau$  の場合には、 $C(t)$  は、

$$C(t) \doteq C_0 \left( \frac{t}{\tau} \right)^{-\alpha} \dots\dots\dots (10)$$

となり、これを(7)式に代入して、

$$i^n t \doteq \text{一定} \dots\dots\dots (11)$$

の結果を得る。

$C(t)$  が想定できれば、転流時の温度上昇が図10に示す方法で計算できる。この方法で温度上昇を計算し、 $\theta$  が  $942^\circ\text{C}$  になる時間が転流時間に対して余裕があるようにヒューズ選定を行なう。

遮断電流 30kA で転流途中で溶断しないという条件のもとに、検討計算を行なった結果、モータ用の400A (M400) 単体もしくは一般用の400A (G400) の2並列が適用可能であることが判明した。

(4) 溶断特性式

溶断特性式は、(7)式、(8)式から、一本の式で表現でき、

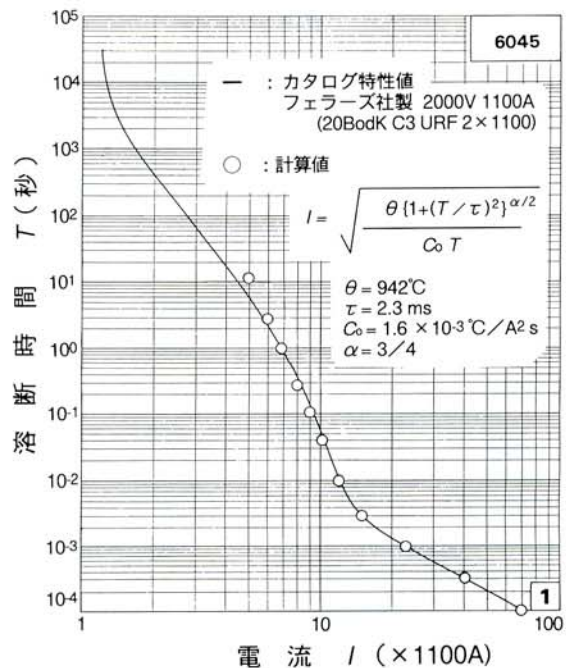


図11/ヒューズの溶断特性と計算値

Fig.11/Prearcing time/current characteristic and its calculation Value

$$I = \sqrt{\frac{\theta \left\{ 1 + \left( \frac{T}{\tau} \right)^2 \right\}^{\frac{\alpha}{2}}}{C_0 T}} \dots\dots\dots (12)$$

$\theta$ : 942°C

$T$ : 溶断時間

となる。

ちなみに、この式を短時間(10ms以下)特性が公表されている半導体保護用ヒューズに適用した例を図11に示す。

この場合は100 $\mu$ s~3秒という広範囲に亘って(12)式とカタログ特性が一致していることが分かる。このことは、(7)式、(8)式による温度上昇計算が概ね妥当であることを示している。

## 5 遮断試験

### 5.1 直流遮断器

試作した直流遮断器を図12に示す。これは図13のDCB部分の回路で構成されている。主な仕様を次に示す。

#### ①装置仕様

- ・ 定格遮断電流 直流30kA
- ・ 定格遮断電圧 3kV
- ・ 操作電源 AC100V
- ・ 電圧測定用分圧器 100 : 1 × 2  
(クランプ回路付) 10 : 1 × 2

#### ②構成部品仕様

- ・ VCB : 7.2kV 2kA RC 31.5kA  
(3極直列接続)



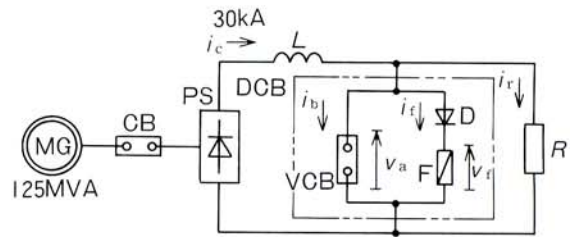
図12/試作直流遮断器  
Fig.12/Proto-type DC breaker

- ・ ダイオード : 200V 3.5kA  
(2S2P接続)
- ・ ヒューズ : 3.6kV M400 × 1  
もしくは  
3.6kV G 400 × 2

### 5.2 試験回路

核融合研のプラズマ実験用の電源設備を用いて直流遮断試験を行なった。試験回路を図13に示す。

本直流遮断器の動作責務は電流を保護抵抗  $R$  に転流させるまでである。したがって、 $R$  に転流後の電流減衰時



- MG : 電動発電機 CB : 交流遮断器
- PS : 直流電源 (40kA 450V)
- L : 2.1mH 5.6m $\Omega$  (40kA)
- R : 95m $\Omega$  (40kA)
- DCB : 試作直流遮断器

図13/直流遮断試験回路  
Fig.13/DC current breaking test circuit

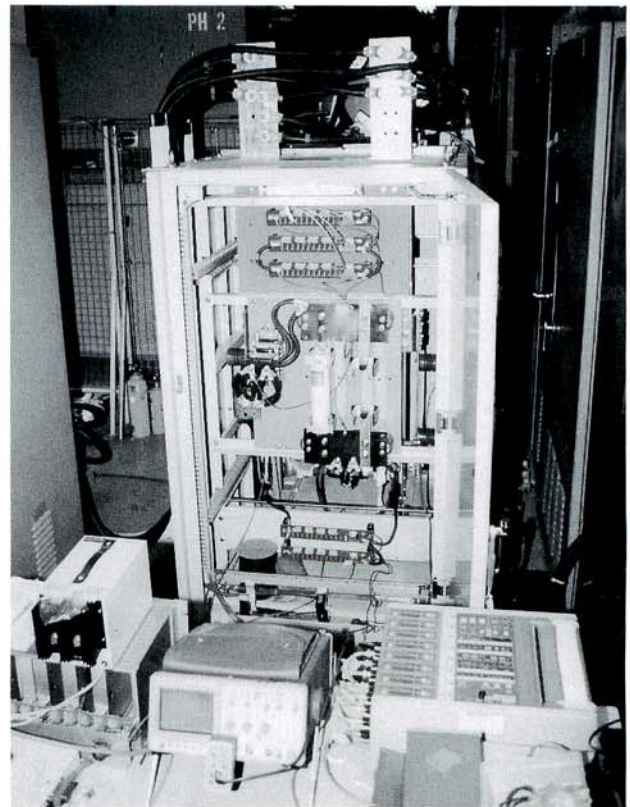


図14/遮断試験風景  
Fig.14/Site test

定数は直流遮断能力とは無関係になり、図13のように超伝導コイルを直流電源と小インダクタンスで置き換えても、直流遮断能力の検証試験としては何ら問題はない。

### 5.3 試験結果

ヒューズの種類、通電電流値を変えて、最大32kAまでの遮断試験を20回以上行なったが、一度も遮断失敗に陥るようなことはなかった。

図14に実験風景を、また図15に32kA遮断時のオシログラムを示す。図15はG400×2並列の場合であるが、VCBからヒューズへの転流時間は約1.5ms、ヒューズ溶断時間は約9msと、十分余裕を持った遮断が実現できている。なお、VCBのアーキ電圧の上昇が階段状になるのは、3極の開極時間の差が原因である。このバラツキの1ms以内であり、溶断時間に比して十分小さいので問題とはならない。また、アーキ電圧は予想通り陰極降下電圧分しか発生せず、3極直列で40V程度であった。

図15から分かるようにヒューズ発弧後のアーキ過電圧は特に見られず、スムーズに保護抵抗に電流が転流している。これは、ヒューズの限流速度 ( $di/dt$ ) が比較的小さく、また保護抵抗回路のインダクタンスも小さいので、転流のための起電力が小さくなっているためと考えられる。このことは、超伝導コイル負荷の過電圧保護を考える上で重要な特性であり、保護装置の責務を軽減させることができる。

図16に、条件を変えて遮断試験を行なった時の、転流

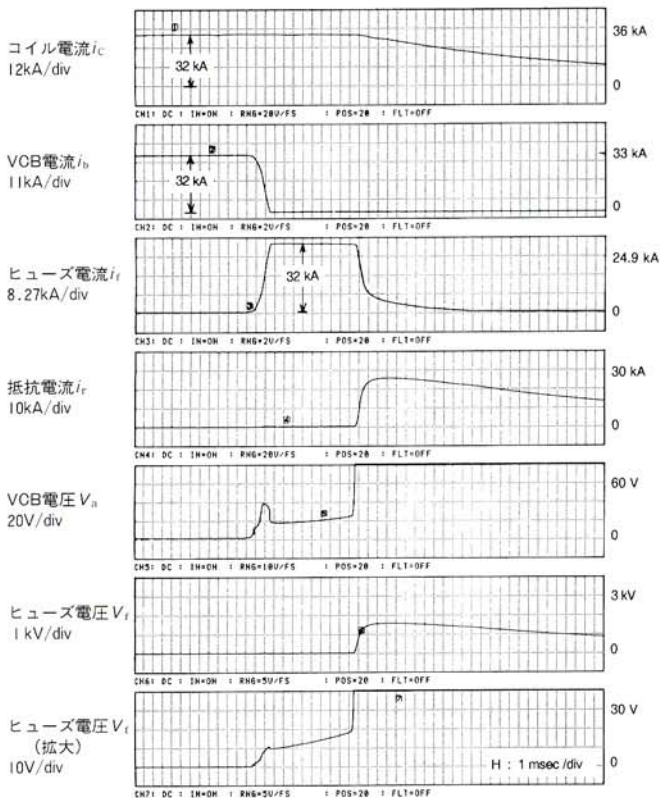
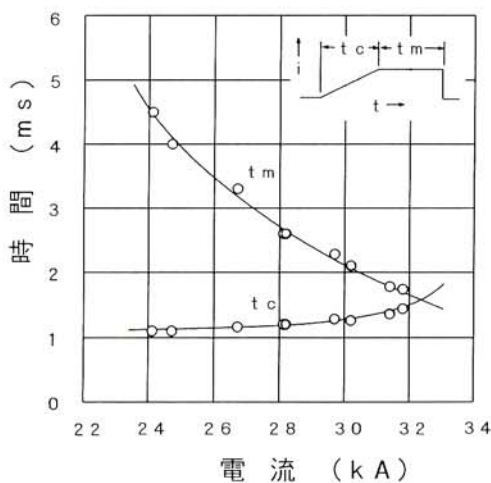
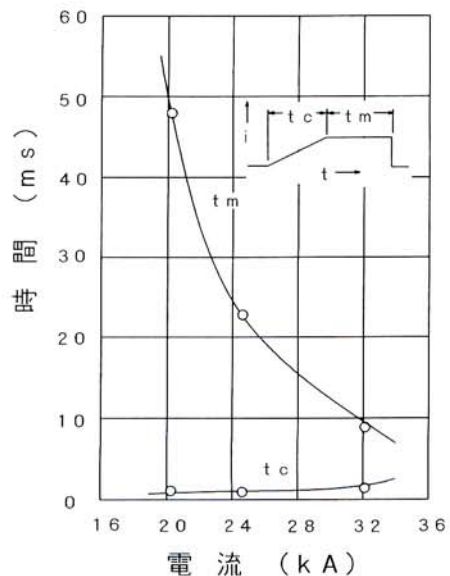


図15/32kA直流遮断オシログラム (G400×2)  
Fig.15/Oscillogram of DC current-breaking (32kA) test



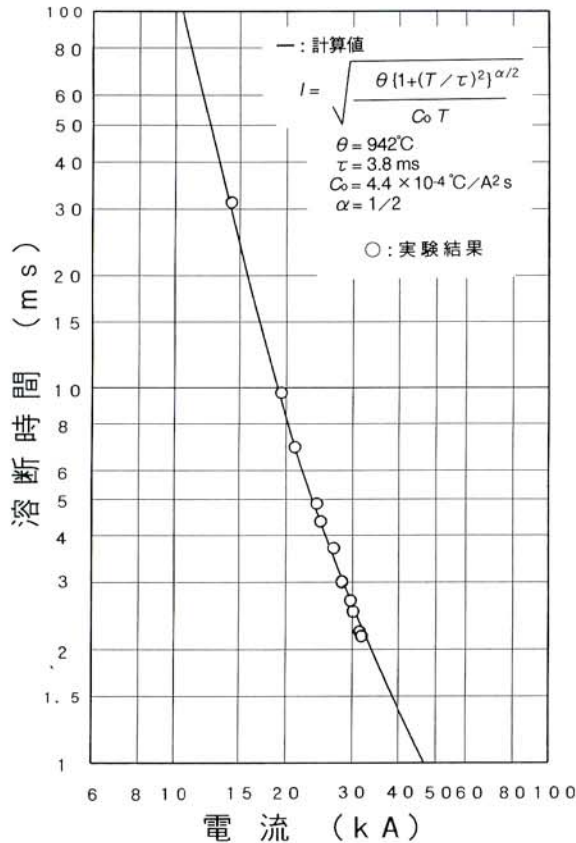
(a) 遮断特性 M400



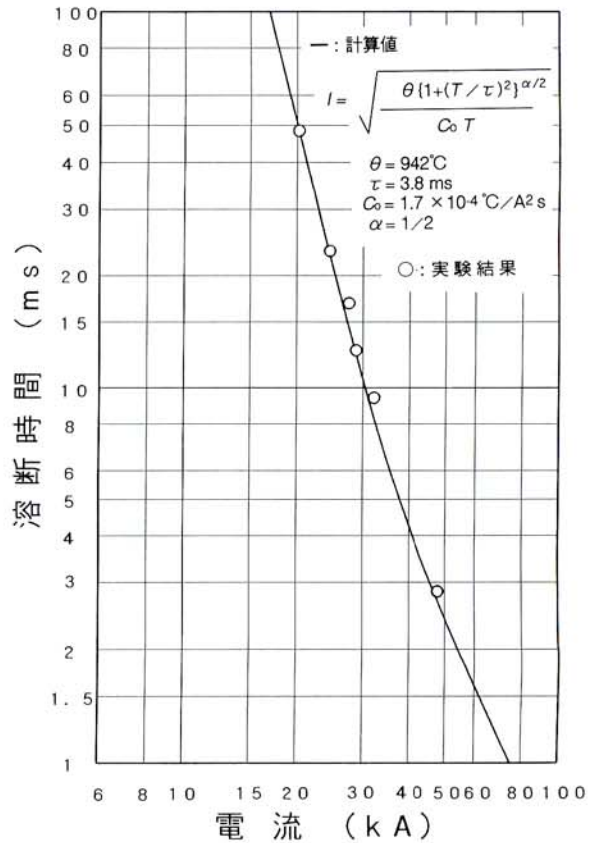
(b) 遮断特性 G400×2

図16/遮断特性試験結果

Fig.16/Test results of current-breaking characteristic



(a) M400 溶断特性



(b) G400×2 溶断特性

図17/ヒューズ溶断特性実験結果

Fig.17/Test results of prearcing time/current characteristics of the fuses

時間( $t_c$ )と溶断時間( $t_m$ )の測定結果を示す。本遮断器の遮断電流限界は  $t_m = 0$  となる電流値である。この結果からは、30kA 遮断において、M400 では  $t_m = 2$  ms, G400×2 では  $t_m = 12$  ms となり、どちらも定格遮断電流 30kA の仕様を満足している。

また、これらの試験後に VCB の電気特性をチェックしたが、特に試験前との差異は認められず、耐用使用回数についても、動作頻度の小さい、超伝導コイルのクエンチ保護には十分適応可能と判断される。本装置に使用した VCB の定格遮断電流は交流 31.5kA (実効値) であるが、この値を短絡電流の直流分を含んだ波高値に換算すれば 50~60kA に相当することになる。また、アークの持続時間も本装置では 1~2 ms と短いので、VCB としては十分余裕をもった使用条件である。このため、接点の損傷は交流の定格遮断時に比べて十分小さく、多数回の使用にも耐えられるものと想定される。

## 5.4 ヒューズの特性評価

遮断試験の結果をヒューズの溶断特性として評価した。その結果を図17に示す。図中の白丸が実験データであり、

曲線が前出(12)式による近似特性である。

(12)式は、ステップ電流による溶断時間の式であるため、図17の溶断時間は前述の  $t_m$  に、転流期間中の  $I^2t$  等価時間を加えた時間にしてある。

10ms 以上の長時間の特性は、カタログ特性をもとにして近似しているので当然ながら計算と実験値は一致しているが、10ms 以下の短時間領域においても両者は良く一致している。このことはヒューズ温度上昇計算が妥当であったと同時に、高圧限流ヒューズの品質が良く特性のバラツキが殆どないことを示している。

ヒューズの規格 (JEC-2330) では溶断特性は電流座標で ±20% が許容偏差と規定されているが、この実験結果から分かるように、実製品はこの許容値をずっと下廻った安定した特性をもっている。したがって、G400 型ヒューズの 2 並列で 30kA 級直流遮断は確実に実行できるといえる。

## 6 あとがき

汎用品を用いた経済的な 30kA 級直流遮断器を開発し、その遮断性能を実証した。

本遮断方式は、ヒューズの取替が必要、小電流では遮断不能という問題点があるが、超伝導コイルのクエンチ保護用途には特に問題とならず、むしろ経済性、遮断動作の信頼性の面では他の遮断方式よりも優れた方式であると考えられる。

現在、当社ではLHD用のポロイダル電源に本遮断方式を適用し、実機的设计・製作中である。

最後に本研究・開発を進めるにあたり、名古屋大学の鬼頭幸生教授、電力中央研究所の稲葉次紀室長には有益な助言をいただき、感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- (1) S.Tanahashi, T.Satoh, et al:「DEVELOPMENT OF A PROTECTION CIRCUIT FOR SUPERCONDUCTING COILS IN THE LARGE HELICAL DEVICE」17th Symposium on Fusion Technology (1992)14-18
- (2) 棚橋, 佐藤, 他:「大型ヘリカル装置の超伝導コイル保護用直流大電流転流回路の開発」プラズマ・核融合学会誌 No.2, Vol.69 (1993)
- (3) 嶋田, 谷, 他:「核融合実験装置用直流しゃ断器の解析と実証試験」電気学会論文誌B No.12, Vol.99(1979)
- (4) ヒューズ常置専門委員会:「限流ヒューズの直流動作について」電気学会技術報告(I) No.132 (1980)
- (5) 真空遮断器の大容量化調査専門委員会:「真空遮断器の大容量化とその基礎技術」電気学会技術報告(II) No.259 (1987)
- (6) 岩原皓一 編:『真空開閉器具と適用の実際』(電気書院, 1975) 80-81
- (7) 電気学会 編:『電気工学ハンドブック』(電気学会, 1988) 216
- (8) サイリスタ・エレクトロニクス編集委員会 編:『サイリスタ装置』(丸善, 1974) 79-100

## 最近公告された愛知出願

### 特許

公告番号	名 称	発 明 者	共同出願人
5-3123	変圧器鉄心の製造方法	矢後 克二	
5-6420	電動機の製造方法	岡田太郎 後藤 武一	
5-6436	ブラシレスモータの駆動制御装置	佐藤 徹	
5-13522	ロータリーソレノイド	山田 智	
5-15286	移動変圧器の検相方法及び検相装置	水野 良勝	
5-17684	電磁石の絶縁構造	升 野 清 俊	
5-17690	静止誘導電気機器の製造方法	矢後 克二	中部電力(株)
5-22463	無停電電源装置	佐藤 徹	
5-24735	永久磁石付回転子	岡田太郎	
5-25371	巻鉄心の巻回装置	廻間 正樹	
5-26427	位相制御装置	佐藤 徹	
5-27356	ブラシレス直流電動機の回転子位置検出装置	太田 久義 渡辺 誠	アイチーエマソン電機(株)
5-27357	ブラシレス直流電動機の回転子位置検出装置	太田 久義 高嶋 修	アイチーエマソン電機(株)
5-30157	3相ブラシレスモータの回転子位置検出装置	太田 久義 高嶋 修	アイチーエマソン電機(株)
5-32884	再生油使用変圧器の除染方法及び除染装置	奥村 顕治 林 幸雄	中部電力(株)
5-34801	中性点接地抵抗装置	神谷 俊郎 内田 哲雄	
5-42295	加熱装置付混合機及びその制御装置	新美 正明 伊藤 利行	
5-50949	電動バチンコ機の打球装置	望月浩一郎 宮島 武秀 土本 僚一	

公告番号	名 称	発 明 者	共同出願人
5-50950	バチンコ機の打球用ソレノイド	宮島 武秀 山田 智	
5-67047	巻鉄心の製造方法	廻間 正樹	
5-67048	鉄心鋼帯の切断装置	矢後 克二 廻間 正樹	中部電力(株)
5-68083	負荷時タップ切換装置の蓄勢機構	横橋 史郎	
5-68953	インバータのパルス幅変調制御方法及びその装置	太田 久義 土本 僚一	アイチーエマソン電機(株)
5-72230	バチンコ機における打球用ソレノイドの制御回路	土本 僚一	
5-80892	シートペーパー自動供給便座	野々村勝巳 山下 直治	東陶機器(株)
5-80893	シートペーパー自動供給便座	太田 久義 山下 直治	東陶機器(株)
5-81122	シートペーパー自動供給便座	山本 修 太田 久義	東陶機器(株)
5-81123	シートペーパー自動供給便座	藤井 庄吉 野々村勝巳	東陶機器(株)
5-81124	シートペーパー自動供給便座	藤井 庄吉 山下 直治	東陶機器(株)
5-81125	シートペーパー自動供給便座	太田 久義 野々村勝巳	東陶機器(株)
5-81126	シートペーパー自動供給便座	山本 修 藤井 庄吉	東陶機器(株)