UDC 621.316.57.024.1:621.3.014.31

論文

56-B 73

スパイラルアーク方式による転流形直流しゃ断

正員 水野 保 (名古屋大)

正員 長縄 廣司 (名城大)

正員 宮地 巖 (愛知工大)

1. ま え が き

本州・北海道間も昭和54年12月以降、直流で連系されて直流送電もすでに実用期に入っている。今後、系統構成を多様化するため、保護開閉器としての直流しゃ断器の開発が急務とされている。直流しゃ断器の開発が困難な原因として、電流零点を作る必要性、線路や平滑用リアクトルに蓄積された電磁エネルギーの処理およびしゃ断時過電圧の抑制などがあげられる。このうち電流零点を作る方法としては種々の対策が考案されているので⁽¹⁾、主としてエネルギー処理の点が問題となっているものと考えられる。このため、しゃ断時のみリアクトルのインダクタンスを低下させるとか、限流装置を併用することなどが検討されている⁽²⁾。しゃ断器側の対策としては、転流方式の併用などによりしゃ断時に消費されるアークエネルギーを軽減させる方法が採用されている。

スパイラルアーク方式はSF₆ガス中で電極軸と平行に磁界を加え、アークをスパイラル状に引き伸ばすことにより、電源電圧相当にアーク電圧を高め、高電圧、大電流の直流をしゃ断する方式である。従って単独でも顕著な直流しゃ断性能を有するが⁽³⁾⁽⁴⁾、本報告では更にコンデンサ転流を併用した場合について実験的に検討した。しゃ断時に発生するエネルギーの処理対策としてはスパイラルアークの特徴を生かし、全エネルギーをアークエネルギーと転流後コンデンサに充電されるエネルギーとに適当に配分して消費することとした。また、過電圧の抑制については転流用コンデンサの容量増加およびアレスタの併用にも限度が考えられるので、前記エネルギーの配分を考慮した多段転流についても実験を試みた。

2. 直流しゃ断装置の構成

コンデンサ転流方式では、図1のように主しゃ断器CB₁で回路をしゃ断した後、補助しゃ断器CB₂でコンデンサ回路を切り離すことにより、しゃ断が完了する。補助しゃ断器は(a)図のように、主しゃ断器に対して並列に接続する方法と(b)図のように直列に接続する方法とがある。並列形では補助しゃ断器の開極は常に主しゃ断器のしゃ断の後に行なう必要があるが、直列形では両者をほぼ同時に開極すれば、主しゃ断器のしゃ断につれて補助しゃ断器もしゃ断することができる。ここでは直列形を採用し、主しゃ断器としてスパイラルアーク方式、補助しゃ断器には真空しゃ断器を使用した。

3. しゃ断時極間電圧波形

〈3・1〉 実験回路および実験条件 直流短絡試験のための実験回路を図2に示す。電源は1,250kVA

図1 コンデンサ転流回路

Fig. 1. Capacitor-commutating circuits.

図2 実験回路

Fig. 2. Schematic diagram of experimental circuits.

D.C. Interruption by Spiral Arc System with Capacitor Commutation. By Tamotsu Mizuno, Member (Nagoya University), Hiroshi Naganawa, Member (Meijo University), & Iwao Miyachi, Member (Aichi Institute of Technology).

水野 保: 正員, 名古屋大学工学部
長縄廣司: 正員, 名城大学理工学部
宮地 巖: 正員, 愛知工業大学工学部

の短絡発電機を用い、その出力を三相全波整流している。試験電圧は 3kV、回路にそう入したインダクタンスは 12mH で、短絡時の電流を 400A に設定した。消弧室は内径 250mm、長さ 400mm のエポキシ樹脂製で、その外側には励磁用コイル 100 回を巻き回路と直列にそう入した。コイルのインダクタンスは 3.9mH で中心部の磁界の強さは電流 400A のとき 1,100G、消弧室内の SF₆ ガス封入圧力は 10atm である。

〈3・2〉 電極形状 図 3 に示すチューリップ形電極、円筒形電極および電磁反発形電極⁽⁴⁾ (以下反発形電極と略記) の 3 種類についてシャ断実験を試みた。円筒形電極はチューリップ形電極の直径をやや大きくしてアークスポットの移動を容易にしたもので、アークに横方向の変位を与えることにより図 2 の励磁コイルによる磁界と、アーク電流による磁界との相互作用でスパイラルアークの成長を促進させる効果がある。また、反発形電極は図に示すような構造で、発弧アークの電流とこれに近接した下部電極を流れる電流 (図の矢印) とは互いに逆方向となるため、発弧アークに電磁反発力が働き開極初期に発生するアークを電極の外側に押し出すように作用する。発弧アークは通常励磁コイルによる磁界との相互作用で不規則に横方向に広がるためアークのループ短絡の原因となり易いが、反発形電極では発弧アークの形状が整えられてアーク短絡が少なくなるため他の形の電極の場合より容易にスパイラルアークの成長が促進される。3 種類の電極とも閉極時の接触部のかみ合わせは約 10mm で、電極の先端部は耐弧金属 (Cu-W 合金) 張りとした。なお、電極間隔は最大 60mm、平均開極速度は約 2.2m/s (可動電極の動きははじめから 30mm 開極するまで) でこの実験条件ではすべて開極の途中でシャ断が完了する。

図 3 実験に使用した電極

Fig. 3. Different types of electrodes used.

〈3・3〉 極間電圧波形の形式 転流を併用しない場合のスパイラルアーク方式のアーク電圧波形を図 4 のように、A, B, C 形と 3 種類の形式に分類した⁽⁴⁾。すなわち、A 形は細かいアーク短絡を繰り返しながらしだいにアーク電圧が上昇してシャ断される形。B 形は不規則なアーク短絡の繰り返によりアーク電圧の上昇が遅れる形。また、C 形はアーク短絡が比較的少なくアーク電圧がほぼ一様に上昇する形で、アーク電圧上昇率は比較的緩やかであるが、シャ断時間は 3 者のうちで一番短かい特徴がある。

コンデンサ転流を併用した場合の極間電圧 (アーク電圧およびコンデンサ充電電圧) 波形にも同図 (b) のように 3 種類の形状がみられるので、前例にならってそれぞれ A', B', C' 形と呼ぶこととした。

A' 形: 転流がすみやかに行なわれるため、アーク時間が短かくアーク電圧も低い。(b) 図の A' 形, B_a' 形のように転流直前にアーク電圧が零値近傍に低下する傾向がみられる。

B' 形: 不規則なアーク短絡の繰り返により転流が遅れる。

C' 形: アーク電圧波形が C 形となり、アーク電圧がある程度上昇して転流する。従って転流直前にアーク電圧が零値近傍まで低下しない。

これらの形式は実験条件によっては波形に若干の変化がみられる。例えば A' 形では小さなアーク短絡を伴い転流開始が遅れる場合がある。また、B' 形につ

(a) 転流を併用しない場合

(b) 転流を併用した場合

図 4 極間電圧波形の形式

Fig. 4. Typical waveforms of terminal voltage between electrode.

いては A' 形の傾向を示すものと C' 形の傾向を示すものとに分類できるので、それぞれ B_a' 、 B_c' の記号を用いることとした。

〈3.4〉 各形式の発生ひん度 転流を併用した場合の極間電圧波形 A' 、 B' 、 C' 形の発生率は、転流を併用しない場合⁽⁴⁾と同様電極形状により変化する。3種類の電極について転流用コンデンサの容量を $4\mu\text{F}$ および $20\mu\text{F}$ とした場合、同一実験条件で各々 15 回実験を行ない、電圧波形の形式を分類した結果を表 1 に示した。チューリップ形電極では A' 形、反発形電極では C' 形の発生が多く、円筒形はその中間となる。また、転流用コンデンサの容量が $4\mu\text{F}$ と小さい場合は B' 形の発生がやや多いが $20\mu\text{F}$ では B' 形の発生は減少し A' 形が増す傾向がある。このことは転流用コンデンサの容量が大きい場合の方が転流が容易に行なわれることを示している。また、これと同時に A' 形と C' 形の特徴が顕著となり形式の判別が容易となる。

図 5 は表 1 のしゃ断実験で転流用コンデンサに充電された電圧の最大値の発生ひん度を棒グラフで表わしたもので、電極形状ごとにコンデンサ容量 $4\mu\text{F}$ 、 $20\mu\text{F}$

表 1 電極形状と A' 、 B' 、 C' 形電圧波形の発生数
Table 1. Occurring frequency of A' 、 B' and C' types of waveforms related to the electrode configuration.

電極形状	転流用コンデンサ: $4\mu\text{F}$				転流用コンデンサ: $20\mu\text{F}$			
	A'	B_a'	B_c'	C'	A'	B_a'	B_c'	C'
チューリップ形	11	0	2	2	15	0	0	0
円筒形	5	1	2	7	11	0	0	4
反発形	0	0	2	13	3	1	1	10

図 5 転流用コンデンサ充電電圧と発生ひん度

Fig. 5. Maximum charging voltage of commutating capacitor and its frequency of occurrence.

の場合について示した。なお、図中極間電圧波形の A' および B_a' 形は白めき、 C' および B_c' 形は斜線により区別した。このうち B_a' および B_c' 形については図中に付記した。しゃ断時に発生するエネルギーは主としてアークエネルギーとコンデンサの充電に消費される。従って、すみやかに転流が行なわれる A' 形となってしゃ断される場合はアークエネルギーが小さく、転流後コンデンサに蓄積されるエネルギーが大きくなる。 C' 形でしゃ断される場合には逆の関係となるため、充電電圧の値は図のように A' – B_a' 形のグループと C' – B_c' 形のグループに分かれている。

これを電極形状別にみると、 A' 形の発生の多いチューリップ形と円筒形では充電電圧が高く C' 形の発生の多い反発形では低くなっている。また、チューリップ形・円筒形ではコンデンサの容量が大きい方が充電電圧の値にばらつきが少なくなっている。一方、反発形では $4\mu\text{F}$ の場合 A' 形の発生はなかったが、 $20\mu\text{F}$ の場合は転流が容易となるため A' 形が発生し、ばらつきが大きくなっている。

〈3.5〉 コンデンサ容量としゃ断特性 図 2 の回路によるしゃ断実験から、転流用コンデンサ容量に対する充電エネルギーの特性を図 6 に示す。電極はチューリップ形を用いた。図中白丸は A' 形、黒丸は C' 形および B_c' 形電圧波形の場合の測定点である。また、測定値の上限と下限をそれぞれ破線で描きばらつきの範囲を示した。コンデンサの容量を大きくすると充電エネルギーは大きくなるが、増加の割合は減少する傾向にあるので、コンデンサを増しても充電エネルギーを増加させることができず、限度があることを示している。

図 7 は転流用コンデンサ容量に対するしゃ断時間の

図 6 転流用コンデンサ容量と充電エネルギー
Fig. 6. Stored energy of the commutating capacitor.

図 7 転流用コンデンサ容量としゃ断時間
Fig. 7. Interrupting time as a function of capacity of commutating capacitor.

特性である。図中開極開始から消弧までの全しゃ断時間の測定値の上限と下限を破線で示した。また、しゃ断時間のうち転流開始から消弧までの時間（転流後のしゃ断時間）を実線で示した。全しゃ断時間はコンデンサ容量を増すほど短くなっている。全しゃ断時間に比べれば転流後のしゃ断時間は短かく、かつ、ばらつきも少ない。転流用コンデンサの容量が大きくなるほど、全体のしゃ断時間の減少傾向とは逆に転流後のしゃ断時間は増加している。

4. 転流しゃ断過程

〈4.1〉 アーク電圧上昇率と充電電流 消弧室と並列に転流用コンデンサを接続した回路で、転流時のコンデンサ電流を I_{co} 、アーク電圧を V_a とすると、

$$dV_a/dt \geq I_{co}/c \quad (1)$$

の条件のとき転流が行なわれる⁽⁵⁾。図 8 (a)~(c)は前記 3 種類の電極について、転流開始点のアーク電圧上昇率 dV_a/dt と転流時の充電電流 I_{co} の関係を実測したものである。図中測定点のうち A' および B_a' 形の電圧波形のものは白ぬき丸、 C' および B_c' 形のものは黒丸で示し、 B_a' と B_c' 形は測定点に付記した。なお、(1)式のうち等式の関係を実線で描き実測値とのずれを比較すると次の関係がある。

(i) 電圧波形 C' および B_c' 形のものはコンデンサの容量に関係なく実線とよく一致している。従って(1)式の等式の関係によって転流が行なわれていることがわかる。

(ii) A' および B_a' 形のものは、コンデンサ容量

図 8 転流用コンデンサ充電電流とアーク電圧上昇率

Fig. 8. Charging current of the commutating capacitor and the rate of rise of the arc voltage.

20 μ F の場合は実線と一致しているが、容量が小さいほど、また、アーク電圧上昇率の高いものほど実線から離れている。すなわち(1)式の等式の関係より電圧上昇率が高くなって転流が行なわれていることがわかる。

(iii) 転流時のアーク電圧上昇率を電極形状別にみると、チューリップ形は高く、次で円筒形・反筒形の順に低くなる傾向がみられる。

〈4.2〉 転流回路の振動電流 図 9 (a), (b)は転流用コンデンサの充電電流波形と消弧室極間電圧 (図

図 9 A' 形と C' 形の転流波形

Fig. 9. Capacitor current and its terminal voltage during commutation for types A' and C'.

図 10 アーク短絡による振動電流の発生

Fig. 10. Oscillatory current induced by short-circuits of dynamic arc columns.

の分圧器₁による測定)のオシログラムの一例で、極間電圧波形が A' 形および C' 形となった場合のものを選んだ。A' 形の場合は開極から転流開始までの間に(a)図でみられるように充電電流波形に高周波の減衰振動が重畳する。この振動電流は図 10 の矢印で示すようにアーク短絡が繰り返されるさい、配線によるインダクタンスを通して転流用コンデンサの充放電が行なわれることにより発生する。実験結果から回路のインダクタンスは $14.3 \mu\text{H}$ で、振動周波数はコンデンサ容量 $20 \mu\text{F}$ のとき 9.4kHz 、 $4 \mu\text{F}$ のとき 21kHz となった。また、C' 形の場合充電電流波形は図 9(b) のように減衰振動に続いてやや周波数の低い振動に移行し、しだいに振幅を増して転流している。この場合の振動周波数は $2 \sim 6 \text{kHz}$ 、振動の継続時間は $0.7 \sim 4 \text{ms}$ となった。A' 形の場合と比較すると、C' 形となる場合でも発弧初期にはアーク抵抗が低いいため減衰振動となるが、C' 形ではアーク抵抗が比較的高くなるため、アークの負特性により、発振状態となり転流する⁽⁶⁾。このように発振状態から転流した場合には同図(b)のように、その周波数が極間電圧波形に重畳しているのがみられる。

5. しゃ断エネルギーの処理

〈5・1〉 アークエネルギーと充電エネルギー

〈3・4〉節で述べたように、極間電圧波形 A' 形はアーク電圧が比較的低いうちに転流が行なわれるため、転流後コンデンサに充電されるエネルギーが大きく極間電圧は高くなるが、C' 形では A' 形と比べて極間電圧はやや低くなる。ここで実用規模のしゃ断すなわち、大電流をインダクタンスの大きな回路でしゃ断する場合を考えてみる。

無発弧状態で転流する場合には、しゃ断時に発生するエネルギーがすべて転流用コンデンサに充電されるので、これを吸収するためには大容量の高圧コンデンサが必要となり過電圧も大きくなる。一方、アークエネルギーが大きく充電エネルギーが小さい場合には消弧室の容積を大きくする必要があり、いずれも実用上好ましくない。従ってスパイラルアーク方式ではその特性を生かして、しゃ断時に発生するエネルギーをアークエネルギーと転流後の充電エネルギーとに適当に配分して処理することとした。その方法を以下に検討する。

〈5・2〉 直列抵抗と並列抵抗の効果 図 2 の実験回路で、転流用コンデンサ C と抵抗 R_s ($0 \sim 50 \Omega$ ニクロム線) とを直列とし、これを消弧室と並列に接続した回路でしゃ断実験を行なった。転流用コンデンサの容量は $20 \mu\text{F}$ とし電極は反発形を用いた。その他の実験条件は〈3・1〉節の場合と同様である。図 11 は直列抵抗 R_s に対する転流開始時極間電圧の特性を示す。直列抵抗が $0 \sim 10 \Omega$ の範囲では抵抗の変化に対して転流開始電圧は急上昇するが、その後は緩やかな上昇曲線となる。このように直列抵抗をそう入するとアーク

図 11 直列抵抗と転流開始時極間電圧

Fig. 11. Terminal voltage between electrodes at the moment of commutation as a function of series resistance.

図 12 並列抵抗 R_p を接続した場合の極間電圧波形

Fig. 12. Terminal voltage between electrodes with parallel resistance connected.

電圧がある程度上昇した後転流が行なわれるようになる。この場合の極間電圧波形は A' 形の発生はなく、 B' 形または C' 形のみとなる。従って、アーク短絡の発生を伴う B' 形の発生率を少なくし、 C' 形とするためには反発形電極の使用が適している。

転流用コンデンサと並列に抵抗 R_p を接続した場合には、コンデンサに充電された電荷をし断後急速に放電させることができる。図 12 は並列抵抗 R_p を変化した場合の極間電圧波形の一例を示す ($R_s=0$)。並列抵抗を低くするほど転流後のし断時間はやや長引くが波頭が押えられた形状となり、過電圧の抑制効果がみられる。また、し断点の極間電圧(同図矢印)は R_p の値により変化し、 R_p が低いほど低くなり、ついには補助し断器 VCB によるコンデンサ回路の切り離しが不能となる。

ここで主し断器に対して補助し断器の開極を遅らせることを試みたところ、同時開極のときに比べてコンデンサ回路の切り離しが困難となった。すなわちこの実験条件では同時開極の場合 R_p が 44Ω のときにはし断に成功しているが、補助し断器の開極を図 12 のし断点以後まで遅らせると R_p を 170Ω と高くしてもし断できなかった。この原因は直列同時開極方式(実際には間極時間のばらつきを考慮して主し断器のし断点より補助し断器の開極を少し進めてある)では転流により極間電圧が上昇中に補助し断器が開極するため、し断能力が助長されるものと思われる。

〈5・3〉 し断エネルギーの配分 図 13 のモデル実験回路でし断実験を行なった。回路にそう入したインダクタンスは 72.3mH で、閉極時の電流を 450A に設定した。なお、転流用コンデンサ C の容量は 20

図 13 モデル実験回路

Fig. 13. Schematic diagram of model circuit.

図 14 直列抵抗とし断時のエネルギー

Fig. 14. Energy distribution during interruption as a function of series resistance.

μF で、電極は反発形を使用した。その他の実験条件は〈3・1〉節の場合と同様である。同図に示す分圧器、分流器の出力を長時間記録ブラウン管オシログラフで記録し、各時刻の電圧、電流値の積を求め電力波形を描き、その面積から各部の消費エネルギーを図式的に算出した。

図 14 は直列抵抗 R_s を変えた場合のエネルギー特性を示し、し断時に消費された全エネルギーをアークエネルギーと転流後の消費エネルギーとに分けて描いた特性である。転流後の消費エネルギーには直列抵抗 R_s の消費エネルギー、転流用コンデンサの充電エネルギーおよびサージアブソーバ(酸化亜鉛系)の消費エネルギーが含まれる。この実験条件ではサージアブソーバは $R_s=0$ の場合のみ動作した。同図では R_s が 2Ω の点でアークエネルギーと転流後の消費エネルギーが等しくなり、この点を境として両者のエネルギーの大きさが互いに逆の関係となっている。

以上の実験から、転流用コンデンサと直列にそう入した R_s の抵抗値を変えることにより、アークエネルギーと転流後の消費エネルギーの配分が調節できるこ

と、エネルギーを適正配分するためには R_s は比較的低い値でよいことがわかる。なお、実用化に当ってはエネルギー最適配分のため、消弧室、転流用コンデンサおよび R_s, R_p などについて技術面、価格面からの検討が必要である。

〈5.4〉 多段転流による過電圧の抑制 直流送電ではしゃ断時の過電圧値は常規電圧の 1.5~1.7 倍に抑制するよう提唱されている⁽⁷⁾。まえがきでも述べたように直流送電では平滑用として大容量のリアクトルが設置される。従ってしゃ断時にはリアクトルに蓄積されたエネルギーを消費するため、しゃ断器の内外でエネルギー処理のための対策が必要である。この対策が不十分な場合には、しゃ断時のエネルギーは線路側で消費されることとなり線路電圧を上昇させる結果となる。過電圧抑制の手段としてギャップレスアレスタを併用することが考えられる。アレスタを消弧室と並列に接続しサージ電圧の減少のみでなくエネルギーをも消費させようとすると、大容量の素子が必要となるばかりでなくしゃ断時間も引き延ばされ⁽⁸⁾、制限電圧も上昇する。また、制限電圧を下げるため素子のバリスタ電圧を電源電圧に近づけると、素子の寿命が短縮するなどの理由からあまり得策とはいえない。ここでは過電圧を抑制する目的で、補助しゃ断器によるコンデンサ回路のしゃ断の可否とは無関係に転流用コンデンサと並列に接続した抵抗 R_p の値を下げる実験を試みた。従って図 13 のモデル実験回路で $R_s=0$ とし、補助しゃ断器の極間は短絡とした。その他の実験条件は〈5.3〉節の場合と同様である。図 15 は、並列抵抗 R_p に対する転流時過電圧の特性である。過電圧値は $R_p=\infty$ の場合には 20kV 以上あったが、 R_p の値を下げることににより図のように 3kV 程度まで下げることができる。

次に過電圧を下げてしかも補助しゃ断器でしゃ断可能とするため、図 16 に示すように転流回路を 2 段に分割した実験を行なった。すなわち同一消弧室内に上下 2 組の電極 A, B を直列に配置し、第 1 段目の A 電極が開極後約 10ms 遅れて 2 段目の B 電極が開極するように設定した。図 17 はこの回路によるしゃ断実験のオシログラムである。過電圧を下げる目的で 1 段目の並列抵抗 R_{p1} を 17.7Ω と低い値としたため、1 段目の A 電極で転流が行なわれてもしゃ断されないで 2 段目の B 電極にアークが発生する。2 段目の R_{p2} は VCB で十分しゃ断可能な値 168Ω としてあるので、B 電極の転流と共に VCB により最終的なしゃ断が行なわれている。同図では 1 段目の極間電圧が零となったとき、すなわち転流用コンデンサ C_1 の電荷が

図 15 並列抵抗と転流時過電圧

Fig. 15. Overvoltage at the moment of commutation as a function of parallel resistance.

第 16 2 段転流回路

Fig. 16. Schematic diagram of two-stage of commutating circuits.

図 17 2 段転流のオシログラム

Fig. 17. A set of oscillograms obtained two-stage commutation.

なくなった時点でしゃ断され、かつ、電流は 1 段目の転流以後次第に限流されている。

このように並列抵抗は一定の値のものを一時に投入するよりも、僅かな時間差を与えて多段直列そう入した方が限流が緩やかとなり過電圧の抑制に効果がある。実用化した場合のしゃ断時間は数 10ms 程度を想定している。また、転流開始時間の変動などによる過電圧のばらつきはサージアブソーバで吸収することが

できる。

6. 結果の要約

コンデンサ転流を併用したスパイラルアーク方式はしゃ断時に発生するエネルギーをアークエネルギーと転流後の消費エネルギーとに適当に配分して処理することを特徴とする。従ってアーク中で消費されるエネルギーだけ転流後の消費エネルギーが小さくできる。このため過電圧の処理、転流用コンデンサ設備の縮小などの点で有利となるが、アーク短絡を少なくすることが信頼性向上のため必要となる。従って本論文では電磁反発形電極を使用した場合のアーク電圧上昇過程について検討した。その結果、(i)チューリップ形、円筒形電極を使用した場合と比べてアーク短絡の発生を少なくできる。(ii)アーク電圧がある程度上昇した後転流する。(iii)転流の開始を調節しアークエネルギーと転流後のエネルギーの比を加減するには、転流用コンデンサと直列にそう入した抵抗 R_s の値を加減すればよく、 R_s は低い値でよい。ことなどがわかった。

次に転流回路を多段に分割することなどにより、主しゃ断器と直列に接続した補助しゃ断器のしゃ断可能領域内で転流用コンデンサと並列に接続した抵抗 R_p

の値を下げる事が可能となり、しゃ断時に発生する過電圧の抑制効果が向上することを実証した。

以上の結果、スパイラルアーク方式が、転流形直流しゃ断器の主しゃ断器として適用できることを確認した。なお、実用化に当っては限流装置の併用、最適エネルギー配分法の確立などの検討が必要である。

(昭和 56 年 2 月 21 日受付)

文 献

- (1) "HVDC Switching Devices and Arrangements", CIGRE SC No. 13 WG 03, Electra No. 18, 9-65 (1971)
- (2) "Symposium on Current Limiting Devices." *IEEE Summer Power meeting* (1975)
- (3) 長縄・宮地:「スパイラルアークの形成とその動特性」, 電学論 B, 96, 433 (昭 52-7)
- (4) 水野・宮地・長縄:「スパイラルアーク形直流しゃ断装置の電極構成とアーク電圧波形」, 電学論 B, 98, 749 (昭 53-9)
- (5) 石川・稲葉:「高圧力液体 SF₆ 消弧室を適用した転流式直流しゃ断器(その 1)」, 電中研究報告 179028 (昭 54-12)
- (6) 専田, 他:「ABB 適用転流方式 HVDC-CB の転流しゃ断現象」, 昭 53 電気学会全大, No. 977, 1277
- (7) 電気学会: 直流送電専門委員会, 直流送電技術解説 174 (昭 54-3)
- (8) 水野・長縄・宮地:「サージアブソーバによるスパイラルアーク直流しゃ断の過電圧抑制」, 昭 53 電気学会全大 No. 1008 1289