スローバンク保護素子の破壊駆動力 に関する電磁力解析とその動作特性

正員 長谷川 三雄 (国士舘大学)

正員 井 上 訓一 (指月電機)

正員 上 野 勲 (東京大学大学院)

Analysis for Electromagnetic Force of Driving Force
for Protective Switching Elements on Local Failures
of Large Slow-Capacitor Bank System and its Response

Mitsuo Hasegawa (Kokushikan University)

Kunikazu Inoue (Shizuki Electric Co., Inc.)

Isao Ueno (University of Tokyo)

In various applications of pulsed power technologies, large capacitor bank systems are used to feed high current impulse to different experimental devices. The accidental electric breakdown in one of the capacitors in a parallel connection of the large bank may result in serious damages such as mechanical explosion and oil effusion or fire.

In most fast banks, each unit capacitor has an output gapswitch, resistance or fuse, which is expected to decouple the capacitors one another. However, no such special element is adopted usually in the slow bank system, partly because of the economical consideration.

This paper gives an analysis of driving force for the development of protective switching elements on local failures of large slow capacitor bank system.

キーワード：パルスパワー、スローバンク、破壊保護素子、高圧密閉形高速遮断素子、低インダクタンス短絡スイッチ、電磁駆動力、素子幅依存性、素子厚依存性

1. まえがき

パルスパワー科学技術は、核融合炉、加速器増殖炉など、長期エネルギー資源の開発に極めて重要な分野で、その近年の進展は目覚ましい^{(1)~(10)}。

その周辺装置としてのパルスパワー発生装置、電磁力応用装置、強磁界発生装置、並びに、核融合実験装置などに用いられる衝撃大電流発生装置は、多数個の単位コンデンサを特別なディカップリング素子を用いず、充放電用コンデンサバンク（以後、スローバンクと略記）をコンデンサの並列接続で形成し、その充電蓄積エネルギーを単一負荷

に放電する方式がとられている。この方式の大きな問題点は、バンクを形成しているある単位コンデンサが内部絶縁破壊などによる短絡事故を起こすと、他の正常コンデンサから短絡事故絶縁破壊コンデンサ（以後、破壊コンデンサと略記）へ過大なエネルギーが流入し、その結果コンデンサのケースや碍子を破壊し、油の流出や、その油への引火などの事態を招き、その経済的損失が極めて大きい点にある。

そこで、この方式の問題点を解決するために、小容量の場合は、破壊コンデンサを瞬時に正常コンデンサからヒューズを用いて遮断するか、あるいは、破壊コンデンサを但

インダクタンス回路で短絡するか、コンデンサに直列接続された抵抗により、破壊コンデンサへ流入するエネルギーを抑制するか、などの手法が知られているが、大容量の場合は二次事故の発生が想定され、簡単な構造では実現不可能である。

一方、著者らは誘導性蓄積エネルギーの転送用に、優れた性能を発揮する高圧密閉形高速遮断素子を開発し^{(11)~(13)}、スローバンクの簡単な回路構成から成る、誘導性エネルギー蓄積パルスパワーシステムに於いて、これを活用すると、急峻な変化を伴う種々の電流波形にパルスパワー整形と形成し得ることを示し⁽¹⁴⁾、この方式を応用して、高線返しプラズマフォーカスからの中性子発生用誘導性蓄積エネルギー電源⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾として開発をしてきている。

更に、永年積み重ね、継続し、研究開発をしてきた、誘導性蓄積エネルギー回路で、特に優れた機能を発揮する、高圧密閉形高速遮断素子の原理を活用した、スローバンク用低インダクタンス短絡スイッチである、破壊保護素子の開発を報告してきている^{(17)~(22)}。

本論文は、その破壊保護素子^{(17)~(22)}を開発するにあたり、破壊駆動力の素因子が何であるかを解明し、制御可能な素因子を明確化し、最適設計因子を導出するために、破壊駆動力に関する解析を行ってきた。そこで第一報の本解析論文は紙面の関係より、本解析を成功裏におさめた初期の導入部にあたる、その電磁力解析に対してのみ報告するものであり、そのせん断応力の低下現象を定量的に分析した形状依存性等々、その合理的素子設計については第二報に於いて報告する。

2. 破壊保護素子の必要性和その要求される条件

〈2・1〉 ファーストバンクとスローバンク ファーストバンクは、各単位コンデンサにディカッピング用の抵抗を直列に接続し、並列に充電する。従って、ある単位コンデンサが内部絶縁破壊を起こし、短絡事故を起こせば、破壊コンデンサへ流入するエネルギーは、ディカッピング用の抵抗で消費されるため、原理的に破壊コンデンサへは流入しない。ファーストバンクの高速放電化は、単位コンデンサ毎に、ギャップスイッチ1台を接続することにより、低インダクタンス化を図り、実現化されている。

従って、ファーストバンクの充電中は、ギャップスイッチが各単位コンデンサを分割しているので、ディカッピング用抵抗の熱容量は、単位コンデンサ1台分の充電エネルギー（数kJ相当）分に対して、耐容量性を保持できれば、十分保護が可能となり、経済的である。

他方、スローバンクに対しては、各単位コンデンサにギャップスイッチを接続することは、経済的に難しい。そこで、コンデンサ毎100kJ当りにギャップスイッチ1台を接続するなどの方式を採用している。スローバンクでは、単位コンデンサ毎に各々抵抗を接続すると、エネルギーはその抵抗で消費されるため、負荷に伝送するエネルギー

は、その抵抗に依存して非常に小さくなる。更に、経済性に関して言えることは、抵抗を用いた分割充電方式は、ギャップスイッチ1台に接続する大容量コンデンサ（例えば100kJ）の充電エネルギー相当の耐熱容量を必要とするため、経済的ではない。

従って、スローバンクでは、抵抗を接続しディカッピングする方式を採用することができないため、破壊保護素子の必要性が生じる。

〈2・2〉 破壊保護素子に要求される条件と保護協調

並列接続されている充放電用スローバンクは、特別なディカッピング素子を備えていないので、ある任意の単位コンデンサが内部絶縁破壊を起こし、短絡事故を起こすと、他の正常コンデンサに蓄えられているエネルギーが集中して破壊コンデンサに流れ込み、そのケースや碍子を破壊し、油の流出や、その油への引火など危険な事態を招く。

破壊コンデンサに過大なエネルギーが流入する以前に、これを保護し防止するため、次の対策をとればよい事は知られている。

(1) 破壊コンデンサを他の正常コンデンサから電氣的に遮断する。

(2) 破壊コンデンサを、低インダクタンス回路で短絡する。

(1)項の方式に対する条件は、LCR回路に流れる振動放電電流を、瞬時に遮断する事が要求されるが、電流遮断時にアーク放電による持続放電電流が回路のLに依存して生じるため、簡単な構造では不可能である。そこで、(2)項の方式が焦点化される。

この方式の原理は、破壊コンデンサのケース破壊保護を目的とするので、破壊コンデンサの端子間を低インダクタンス回路で瞬時に短絡する事が要求される。従って、短絡電流はバンク母線や正常コンデンサを流れるため、バンク母線間に働く、電磁機械力によるコンデンサブッシングの破損や、正常コンデンサのリード部爆発などの二次事故の発生が想定される。それ故にスローバンクの保護システムとしては、破壊コンデンサのケース破壊のみならず、短絡事故時の二次事故にも十分留意しなければならない。

そこで、スローバンクの保護システムに要求される条件は、内部絶縁破壊コンデンサのケース破壊保護のみならず、短絡事故に伴う二次的事故的防止に対しても、保護協調をとる事にある。具体的には、次に記述する6項目などを検討し、保護協調のとれたバンクを構成する事が要求される条件となる。

- (1) 単位コンデンサ当たりの充電エネルギー
- (2) バンクの総充電エネルギー
- (3) ケース破壊保護素子の性能
- (4) コンデンサケース非破壊許容注入エネルギー
- (5) スローバンク母線のインダクタンスと機械的強度
- (6) コンデンサリード部の通電容量

3. 破壊駆動力に関する解析

〈3・1〉 破壊保護素子の構造と原理 本節は破壊駆動力に関する解析を行うにあたり、図1は最適な設計素因子を導出するための、その素子の構造と、その動作回路図を示す。破壊保護素子の構造は、金属板端子①、⑦、⑧、⑫に接続されたヒューズ素子②、⑪を絶縁物⑥、⑨で囲い、一對の金属板④と、ねじ⑤によって高压密閉形遮断素子として形成され構成されている。

蓄積されたコンデンサからの正常放電電流は図1の→印で示す経路を流れるため、ヒューズ素子に働く電磁力は吸引力として作用する。従って、金属板に密着している絶縁物、ならびに、ヒューズ素子は、正常放電電流に対しては物理的にも、機械的にも損傷を受けない。そこで、内部絶縁破壊事故を想定し、スローバンクの C_s を短絡すると、その動作原理は次のようになる。

短絡電流は→印で示す経路に流れ、 C_s と C_1 に接続されたヒューズ素子は電磁反発力により図中に於ける上下方向の力を受け、金属板に設けた孔③、⑩へ絶縁物を押し付ける応力を与える。と同時に、短絡電流 I_{sc} 、ならびに、 i_1 によりヒューズ素子は溶断爆破し、その結果、固体のヒューズ素子は高压の金属蒸気に気化され、密閉容器の孔の部分の絶縁物を破壊し、孔から吹き出す。すなわち、金属板端子と絶縁物でおおわれた空間はアークプラズマで充満し、絶縁物の破壊によって④と金属板端子とはアークプラズマの導体で短絡され、導通状態となる。その後、時間的に遅れて流入する i_2 は⑦-④-⑭を通過して放電するので、本素子によって正常コンデンサからの過大なエネルギーが C_s へ流入することを防ぎ、低インダクタンスの短絡スイッチとしての機能を完全に果たすことになる。同様に、 C_1 からの流出電流 i_1 も⑫-④-⑭と流れ、 C_1 の端子間は短絡される。一方、正常コンデンサ C_2 、 C_3 からの流出放電電流は、 C_s に隣接されているため、流出電流の立上りが C_1 の次に速く、かつ、流出電流のピーク値が大きいため、流出電流 I_2 、 I_3 により、ヒューズ素子が溶断爆破し、 I_{sc} 、 i_1 と同様な過程を経て⑬に転流する。この場合、正常放電電流、短絡時の流出電流、並列コンデンサバンクの容量などと、ヒューズ素子の設計⁽²³⁾⁽²⁴⁾による組合せによって、その動作は積極的にさせることも、させないことも可能になる。同図の L は負荷を表す。

〈3・2〉 磁気回路の電磁力解析 本節では、図2(a)と図2(b)に示す閉・開ループ形磁気回路について、外側の固定金具の構造に基づいて発生する電磁力を、 i_1 による磁束を ϕ_1 、 i_2 による磁束を ϕ_2 として解析する。

〈3・2・1〉 閉ループ形磁気回路 図2(a)は、4本のボルトで固定金具を締めつけた場合の閉ループ形磁気回路を示す。 $\phi_1 + \phi_2$ は固定金具と締め付けボルトで出来る閉ループ形磁気回路の磁束を示し、その磁界は固定金具内に閉じ込められる。閉ループは ϕ_1 、 ϕ_2 による誘起電

流が厳密には流れるので、抵抗損失が生じる。磁束はこの分だけ外部に漏れるが、抵抗損失は閉ループが導体であるため小さくなる。従って、外部に漏れる磁束は本解析では無視する。

図3(a)は図2(a)を磁気圧に変換した図で、図中の使用文字を次のように定義する。それぞれの文字は、 ϕ_1 に依存する磁気圧を P_1 、 ϕ_2 に依存する磁気圧を P_2 、 $\phi_1 + \phi_2$ に依存する磁気圧を P_{12} 、 i_1 に依存して銅板

図1 バンク破壊保護素子の構造と動作回路
Fig.1. Structure of protective element and its circuit for response.

図2(a) 閉ループ形
Fig.2(a). A model of closed loop.

図2(b) 開ループ形
Fig.2(b). A model of opened loop.

図2 固定金具の構造と磁気回路
Fig.2. Metallic parts fixed and its magnetic circuit.

製素子に作用する圧力を $P_{12}-P_1$ 、 i_2 に依存して銅板製素子に作用する圧力を $P_{12}-P_2$ 、 Φ_1 による磁界の強さを H_1 、 Φ_2 による磁界の強さを H_2 、 Φ_1 の磁束密度を B_1 、 Φ_2 の磁束密度を B_2 、 $\Phi_1+\Phi_2$ による磁束密度を B_{12} 、銅板製素子の幅(最狭値)を W 、銅板製素子の厚さを t とする。ここで、絶縁物の厚さを d として、 $W \gg d, W \gg t$ と設計条件を整えると(1)式から(10)式が導出される。

$$\oint H_1 ds = \int_{-W}^W H_1 ds$$

$$= 2WH_1 = i_1 \quad [A] \quad \dots\dots (1)$$

$$B_1 = \mu_0 H_1 \quad [T] \quad \dots\dots (2)$$

$$P_1 = B_1^2 / (2\mu_0)$$

$$= 1.602 \times 10^{-8} (i_1 / W)^2$$

$$[kgf/m^2] \quad \dots\dots (3)$$

$$\oint H_2 ds = \int_{-W}^W H_2 ds$$

$$= 2WH_2 = i_2 \quad [A] \quad \dots\dots (4)$$

$$B_2 = \mu_0 H_2 \quad [T] \quad \dots\dots (5)$$

$$P_2 = B_2^2 / (2\mu_0)$$

$$= 1.602 \times 10^{-8} (i_2 / W)^2$$

$$[kgf/m^2] \quad \dots\dots (6)$$

$$B_{12} = (\Phi_1 + \Phi_2) / S \quad [T] \quad \dots\dots (7)$$

$$P_{12} = B_{12}^2 / (2\mu_0)$$

$$= 1.602 \times 10^{-8} \{ (i_1 + i_2) / W \}^2$$

$$[kgf/m^2] \quad \dots\dots (8)$$

$$P_{12}-P_1 = 1.602 \times 10^{-8} (2i_1 i_2 + i_2^2) / W^2$$

$$[kgf/m^2] \quad \dots\dots (9)$$

$$P_{12}-P_2 = 1.602 \times 10^{-8} (i_1^2 + 2i_1 i_2) / W^2$$

$$[kgf/m^2] \quad \dots\dots (10)$$

〈3・2・2〉 開ループ形磁気回路 図2(b)は、絶縁ハットを用いたボルトで固定金具を締め付けた場合の開ループ形磁気回路を示す。開ループ形磁気回路をつくらなように、締め付けボルトと固定金具を絶縁すると、 Φ_1 と Φ_2 は無限空間に分布する。

図3(b)は図2(b)を磁気圧に変換した図で、 Φ_1 による磁界は無限空間に分布するので、面積 S の周回積分は $S=\infty$ となる。 Φ_1 による磁気圧を P_1 、 Φ_2 による磁気圧を P_2 、 $\Phi_1+\Phi_2$ による磁気圧を P_{12} とすると、 P_{12} は i_1 側と i_2 側で等しい値をとるので、それぞれ(11)式から(15)式で示される。

$$B_1 = \Phi_2 / S \approx 0 \quad \dots\dots (11)$$

$$P_1 \approx 0 \quad \dots\dots (12)$$

$$B_2 = \Phi_1 / S \approx 0 \quad \dots\dots (13)$$

$$P_2 \approx 0 \quad \dots\dots (14)$$

$$P_{12} = 1.602 \times 10^{-8} \{ (i_1 + i_2) / W \}^2$$

$$[kgf/m^2] \quad \dots\dots (15)$$

図3(b)に示す開ループと銅板製素子の間には i_1 、 i_2 による磁束が分布しているが、この磁束は閉じ込められずに無限空間に分布するので、その磁束密度は非常に小さな値となる。従って、 $P_1 = P_2 \approx 0$ とした。

〈3・3〉 せん断応力の解析 本節は、前節で解析された磁気圧に依存する、せん断応力に関して解析する。

磁気圧を P 、圧力抜き用穴の直径を D 、駆動用銅板製素子の厚さを t とすると、本論文で使用する銅板はJIS規格でDCuP1・1/2Hを用いているので、そのせん断破壊応力 τ_0 は、引張り強さが $25[kgf/mm^2]$ よりも大きいという関係式より、本論文では $\tau_0 = 20[kgf/mm^2]$ と設定する。銅板での引張り強さはせん断応力にほぼ等しいとみなされている。

図4に示す圧力抜き用穴の周縁のせん断応力 τ は(16)式で求まる。

$$\tau = \frac{\pi P D^2}{4 \pi D t} = \frac{PD}{4t} [kgf/mm^2] \quad \dots\dots (16)$$

そこで、 $\tau > \tau_0$ の条件を満たす場合、銅板製素子は電磁力に依存したせん断応力によって破壊されて圧力抜き用穴より突出し、銅板製素子は固定金具と接触し、アースへの短絡回路を構成する。

〈3・3・1〉 発生せん断応力の電流依存性 3・2節で求めた発生電磁力による磁気圧は、銅板製素子のせん断応力として作用する。図5は $i = i_1 = i_2$ の条件で、閉・開ループ回路に対する銅板製素子の幅 W をパラメータとした場合の、発生電磁力 P の電流 i 依存性を示した図である。ここでパラメータ W 値は10、15、20、25、30[mm]とし、使用した計算式は閉ループ回路に対し

図3(a) 閉ループ形

Fig.3(a). A model of closed loop.

図3(b) 開ループ形

Fig.3(b). A model of opened loop.

図3 磁気圧変換図

Fig.3. Conversion of magnetic pressure.

ては(9)式と(10)式を、開ループ回路に対しては(15)式を用いた。

〈3・3・2〉発生せん断応力の素材厚依存性 図6から図9は、銅板製素子の厚さ t をパラメータとして0.20、0.25、0.30、0.35、0.40 [mm]と設定し、(16)式で記述している発生せん断応力 τ の電流 i 依存性を示している。

図6は W 値を10、 D 値を8とする閉ループ形回路に対する τ の i 依存性を、図7は同条件での開ループ形回路に対する τ の i 依存性をそれぞれ示す。同様に、図8は W 値を15、 D 値を10とする閉ループ形を示し、図9は同条件での開ループ形を示す。

図6から図9が示すグラフの意味は、 W 値と D 値を設定した場合に、その銅板製素子を破壊するのに必要な、銅板製素子の厚さ t に依存する発生せん断応力 τ の電流 i 依存

図4 銅板製素子に作用する磁気圧モデル

Fig.4. Magnetic pressure model for copper plate.

図5 発生電磁力の電流依存性

Fig.5. Generation of electromagnetic force depend on current.

図6 発生せん断応力の電流依存性(閉ループ形)

Fig.6. Generation of shearing stress depend on current for closed loop model.

性に従う、その閾値を示している。

〈3・4〉素子形状依存性による設計値の最適化

図10は、電磁力による磁気圧によって銅板製素子が破壊する電流 i を、3・3節でグラフ化した図6から図9を用いて、 τ_0 (≈ 20) と τ との交点より求め、その動作駆動閾値電流 i_s と素子厚 t との関係を示している。

グラフ化された図10の意図は、最適素子形状とその最適化パラメータ値をメニュー化して、容易さを求め、マニュアル化したものを示す。即ち、閉ループ形および開ループ形に於ける破壊保護素子の動作電流値から、ヒューズ素子の形状、パラメータである銅板製素子の幅 W 値、その素子厚 t 値、圧力抜き用穴の直径 D 値等の最適設計値を正確に、精度を高めた値の選択決定に対して、容易さのマニュアル化を可能にした。

図7 発生せん断応力の電流依存性(開ループ形)

Fig.7. Generation of shearing stress depend on current for opened loop model.

図8 発生せん断応力の電流依存性(閉ループ形)

Fig.8. Generation of shearing stress depend on current for closed loop model.

図9 発生せん断応力の電流依存性(開ループ形)

Fig.9. Generation of shearing stress depend on current for opened loop model.

本実験は構造が単純で発生電磁力の小さい、閉ループ形優先的に実験・検証した。更に、機能的により大きな発生電磁力を必要とする場合は、開ループ形での追実験を行うこととした。

実験は動作電流 $i_1 = 15 \text{ kA}$ 、 $i_2 = 74 \text{ kA}$ を設定し、 W 値を30、20、10とし、 t 値を0.20、0.25とする銅板製素子を試作し、実証試験を行った。

〈4・1〉 実験装置

〈4・1・1〉 基本回路 図11は動作試験に用い

るバンク事故時の模擬回路図を示す。動作試験は回路素子として次の値を用いた。

C : 1.6 mF、5 kV 充電、充電エネルギー
= 20 kJ

図10 動作駆動閾値電流の素子厚依存性
Fig.10. Response of driving threshold current
depend on thick of element.

L_{ext} : 外部インダクタンス = $1.4 \mu H$

L_1 : 正常コンデンサ側電流 i_1 限流インダクタンス
 $= 11.9 \mu\text{H}$

L_2 : 破壊コンデンサ流入電流 i_2 限流インダクタンス
 $= 1.4 \mu\text{H}$

L_0 :破壊コンデンサ残留インダクタンス(模擬)
 $=1.0\mu\text{H}$

L_0 : 事故電流転流回路インダクタンス (模擬)
 $= 0.1 \mu\text{H}$

積分器：入力インピーダンス=50Ω、C=15nF、
R=100kΩ

動作試験は、電源用コンデンサCに充電電源より直流充電を行い、イグナイトロンを用いたスタートスイッチ（StIg）と、放電電流最大値で投入されるクローバスイッチ（CrIg）を、高速度シーケンス制御盤（H. S. S. C）でイグナイトロン点弧用パルス発生器（PG）を制御し、単極性の高電流パルス電流を得る方法を用いた。波形観測に用いたオシロスコープのトリガタイミングもH. S. S. Cを用い、最適なタイミングの設定が可能な方式とした。

(4・1・2) 測定 銅板製素子の動作試験は、図11に示す模擬回路を用い、同一の保護装置に接続しているコンデンサから流出する電流を i_1 、破壊コンデンサに流入する電流を i_2 として行った。 i_1 、 i_2 は回路定数と充電電圧によって定まるため、動作しないダミーの銅板製素子を接続して、それぞれ予め実測した15 kA、74 kAに設定し、同一条件で銅板製素子の動作試験を繰り返し行った。

動作の検出は、事故電流の転流回路インダクタンス L に流れるアース電流を、ログスキーコイルで検出し、動作検出信号とした。

図 11 動作試験模擬回路
Fig.11. Sham examination circuit for response.

〈4・2〉 測定結果 表1は4・1節で準備された模擬回路を用いて、銅板製素子の形状と、 i_1 と i_2 依存性を動作時の半値幅、動作時間、動作検出信号のオシログラフの波形と、ロゴスキーコイルに流れる電流波形 i を測定し、その結果を示す。半値幅 (Th) の定義は、電流 i_2 の立上りから最大値を経て、最大値の $1/2$ に至るまでの時間とした。動作時間 (Tm) の定義は、電流 i の立上りから、動作検出信号の立下りまでの時間とした。

図12はW値を10、t値を0.25に設定した銅板製素子の動作後に於ける i_2 側の分解写真を示している。

〈4・2・1〉 銅板製素子幅依存性 通電電流に依存する素子の動作閾値は、W値に依存して変化し、その動作閾値感度は、W値が小さい程、高くなることが確認

され、理論的数値計算によって求めた結果と一致をみた。

$W=20$ 、 $t=0.20$ の銅板製素子に対しては、理論的には不動作であるが、実証試験では動作閾値時間 $260\mu\text{S}$ で動作している。

表1に示す $W=30$ 、 $t=0.20$ の試験結果に着目すると、 $i_1=15\text{kA}$ 、 $i_2=74\text{kA}$ では理論的数値計算どおりであったが、実験結果を分解して調査すると、 $i_1 (=15\text{kA})$ 側の銅板製素子は電磁力による変形 (押し出し) が認められず、 $i_2 (=74\text{kA})$ 側は孔に向かって押し出されて変形していることが分かった。そこで、電磁力による押し出しは原理的に i_1 側、 i_2 側とも同じ圧力で作用すべきであるが、電流の大きい i_2 側のみが変形していたことを考慮すると、電流による銅板製素子の局

表1 実証試験結果
Table 1. Results of examination.

銅板製素子形状	電流 i_1 [kA]	電流 i_2 [kA]	半値幅 Th [μS]	動作時間 Tm [μS]	オシログラフ写真 上: 動作検出信号 5V/div 200 μS /div 下: 電流 i 40kA/div 200 μS /div
15	74	~400	動作せず	分解調査の結果: i_1 側の銅板製素子は押し出された形跡がなかった。 i_2 側の銅板製素子は押し出されて変形していた。
15	74	~400	260

15	74	~400	120

15	74	~400	120

部的温度上昇に起因する、銅板の機械的強度（せん断応力）の低下が、電磁力以上に寄与していると推定される。

〈4・2・2〉 銅板製素子厚依存性 素子の幅の W 値を10に設定し、その厚さ t 値をパラメータに0.20と0.25とした実証試験を行った。理論的数値で示した図10からの動作閾値時間では、素子の厚さ $t=0.25$ [mm]の厚い素子の方が長くなるが、表1に示す実証試験結果では $t=0.20$ と $t=0.25$ の動作閾値時間は、何れも同じ値の $120\mu\text{S}$ を示し違いを生じなかった。

動作閾値時間は、電磁力が動作を支配するならば、 $t=0.20$ の方が $t=0.25$ に比べて短くなるが、試験結果では有意差が認められなかったことから、動作閾値時間には銅板製素子の局部的温度上昇によるせん断応力の低下が、大きく寄与していると推定される。

〈4・2・3〉 閉ループ形の選定 本実験での閉ループ形選定の理由は、開ループ形に比較して、電磁力の動作特性に与える影響力が小さくないと想定されるが、構造が単純で、部品点数も少なく、開ループ形に比べ、より合理的で、経済的により廉価に提供できると考え、閉ループ形に於ける実験調査を選定した。

〈4・3〉 結果 実証試験結果から銅板製素子の動作閾値時間は、銅板製素子の形状を示す銅板製素子の幅 W 値と、その厚さ t 値に依存することが確認できた。

W 値を20 [mm]、 t 値を0.20 [mm]に設定した銅板製素子は、理論的には不動作であるが、実証試験では動作閾値時間 $260\mu\text{S}$ で動作している。

t 値に依存する動作閾値時間は、理論的に厚い素子の方が長くなるが、 W 値を10 [mm]に設定し、 t 値を0.20 [mm]と0.25 [mm]とした実証試験では、何れも同じ値の $120\mu\text{S}$ の動作閾値時間を示し違いを生じなかった。

保護素子としての銅板製素子の動作メカニズムを、本調査結果から考察してみると、保護素子の破壊駆動力は、電磁駆動力だけでは十分でなく、その形状に依存した銅板製素子の局部的温度上昇（せん断応力の低下）が伴うことが

W=10 t=0.25
図12 動作後の i_z 側分解写真

Fig.12. Disassembly picture on i_z side after response examination.

起因していると考え、無理がなく理解できる。そこで、その動作機能は理論的計算値より小さな電磁力で変形させ、抵抗値の上昇に伴う発熱量の増大により、最終的には溶断現象を伴う動作に至ると理解する方がエネルギー効率も良く、スローバンクを正確に保護すると結果が得られた。

5. 結論

銅板製素子の形状を示す銅板製素子の幅 W 値と、その厚さ t 値をパラメータとして、電磁力解析を行うことから、スローバンク用事故発生時の破壊保護素子の動作時に於ける、銅板製素子の形状の最適化と、そのマニュアル化を図る知見を得た。

即ち、素子開発に対する理論的組立の妥当性を実証試験で検証し、動作電流による銅板製素子の最適化の設計を可能にし、図1に示したスローバンク用破壊保護素子の実用化を裏付けし、マニュアル化により廉価にスローバンクの大型に対する安心と安全性管理への実用化への発展をもたらした。

そこで次報に於いて著者等は、今回の実験により得られた銅板製素子の温度上昇に起因する、せん断応力の低下現象を定量的に分析した、より合理的な素子設計に関して報告する。

（平成9年12月25日受付、平成11年2月15日再受付）

文 献

- (1) 上野：「パルスパワー技術の開発とその将来（第1部）核融合」、エネルギー・資源、5、頁16-25（昭59-1）
- (2) 上野：「パルスパワー技術の開発とその将来（第2部）加速器増殖炉」、エネルギー・資源、5、頁103-110（昭59-3）
- (3) 上野：「パルスパワー科学技術の開発とその将来（I）（高輝度加速器に関するNATO高等専門家会議）」、エネルギー・資源、8、頁119-124（昭62-3）
- (4) 上野、他：「パルスパワー科学技術の開発とその将来（II）（液体状態とその電気特性に関するNATO専門家会議）」、エネルギー・資源、9、頁132-137（昭63-3）
- (5) 上野・井上、他：「特集 パルスパワー（その制御と関連現象）」、エネルギー・資源、13、頁25-62（平4-7）
- (6) A.Guenther, M.Kristiansen, et.al.: "Opening Switches", Advances in Pulsed Power Technology, Vol.1, Plenum(1987)
- (7) A.Guenther, M.Kristiansen, et.al.: "Gas Discharge Closing Switches", Advances in Pulsed Power Technology, Vol.2, Plenum(1990)

- (8) 原・秋山:「高電圧パルスパワー工学」、森北出版(1991)
- (9) 京都ハイパワーテクノロジー研究会:「パルスパワー工学の基礎と応用～プラズマ・レーザ・粒子ビーム・X線の発生と応用～」、近代科学社(1992)
- (10) A.Guenther, et.al.: "J.C.Martin on Pulsed Power", Advances in Pulsed Power Technology, Vol.3, Plenum(1996)
- (11) 上野、他:「誘導性蓄積エネルギー転送用高圧密閉形高速遮断素子の特性と応用」、電学論B、99、頁721-728(昭54-11)
- (12) 田口・上野、他:「けい秒密閉形高速遮断素子の開発」、電学論B、104、頁196(昭59-3)
- (13) 田口・上野:「誘導性蓄積エネルギー転送用密閉形高速遮断素子のアーク消滅媒体依存性」、電学論B、109、頁273-280(平元-6)
- (14) 田口・上野、他:「誘導性エネルギー蓄積パルスパワーシステムの高速度遮断素子制御によるパルス整形と形成」、電学論B、105、頁925-932(昭60-11)
- (15) J.Salge, I.Ueno, et al.: "Sequences of Neutron and X-Ray Flashes During a Long Lasting Current in a Plasma Focus Device", Nuclear Fusion, 18, pp.972-974(1978-7)
- (16) H.Asai and I.Ueno,: "Neutron Source Based on the Repetitive Dense Plasma Focus Model", Nuclear Engineering and Design / Fusion, 7, pp.335-343(1989)
- (17) 長谷川・井上・平井・林・上野:「大電流中低速度コンデンサバンク用破壊保護素子の開発」、電学論D、112、頁1008-1009(平4-10)
- (18) M.Hasegawa, K.Inoue, M.Tanimoto, I.Ueno, T.Hirai, M.Hayashi: "Development of Protective Switching Elements on Local Failures of Large Slow-Capacitor Bank System", Proceeding of 9th IEEE International Pulsed Power Conference, Vol.2, Albuquerque, New Mexico, pp.739-742(1993)
- (19) 長谷川・井上・上野:「スローバンクの大容量化に伴う保護システムとその破壊保護素子」、電学論B、114、頁994-1001(平6-10)
- (20) 長谷川・井上・上野:「スローバンク事故発生時の破壊保護素子の駆動力に関する解析」、電気学会静止器研究会資料、SA-96-45(平8-11)
- (21) 長谷川・井上・上野:「大容量スローバンク故障時の直流大電流遮断ヒューズ新保護方式の提案」、

電気学会静止器研究会資料、SA-97-31(平9-12)

- (22) 井上・長谷川・上野:「大容量コンデンサバンク故障時の油中直流大電流遮断保護方式」、電気学会静止器研究会資料、SA-97-32(平9-12)
- (23) 稲葉:「パイプ形エレメントによる限流ヒューズ通電容量の一向上対策」、電学論B、99、頁125-131(昭54-2)
- (24) 稲葉:「液体窒素中における水平銅線の最小溶断電流とその影響因子」、電学論A、99、頁97-104(昭54-3)

長谷川三雄 (正員) 1951年3月10日生。1976年3月日本大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月国士舘大学教養部助手、1996年4月政経学部教授、現在に至る。1991～1992年テキサス大学オースチン校客員研究員。この間、パルスパワー、環境科学に関する研究に従事。IAWQ、環境技術研究協会等会員。

井上 訓一 (正員) 1947年1月2日生。1974年3月広島工業大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)指月電機製作所入社。同社中央技術研究所長、コンデンサ技術部・システム技術部両部長兼務、製造部長を経て、現在、電力機器システム技術部担当部長。1975～1979年工業技術院電子技術総合研究所出向。この間、大電流制御技術に関する研究に従事。平成元年度オーム技術賞、科学技術長官奨励賞受賞。

上野 勲 (正員) 1938年静岡県生まれ。1966年明治大学大学院修了。独国州立ブラウンシュバイク工科大学、米国州立テキサス工科大学等々の欧米大学、研究所の教授、研究員を経験し、現在東京大学大学院工学系研究科教官。専門分野は地球システム科学(生態系科学、地球環境理工学、エコシステム経済学、エネルギー発生・変換理工学)。工学博士。20世紀業績賞(米国)、功績の20世紀賞(英国)等受賞。アレキサンダー・フォン・フンボルト財団(独国)、国際人名協会(英国)、米国人名研究所等の終身フェロー。そのプロフィールは“Who's Who in the World”、等、英、米国から出版されている15種類以上の全世界を対象とした人名録に登録され、その献呈の辞に記載されている。