

超電導ケーブルの事故時の検証 - 275 kV-HTSケーブルの地絡事故対策と模擬試験 -

Verification of the HTS Cable at an Accident - Protection against the Ground Fault for 275 kV HTS Cable and Experiment -

高木智洋 *1
Tomohiro Takagi

八木正史 *2
Masashi Yagi

〈概要〉

NEDOプロジェクトの一環として、275 kV-HTSケーブルの短尺試料にあらかじめ人工地絡点を設けておき、そこに地絡事故を模擬する交流電流を通電する地絡模擬実験を行った。何らの保護も設けない場合は、AC10 kA-3サイクルの通電で内/外の両断熱管に大きな穴が開いてしまった。続いて、断熱外管の健全性を維持するための対策としてケーブルコアの外周と断熱内管の外周に絶縁性の不織布からなる保護層を設けた試料で実験を試みた。その結果、ケーブルコア外周の保護層の有無にかかわらずケーブルコアは激しく損傷したのに対して、断熱内管外周の保護層はAC20 kA-3サイクルの通電から断熱外管の健全性を保持することに成功した。

1. はじめに

2014年に始まり2016年3月に終了したNEDOプロジェクト「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」では、高温超電導 (HTS) 送電ケーブルの導入時に想定される安全性に関する実証研究を行ってきた。その具体的な内容は、事故・故障の際のシステムの早期復旧、冷却システムまで含めた耐久性向上のための実証的な研究である。HTS関連のNEDOプロジェクトは2016年7月以降新たに「高温超電導実用化促進技術開発」として統合され、HTS送電ケーブルの安全性に関する実証研究はその中の「電力送電用高温超電導ケーブルシステムの実用化開発」として引き継がれている。古河電工は其中で275 kVケーブルの実用化研究を担当し、22 kVケーブルおよび66 kVケーブルを担当する住友電工殿の研究活動などを含めた全体統合の役割を担う東京電力ホールディングス殿と共に、本プロジェクトを進めている^{1), 2)}。

送電ケーブルには直流ケーブルと交流ケーブルがあるが、本プロジェクトでは交流ケーブルを対象としている。HTSケーブルでは電流の経路となる導体としてHTS線材を用いており、そのためにジュール損失による送電エネルギーのロスを極限的に低減することが可能となる。とはいえ超電導体にも流せる電流に限界があり、また高圧送電時には数十kV、数百kVといった超高電圧が導体に印加されることになる。そのため、HTS

ケーブルでも従来のケーブルと同様に短絡電流通電や地絡事故が発生し得る。さらに、液体窒素冷媒でケーブルを極低温に冷却していること、その温度が上昇すると超電導性が失われて電流通電時に大きな熱が発生してしまうことなどの従来ケーブルにはない特徴があり、それによるHTSケーブル特有の事故ないし現象が発生し得る。したがってこれを市民生活に直結する重要インフラである電力設備に適用するためには、事前の入念な検証が不可欠である。

HTSケーブルで想定される事故として短絡電流通電、ケーブルの損傷による液体窒素の漏えいなどが考えられるが、本稿では地絡事故に絞って研究結果の報告を行う。超高圧送電ケーブル内部の導体は送電時に文字通り超高電圧が印加されており、ケーブル内部の導体を取り囲む絶縁層がその超高電圧を維持している。ここで何らかの要因によりこの絶縁層が損傷すると、超高電圧に耐えられずに絶縁破壊が生じてしまう。これが送電ケーブルの地絡事故である。絶縁層に小さな損傷が生じた、もしくは欠陥を内包していただだけでも、その部位で小さな放電が断続的に発生して次第に損傷を広げてゆき、ついには絶縁層外部の接地と導体の間にアーク放電が生じてしまう。そしてそれはさらにその周囲の構造を破壊し、より大規模で破壊的な放電を引き起こす。莫大なエネルギーを放出する放電部位がケーブル内部にあることから、ケーブル自身に深刻な結果をもたらす事故である。本プロジェクトでは、この地絡事故について「HTSケーブルにどのような状況がもたらされるのかを確認すること (安全性評価)」そして「事故後の復旧についての指針・対応策を得ること」を目的としている。この点に関する議論は4節で改めて行う。

*1 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

*2 電力事業部門 技術開発部

2. HTSケーブルの構造と模擬試験試料

2.1. HTSケーブルの構造

275 kVケーブルは送電網における基幹系統を担う超高压送電線で、地中送電の場合は現在OFケーブル、CVケーブルなどの銅ケーブルが用いられている。それに対してHTSケーブルは、電流の経路となる導体層がHTS線材で構成されている。HTS線材としては現在BSCCO線材とREBCO線材があり、構造や超電導層の組成に違いがあるものの、テープ形状である点は共通している。当社ではREBCO線材の使用を想定している。これを円柱の周囲に配置すれば、擬似的に円筒形状の導体層が形成されることになる。図1に275 kV-HTSケーブルの構造を示す^{3),4)}。断熱内管の中にケーブルコアが収められ、その周囲を冷媒である液体窒素が流れる構成である。66 kV以下のHTSケーブルでは、三相の交流電流を送電する三本のケーブルコアを一本の断熱管に収める構成がとられることもあるが、275 kV-HTSケーブルではケーブルコアごとに各々の断熱管を設けている。ケーブルコアの径はφ89 mmで、導体層とシールド層の間には厚さ22 mmの絶縁層、ポリプロピレンシートをラミネートされたクラフト紙(半合成紙)の積層構造が介在している。導体層は銅線束であるフォーマの外周にらせんに巻かれており、この銅フォーマは地絡事故や短絡電流通電の際の電流バイパスとしての役割も担う。シールド層は導体層の交流電流により生じる磁場を打ち消すためのもので、導体層とは逆位相で同じ大きさの交流電流が流れることになる^{5),6)}。導体層のみに交流の超高压が印加されるため、地絡時は導体層から接地電位にあるシールド層もしくは断熱管に電流が流れることになる。

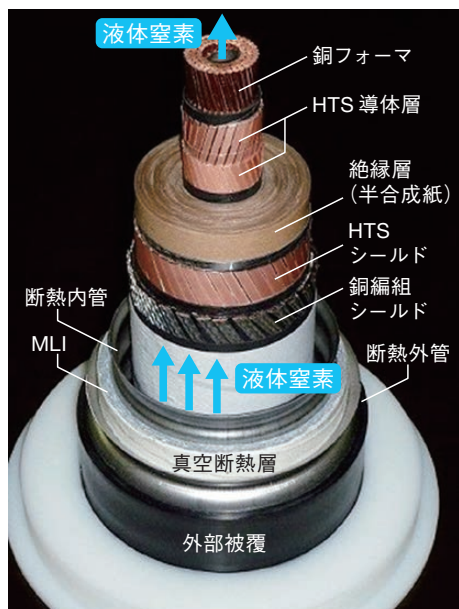


図1 275 kV-HTSケーブルの構造
The structure of the 275 kV HTS cable.

このHTSケーブルの定格送電電流はAC3 kAであるが、275 kVの超高压送電線においては最大63 kAの地絡電流が通電される可能性がある⁷⁾。現行の送電システムにおいては、地絡が

発生すると送電側の主保護リレーが電流遮断機により電流を遮断する。

2.2. 横置き型試料と縦置き型試料

地絡模擬試験は破壊試験であり、一つの試料につき一回の試験しかできない。したがって条件の異なる試験を何度も行いたい場合には、短尺のケーブル試料を複数用意することになる。しかしながらケーブル長を短くすることでいくつかの点で長尺ケーブルとは条件が異なってきてしまうことから、何を評価するために何を犠牲にするのかをよく考えて実験手法を決める必要がある。通常送電ケーブルは水平に敷設されるが、その場合冷媒として液体窒素を用いるHTSケーブルの短尺モデルでは、短尺試料の両側に液体窒素を貯蔵するための終端容器が必要になる。そのような試料をいくつも用意するには大きな費用と労力が必要となることから、我々は短尺試料を垂直に立てて地絡模擬通電を行う縦置き型試料を考案し、地絡模擬試験に採用した⁸⁾。ケーブルコアと共に断熱管も立て、断熱内管の底側を塞いでその中に液体窒素を注げば、終端部容器がなくても液体窒素を保持してケーブルコアを冷却することができる。断熱二重管の空隙を真空状態にすることはできないが、短時間であれば試料の極低温状態と冷媒である液体窒素を維持することは可能である。

縦置き型試料は液体窒素の貯蔵容器を伴う横置き型の試料と比べて準備が容易であり、数多くの試験をこなすことができる。そして、アーク放電などの地絡事故時に生じる現象をよく再現すると期待される。本稿では縦置き型試料を用いた実験について報告する。なお、断熱管の上端面が開放されていることから、地絡時に生じると予想される冷媒圧力の上昇を正しく再現できないことは留意されなければならない。圧力上昇に関する知見を得る目的においては、縦置き型試料よりも横置き型試料の方が適しており、さらにシミュレーション解析を行う必要がある。

2.3. 人工地絡点の形成

地絡試験の試料とするケーブルコアは、2014年にビスキャスにて作製された。そこから長さ1メートル分を切り出し、それぞれ成形して短尺コア試料とした。一方の端部付近にドリルで穴をあけ、その中に鉄ピンを挿入した。鉄ピンの両端はそれぞれ内側の銅フォーマと外側の銅編組シールドに接触させた。地絡事故の際には銅フォーマと銅編組シールドがHTS線のバイパスとして機能することから、それらを短絡する鉄ピンが実際の地絡事故の引き金となる絶縁欠陥を模擬する人工的な地絡点となる。本来ケーブルの長手方向に流れる導体層電流はこの鉄ピンを流れて接地電位にあるシールド層に流れ込み、鉄ピンはジュール発熱によってすぐに蒸発する。その後は鉄ピンが挿入されていたドリル穴の中にアーク放電が生じ、大規模な人工地絡へと発展する。短尺コア試料のもう一方の端では銅フォーマと銅編組シールドがむき出しにされ、それぞれに電極スリーブがはんだ付けされた。短尺コア試料の様子を図2に示す。

試料中に耐電圧性能の低い部位があるとそこで意図されない放電が生じ得ることから、事前の耐電圧試験を行った。ドリル穴のみ開けられて鉄ピンを挿入されていない状態の短尺コア試料は大気中AC12 kVの電圧に耐え、どの部位にも放電は発生しなかった。



図2 縦置き型短尺コア試料の様子
The configuration of the short core sample.

3. 保護を設けないHTSケーブルの地絡模擬試験

3.1. 実験

地絡模擬電流の通電時間は50 Hz交流で3サイクル分、60ミリ秒とした。これは送電系統において電流の遮断器が起動して送電線への送電を遮断する時間の目安である。通電は電流制御モードで行い、所定の交流通電を維持する電圧が電源により回路に印加される。アーク放電はケーブルコアの導体層からシールド層と断熱内管、さらには断熱外管に飛ぶ可能性があるため、これら3つの導体に電極を取り付け、電源に接続した。そしてそれぞれの経路に電流計を取り付け、各経路の電流挙動を測定した。図3に試料概略図を用いた回路図と測定されるアイテムを示す。

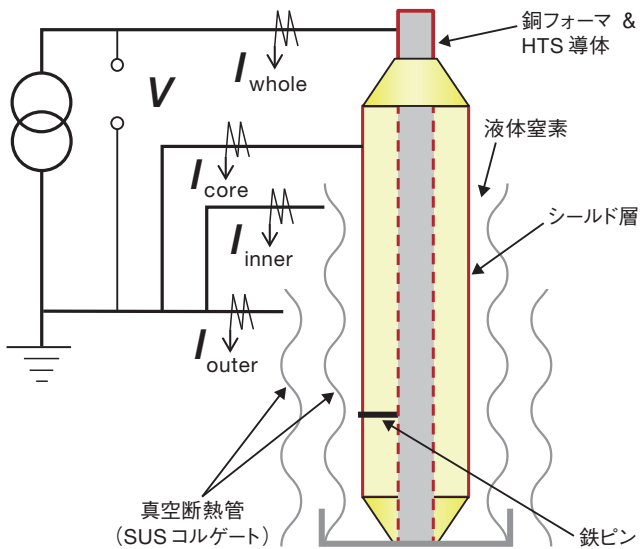


図3 縦置き型短尺試料試験時の回路図
The circuit diagram for the examination on the short vertical sample.

通電に先立ち、下端を底部により塞がれた断熱内管の内部に液体窒素を注入し、ケーブルコアを十分に冷却した。ケーブルコアの構成要素である絶縁層は熱抵抗も高いため、その内部まで十分に冷却されるには時間を要する。我々の実験では1時間程度の冷却時間をとった。なお、実験でも実際の事故でも地絡通電の電流はHTSケーブルの臨界電流を大きく上回っており、通電開始直後の電流の大部分が、そしてそれが電流経路を加熱し臨界温度を上回ったのちはすべての電流が、HTS線材の超電導層ではなく常電導領域 (HTS線材の銅安定化層、導体層

であれば銅フォームなど) を流れる。したがって、超電導層が冷却されて臨界温度を下回っているかどうかは本実験ではそれほど重要でない。ただしケーブルコアなどの損傷具合はそれらの温度によって変化する可能性があり、その観点から十分な冷却がなされていることが望ましい。

3.2. 実験の結果

試験を終えた試料を回収し、解体してその損傷具合の調査を行った。AC10 kAを通電された試料の断熱管損傷の様子を図4に示す。左側の細いほうが内管、右側の太いほうが外管であるが、外管の穴のほうが内管のそれよりも大きい。外管の穴の周囲には熔融金属の飛び散った跡が見られ、外管の一部が溶融して飛散した状況であることが分かる。両断熱管の残された部位に顕著な変形は見られず、断熱管を変形させるほどの圧力にはさらされていないことも分かる。アーク放電による熱が断熱管に損傷をもたらした主たる原因だということになる。また地絡点周辺以外に損傷が見られないことから、断熱管を流れる電流によるジュール発熱は断熱管に損傷をもたらしていないことが分かる。



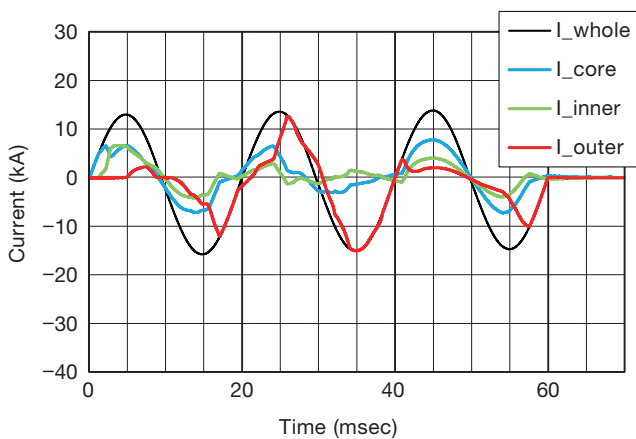
図4 AC10 kA 通電試料の断熱管損傷の様子
左側が断熱内管、右側が断熱外管
The damaged appearance of the cryostat pipe with AC 10 kA.
The left is the inner pipe and the right is the outer pipe.

この試料に対するAC10 kA通電時の電流挙動を図5(a)に示す。図中で黒線が人工地絡点手前までの電流 (全電流)、青線がシールド層を流れた電流、緑線が断熱内管を流れた電流、赤線が断熱外管を流れた電流をそれぞれ示す。人工地絡点より先では、シールド層、両断熱管の三経路すべてに電流が流れた。別の試料ではわずかに4ミリ秒程度、2 kAに満たない電流が外管に流れたのみだったが、両断熱管共に穴が穿たれていた。これらの結果から、断熱外管に電流が流れた、すなわちアークが到達した時点で断熱外管は健全性を喪失しているものと想定すべきである。

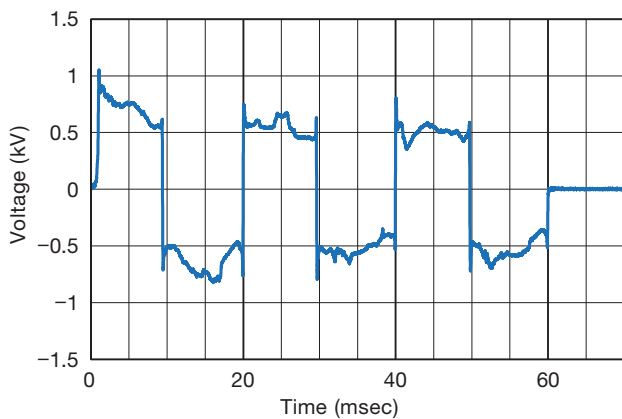
AC10 kA通電時の回路電圧の挙動を図5(b)に示す。電圧は電流の大きさによらず比較的安定しており、電流の極性反転の前後でやや高い値を示した。また、通電開始直後1ミリ秒程度は電圧が出ていない。この期間は人工地絡点に挿入した鉄ピンを電流が流れていたために電圧が出なかったものと推測され

る。そして、その後電圧が出た期間には鉄ピンは蒸発してしまっており、アーク放電の形で電流が流れたと考えられる。交流通電では極性反転の際に一度アーク放電が途切れることになる。このときにアーク放電を担う電離したプラズマが電荷の再結合により失われてしまうと、10 kV程度の電圧印加では再発弧に至らないことが以前の実験で確認されている⁸⁾。図5に示される通電実験ではどちらも設定通りの通電ができたが、極性反転の前後、すなわち電流が小さくなる間はプラズマの濃度(アークの導電率)が低下し、アーク放電の維持にやや高い電圧を必要としたのだと推測される。それ以外の期間で電圧が比較的安定しているのは、アーク放電の太さもしくはプラズマ濃度が電流の大きさに応じて増減するためだと考えられる。

ここで先ほどの電流挙動に戻ると、電流が鉄ピンを流れていた通電開始直後を除き、測定された電流の大きさは、その時点でケーブルコア中心部の導体層から各経路までの間に形成されたアーク放電の規模を示していると考えられる。



(a) 各種電流挙動
Behavior of the currents.



(b) 電圧挙動
Behavior of the circuit voltage.

図5 AC10 kA通電試料の電流・電圧挙動
The behavior of the currents and the voltage for the sample at AC 10 kA.

4. ケーブル保護の検討

4.1. ケーブル保護の意義

HTSケーブルで地絡事故が発生した場合、その規模が大きければ前節で述べたように断熱管に穴が開くおそれがある。その場合断熱管の穴から液体窒素が外部に漏れ出すことになり、その周囲に酸欠状態を作り出す。一方、地絡事故の規模が小さい場合は断熱管に穴が開かない可能性もある。その場合は放電による冷媒の圧力上昇が断熱管内部にこもってしまい、遠方まで伝播して液体窒素の循環機構などに悪影響をもたらすかもしれない⁹⁾。したがってHTSケーブルの信頼性を高めるためには、断熱管に穴が開く場合と開かない場合の双方について検討し、それぞれの場合に対して対策もしくは復旧の指針を与える必要がある。これが本プロジェクトの大目標であり、我々のなすべき地絡試験はそのための知見を得るものでなければならない。

275 kV-HTSケーブルでは一本の真空断熱管に一本のケーブルコアを収納する構成が想定されており、三相交流の送電システムではこの構成のケーブルが三本並べて敷設されることになる。地絡事故を起こしたケーブルはその時点で取り替えるしかなくなるが、その周囲に敷設されたケーブル、もしくは周辺設備に対して損傷をもたらす事態は避けたい。ここで、地絡事故において断熱外管の健全性が維持できれば、そのような事態だけでなく液体窒素の外部への流出という事態を回避することもできる。275 kV-HTSケーブルは都市部の地下洞道への敷設が想定されている。液体窒素のケーブル外部、すなわち地下洞道への流出はケーブルの復旧作業を困難にすることから、その回避は送電機能の復旧という点からも意義がある。そこで地絡事故に対するケーブル保護を考えるにあたり、断熱外管の健全性維持を目標に設定した。

4.2. 地絡保護層の付与

地絡事故に対するケーブルの保護として、ケーブルコア外周部への保護層の付与、断熱内管外周部への保護層の付与の二つを考えた。なお、断熱外管外周部への保護層付与には断熱外管の健全性保持の観点から効果がないと判断した。今回地絡模擬試験を行う試料として、これら二つの保護層を備えたもの(タイプA)、断熱内管外周部の保護層のみを備えたもの(タイプB)の二タイプを用意した。保護層はいずれも電気絶縁性の不織布を積層させた構造とし、その厚さを12 mmとした。タイプAおよびタイプBの試料の各部位の太さを表1に示す。また、タイプAの試料の断面概略図を図6に示す。

表1 タイプAおよびBの寸法
The diameters of type A and type B.

構造	φ (mm)	
	タイプA	タイプB
HTS導体層	35.4	35.4
HTSシールド層	88	88
コア外周(被覆含む)	112	89
断熱内管 (MLIなど含む)	内径	127
	外径	172
断熱外管	内径	200

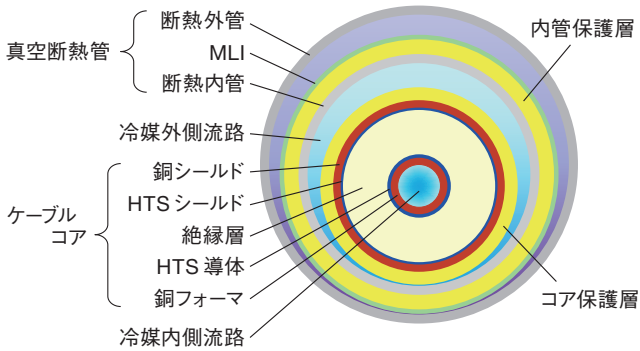


図6 タイプAの断面概略図
The schematic drawing of the cross section of type A.

5. 保護の効果

5.1. 試料の損傷

二タイプの試料に対してAC20 kA-3サイクルの通電試験を行ったのち、試料の解体調査を行った。試料全体を見ると、タイプA、Bとも外/内の両断熱管に外観上の損傷は見られなかった。今回の実験では断熱外管の健全性保持を目標としており、この結果からタイプA、Bの両方の保護方式がそれぞれに対して有効であることが示された。一方、ケーブルコアは両タイプとも特に人工地絡点の周辺が激しく損傷していた。タイプAのケーブルコアは自身の外周に保護層を備えていたが、それは人工地絡点で周方向に開裂するような形の損傷を示していた。タイプAのケーブルコアの損傷の様子を図7に示す。それより内側に位置する絶縁層、導体層、銅フォーマについては、人工地絡点のドリル穴と比べて大きな穴が穿たれていたものの、外周の保護層と比較すると損傷具合は軽いように見えた。タイプBのケーブルコアの損傷についても同様であった。



図7 タイプAケーブルコアの損傷の様子
The damage appearance of the cable core of the type A.

続いて断熱内管の解体調査を行った。断熱内管は最外層に断熱層MLI (Multi-layer insulation), その内側に保護層を備えており、それらを順に除去していった。その結果、両タイプともMLIは完全に無傷であり、保護層も外側の部位は無傷であった。これを外側から剥いでいくと、あるところより内側では炭化や溶融・再凝固といった熱による損傷が見られるようになり、

さらにその内側では不織布そのものが喪失していた。ただしその領域から少し離れると、保護層を構成する最も内側の不織布にさえ何らの損傷も認められなかった。内管から保護層をすべて除去すると、SUS製のコルゲート管には大きな穴が開いていた。この点については3節で示した保護層なしの試料に対する地絡模擬試験の結果と同じである。この穴の縁は熱で切り取られたような外観で、その周辺部に目立った変形を伴っていなかった。コルゲート管の穴の形状と大きさは保護層の喪失領域とほぼ一致していた。通電試験により損傷を受けたコルゲート管の様子を図8に示す。



図8 内管コルゲート管の損傷の様子
The appearance of the damaged inner corrugated pipe.

5.2. 保護層の効果の検証

タイプA試料のシールド層、両断熱管の三経路に流れた電流の挙動を図9に示す。保護層を持たない試料の電流挙動である図5(a) (3節) と比べて明確な違いが見られるのは、赤線で表される外管電流である。図5(a)では全電流のうち外管電流がかなりの割合を占めているのに対して、図9では3サイクルの通電期間中外管には電流が全く流れていない。これらの外管電流挙動は、図5(a)に示される内管外周の保護層を持たない試料では比較的規模の大きなアーク放電が外管に到達していた一方、図9に示される内管外周の保護層を持つ試料(タイプA)ではアーク放電が外管に到達できなかったことを示している。そして、電気絶縁性の不織布を積層させた保護層がアーク放電の延伸を阻止したものの、すなわち内管外周の保護層が地絡模擬通電から外管を保護したことを示している。内管外周の保護層は人工地絡点に近い積層内側が喪失したり熱で変質したりしているが、積層外側は元のままの状態を保っていた。これは、この保護層が多数の不織布の積層構造であったため積層の数だけ界面が形成されており、その結果積層方向の熱伝導度が著しく低下して放電により生じた熱が積層の外側に伝わらなかったことが有効にはたらいたためだと推測される。なお、全電流と電圧の積として求められるアーク放電のエネルギーの大きさは、10 kA通電の保護層を持たない試料でおおよそ0.3 MJ、20 kA通電のタイプA試料でおおよそ0.8 MJであった。後者の平均電圧が前者のそれよりもやや高かったことから、解放エネルギーに関する両者の比は電流比である1:2よりもやや高くなっている。

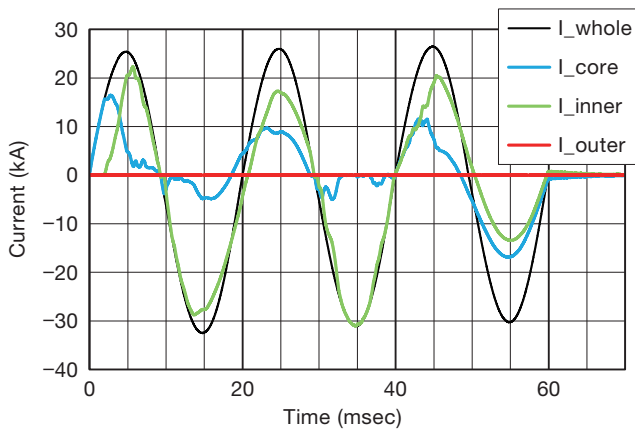


図9 タイプA試料の電流挙動
The behavior of the currents for the type A sample.

次に、ケーブルコア外周に施された保護層の効果を検証した。図9の電流挙動を示したタイプA試料はケーブルコア外周にも絶縁性不織布(半合成紙)からなる保護層を備えていたが、その内管電流の挙動は通電開始後わずか2～3ミリ秒後にアーク放電が保護層を破ったことを示している。図7に示されるケーブルコアの損傷具合を見ると、その保護層は熱によって徐々に破られたというよりは衝撃によって一気に破られたように見えた。最初のアーク放電の行き先であるシールド層はこの保護層よりも内側にあるため、この保護層が健全である時点で最初のアーク放電は周囲の冷媒を激しく加熱する。加熱された冷媒はガス化して大きな圧力を持ち、それが“ふた”の役割を果たしていたケーブルコア外周の保護層を一気に破ってしまったものと推測される。

それでは、内管外周の保護層はなぜこの圧力で破られなかったのか。ケーブルコア外周の保護層を破った圧力は金属製の内管コルゲート管を破ることができず、ケーブル長手方向に冷媒を押し出す形で解消されたと考えられる。その後もアーク放電およびそれに伴う発熱は続き、ついには内管コルゲート管が熱により部分喪失して内管保護層も高温に加熱された冷媒の分子もしくはプラズマにさらされたはずである。しかしその時点では冷媒の密度が低下しており、高温ではあっても放電初期ほどの高圧状態を維持しておらず、冷媒にさらされた内管保護層は圧力による損傷を免れたのではないかと推測される。すなわち、内管保護層は耐衝撃性という弱点を金属製の内管コルゲート管によって補強されることでより効果的な保護性能を発揮したのだと考えられる。

しかしながら、上述の考察は縦置き型試料に特有の条件を考慮したものである。想定される商用の長尺ケーブルでは、ケーブル内流路に加圧充填された冷媒を“押し出す”ことは簡単ではないはずである。その場合、断熱内管がより長い時間にわたってより強い内部圧力にさらされることが予想される。そのときにどのような現象が生じるのか、今回の対策がどの程度の有効性を示すのか、その知見を得るには実験手法では限界がある。その点を見据えて、今後はシミュレーションの手法も交えて長尺ケーブルにおける地絡事故時の現象および対策を追求していく予定である。

6. おわりに

275 kV-HTSケーブルで地絡模擬通電実験を行った。保護を設けない場合は、AC10 kA-3サイクルの通電で内/外の両断熱管に大きな穴が開くことが確認された。続いて、断熱外管の健全性を維持するための対策としてケーブルコアの外周と断熱内管の外周に絶縁性の不織布からなる保護層を設けた試料で実験を試みた。その結果、断熱内管外周の保護層はAC20 kA-3サイクルの通電から断熱外管の健全性を保持することに成功し、地絡通電に対して効果的な保護が実現されたものとする。

謝辞

本研究はNEDO殿の助成により実施したものである。NEDO関係者のご協力に感謝いたします。また、本NEDOプロジェクトにて共同研究を行っている東京電力ホールディングスの皆様、そして地絡模擬試験の会場にてさまざまな協力と助言を与えていただいた三菱電機の高電圧・大電力試験所の皆様にも感謝いたします。

参考文献

- 1) S. Honjo et al., "Status of Superconducting Cable Demonstration Project in Japan," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 21, no. 3, (Dec. 2010), pp. 967-971.
- 2) O. Maruyama et al., "Fundamental Study of Ground Fault Accident in HTS Cable," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, no. 4, (2017), Art. no. 3800405.
- 3) M. Yagi et al., "Progress of 275 kV-3 kA YBCO HTS cable," Physica C 471, (2011), pp.1274-1278.
- 4) X. Wang et al., "Thermal Characteristics of 275 kV/3 kA Class YBCO Power Cable," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 20, no. 3, (Jun. 2010), pp. 1268-1271.
- 5) M. Yagi et al., "Design and evaluation of 275 kV-3 kA HTS Power cable," Physica Procedia 45, (2013), pp.277-280.
- 6) S. Mukoyama et al., "Status of a 275 kV Class REBCO Superconducting Cable Development," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 23, no. 3, (Jun. 2013), Art. No. 5402804.
- 7) 東京電力「流通設備計画ルール」(2015年4月2日改訂版)。
- 8) T. Takagi et al., "Basic Study on Ground Fault Characteristics of 275-kV HTS Cable," IEEE Trans. Appl. Supercond. vol. 27, no. 4, (2017), Art. no. 5401205.
- 9) Y. Murakushi et al., "Transient Oil Pressure Rise at EHV Pipe-Type Cable Faults," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems vol. PAS-91, no. 4, (July 1972), pp. 1339-1345.