Experimental Study on Behavior of Bow-tie Tree Generation by Using Heavy Water

Takao Kumazawa Member (Chubu Electric Power Co., Inc.)

Wataru Nakagawa Member (Tatsuta Electric Wire & Cable Co., Ltd.)

Hidekazu Tsurumaru Member (Tatsuta Electric Wire & Cable Co., Ltd.)

Keywords : XLPE cable, water tree, bow-tie tree, deterioration, heavy water, isotopic effect

Bow-tie tree (BTT) generated from contaminant, e.g., metal, carbon, amber (over cured resin) or void in insulator is a deterioration factor of XLPE power cable. However, essential role of water in generation and progress of BTT is not yet sufficiently cleared. In order to investigate the role of water we paid attention to difference in chemical properties of light water (H_2O) and heavy water (D_2O), moreover we evaluated influence of isotopic effect due to hydrogen and deuterium on behavior of BTT generation.

Fig. 1 shows configuration of accelerated aging test. XLPE samples, in which copper powder of 500ppm was contaminated as BTT cores, were dipped in light water mixed with 0, 1, 10 or 100wt% of heavy water. A cell for voltage application using separable beaker was immersed in tap water maintained at $60^\circ C$, and AC electric field (2kV/mm, 2400Hz) was applied to XLPE sample for 240 hours.

Fig. 2 shows relation between size of BTT cores and length of BTT in XLPE samples after accelerated aging test in various concentrations of D_2O . The number of BTT in XLPE sample dipped in heavy water (D_2O : 100wt%) decreased to one third compared with light water (D_2O : 0wt%). Furthermore, the maximum length of BTT decreased with increase in concentration of D_2O . The experimental results show that heavy water exerted a

depression effect on generation and progress of BTT. There was, however, no difference in shape of BTT using light water and heavy water.

From these results we considered that the depression effect due to hydrogen isotope appeared by inhibiting ionization and elution of BTT cores, because salt-solubility and ionic mobility of heavy water are about 15 to 20% smaller than those of light water. Therefore, the essential role of water seemed to be production and transport of ions in XLPE.

Fig. 1. Configuration of accelerated aging test.

(a) D_2O : 0wt% (demineralized light water)

(b) D_2O : 100wt%

Fig. 2. Relation between size of BTT cores and length of BTT in various concentration of D_2O .

重水を用いたボウ・タイ状水トリーの発生挙動に関する実験的考察

正員 熊澤 孝夫* 正員 中川 渡**
正員 鶴丸 秀一**

Experimental Study on Behavior of Bow-tie Tree Generation by Using Heavy Water

Takao Kumazawa*, Member, Wataru Nakagawa**, Member, Hidekazu Tsurumaru**, Member

Bow-tie tree (BTT) generated from contaminant, *e.g.*, metal, carbon, amber(over cured resin) or void in insulator is a significant deterioration factor of XLPE power cable. However, essential role of water in generation and progress of BTT is not yet sufficiently cleared. In order to investigate the role of water we paid attention to difference in chemical properties of light water (H_2O) and heavy water (D_2O), moreover we evaluated influence of isotopic effect due to hydrogen and deuterium on behavior of BTT generation. In accelerated aging test the number of BTT in XLPE sample, in which copper powder of 500ppm was contaminated as BTT cores, dipped in heavy water (D_2O :100wt%) decreased to one third compared with light water(D_2O :0wt%). Furthermore, the maximum length of BTT decreased with increase in concentration of heavy water. The experimental results show that heavy water exerted a depression effect on generation and progress of BTT. We considered that the depression effect due to hydrogen isotope appeared by inhibiting ionization and elution of BTT cores, because salt-solubility and ionic mobility of heavy water are about 15 to 20% smaller than those of light water. Therefore, the essential role of water seemed to be production and transport of ions in XLPE.

キーワード：CVケーブル，水トリー，ボウ・タイ状水トリー，劣化，重水，同位体効果

Keywords : XLPE cable, water tree, bow-tie tree, deterioration, heavy water, isotopic effect

1. まえがき

CV ケーブルの絶縁体中の微小な異物やボイド等を発生起点とするボウ・タイ状水トリー（以下、BTTと略記）は、依然として重要な寿命決定因子の一つとなっている^{(1)~(3)}。BTTの発生・進展メカニズムについては、架橋ポリエチレン（XLPE）中の水分量が無課電時の飽和水分量に達したときにBTTの発生数が急増するとして、水分の凝集・液化に基づいたモデルが提案されている⁽⁴⁾。このモデルでは、XLPE中に飽和水蒸気として存在するガス状の水分が異物近傍の電界集中部で凝集・液化し、高圧力の噴流となって分子鎖切断に至ると考えられている⁽⁴⁾。そのほかに、近年では水トリー劣化部においてカルボニル化合物等の酸化生成物が観測されており、不純物として存在する金属イオンの触媒作用によりXLPEが酸化・分子鎖切断に至るとする化

学的な発生・進展機構も考えられている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

このように水分の役割については、いわゆる“主役”か“脇役”かによって仮説が明確に分かれることから、著者らは様々な実験を通して水分やイオンの本質的な役割について考察を進めてきた。これまでに、XLPE試料を浸漬した水溶液が蒸発・揮散する開放系課電と蒸発・揮散しない密閉系課電、或いは間欠浸漬課電と連続浸漬課電といった環境の違いによるBTTの発生挙動の変化を詳しく観察した。既に報告⁽⁷⁾したように、課電前後における試料の水分量の変化とBTTの発生数との間には因果関係が見いだせず、従来の水分の凝集・液化に基づくモデルでは実験結果を十分に説明することが困難であった。また、BTTの発生にはXLPE内部のイオンが方向性を持った運動をしており、その運動がある程度持続するような環境が必要と考えられた。

そこで今回は水が有する基本的な性質に着目し、その振る舞いをより鮮明に観察すべく新たな実験を行った。すなわち、所定の濃度に調整した軽水（ H_2O ）と重水（ D_2O ）の混合液体にXLPE試料を浸漬してBTTを発生させ、それぞれの液体が有する化学的性質の違いがBTTの発生にどのような影響を及ぼすかを調査した。この実験においては重水

* 中部電力（株）技術開発本部 電力技術研究所
〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1
Chubu Electric Power Co.,Inc. Electric Power R&D Center
20-1, Kitasekiyama Ohdaka, Midori-ku, Nagoya 459-8522

** タツタ電線（株）
〒578-8585 東大阪市岩田町 2-3-1
Tatsuta Electric Wire&Cable Co.,Ltd.
2-3-1, Iwata-cho, Higashi-Osaka 578-8585

の BTT 抑制効果が認められたため、その原因を推定しながら水分の本質的な役割について考察した。

2. 実験方法

〈2・1〉 試料 CV ケーブルの絶縁体に混入する可能性がある微小異物の一つに金属（導体金属の粉体等）がある。今回は入手が容易な工業用の銅粉を用いてこれを模擬し、BTT の発生核とした。表 1 に銅粉の大きさと形状を、図 1 に銅粉の粒径分布をそれぞれ示す。銅粉はほぼ球形で、平均直径は $30.7\mu\text{m}$ である。小型ミキサーと熱ロールにより、この銅粉を XLPE 中に 500ppm 添加・混練し、図 2 に示す形状のサンドイッチシートをプレス成型により作製して試料とした。また架橋剤の分解残渣ならびに水分を取り除くため、全ての試料に予め熱処理（90℃雰囲気、48 時間放置）を施し、初期水分量を 5ppm 未満に調整した。

〈2・2〉 課電方法 試料の浸漬には軽水と重水の混合液体を用い、重水の濃度は 0wt%（自然界では軽水にも約 0.015wt%含まれる）、1 wt%，10wt%および 100wt%の 4 水準とした。混合液体に使用した軽水は全てイオン交換水である。

軽水と重水の混合液体においては水素（H）と重水素（D）の同位体交換反応が速やかに起きるため、課電期間中は実質的に平衡状態に達していると推察される。このとき、 D_2O を 1 wt% 混合した場合はその殆どが HDO として存在し、

表 1 BTT の発生核

Table 1. Size and shape of BTT core.

Core	Particle size (μm)	Content (ppm)	Particle density (N/mm^3)	Note
Copper powder	7~116* (Median D.: 30.7)	500	~11.3	Shape : Spheroid

*Laser scattering particle-size/ - distribution analyzer

図 1 銅粉の粒径分布

Fig. 1. Distribution of particle diameter in copper powder.

10wt%混合した場合には、 H_2O 、 HDO 、 D_2O の mol 比は概略 80 : 18 : 2 となっている⁽⁸⁾。

電極配置については、図 3 に示すような密閉系課電⁽⁷⁾とした。この課電方法は浸漬水の蒸発・揮散が起きないため、重水素の量をほぼ一定に保つことができる。セッティングの手順として、まずセパラブルビーカー内に上記の混合液体を注入して試料を浸漬した後、セパラブルカバーを被せた。次にこれを水道水で満たした SUS 製ウォーターバス内にセットし、最後にウォーターバス内の水道水を 60℃に保持しながら、試料に 2,400Hz、2kV/mm の電界を 240 時間印加した。

〈2・3〉 試料の観察 図 4 に BTT 観察用試料片の採取方法を示す。まず、BTT 発生部分(平等電界部)から観察体積が一定（約 1020mm^3 ）になるように切り出し、これを

図 2 試料の形状

Fig. 2. Construction of XLPE sample for accelerated aging.

図 3 加速劣化試験の電極配置

Fig. 3. Configuration of accelerated aging test.

表 2 加速劣化試験後の BTT の発生数と最大伸び

Table 2. Number and maximum length of BTT after accelerated aging test.

Concentration of D ₂ O (wt%)	Water content		Number of cores (N/mm ³)	BTT		
	Before aging (ppm)	After aging (ppm)		Number (N)	Generating ratio (%)	Maximum length (μm)
0	<5	37	~11.3	100	8.7	820
1		37		109	9.5	600
10		42		120	10.4	420
100		65		34	2.9	515

Volume of observation : 1020mm³, Length of observation on BTT and VT : ≥100 μm

図 4 BTT 観察用試料片の採取方法

Fig. 4. Collecting method of sample for BTT observation.

0.5mm 厚にスライスした後、クリスタルバイオレット溶液で煮沸染色した。この試料片について、光学顕微鏡により 100 μm 以上の BTT を観察した。また、試料の水分量をカルフィッシャー法により測定した。

3. 結果および考察

〈3・1〉 BTT の観察結果 図 5 に観察した BTT の代表例を示す。BTT の外観は軽水と重水で特に違いは見られず、形状に関しては水素の同位体の影響は現れていない。

表 2 に BTT の観察結果の一覧を示す。また、図 6 に BTT 発生核の大きさと伸びの関係を重水の濃度別に示す。BTT の発生率は、重水の濃度に対する明確な相関性が見られないものの、100wt%では 0wt%の 1/3 (=2.9/8.7) に減少している点は注目される。発生核の大きさに関しては、いずれの重水濃度においても 5~20 μm 程度の銅粉からの発生が顕著である。図 1 に示した銅粉の粒径分布から、この範囲の大きさの銅粉が占める割合は約 18%となるが、これよりも大きな銅粉は圧倒的に多いにもかかわらず BTT の発生は非常に少なかった。他方、BTT の最大伸びは、重水の濃度が増加するにつれて鈍化する傾向が見られる。ただし、BTT 発生核の大きさと伸びの関係については、いずれの重水濃度においても BTT が多発する銅粉の大きさ (5~20 μm 程度) とそれに対応する BTT の伸び (概ね 100~400 μm) に明確な差はなく、したがって相関性には顕著な違いは見られない。総じて軽水/重水混合系においては BTT の重水濃度依存性が不明瞭であったが、その原因としては混合し

(a) D₂O:0wt% (b) D₂O:100wt%

図 5 BTT 観察結果の一例

Fig. 5. Typical result of BTT observation.

表 3 軽水と重水の化学的性質の比較

Table 3. Comparison of chemical properties of H₂O and D₂O.

Chemical property		H ₂ O	D ₂ O
Lattice constant [Å]	a	4.514	4.517
	c	7.352	7.354
Melting point [°C] at 760 mm Hg		0.0	3.82
Boiling point [°C] at 760 mm Hg		100	101.42
Specific gravity	d ₄ ²⁵	0.99708	1.10714
Heat of melting [cal/mol]		1436	1520
Heat of evaporation [cal/mol]		9710	9969
Dielectric constant at 0°C		81.5	80.7
Ionic product ×10 ¹⁴ at 25°C		1.0	0.16
Ionic mobility at 18°C	D ⁺ , H ⁺	315.2	213.7
	K ⁺	64.2	54.5
	Cl ⁻	65.2	55.3
Solubility [g/100g] at 25°C	NaCl	35.8	29.7
	BaCl ₂	35.7	28.9

The source: Encyclopedia CHEMICA Vol.4, pp.650 (Kyoritsu)

た重水の濃度がやや低く、殆どが HDO として存在したためと思われる。これに対して単一系 (重水 100wt%または 0wt%) においては、明らかに BTT の発生・進展に違いが見られ、いわゆる水素の同位体効果が認められる。

なお、試料中の水分量に関しては、表 2 より重水の濃度と共に増加する傾向が見られるが、この程度の変化であれば BTT の発生・進展に影響を及ぼすことは考え難い⁽⁷⁾。

図 6 重水の濃度別における BTT 発生核の大きさと伸びの関係

Fig. 6. Relation between size of BTT cores and length of BTT in various concentrations of D₂O.

表 4 電解質水溶液を用いた加速劣化試験後の BTT の発生数と最大伸び

Table 4. Number and maximum length of BTT after accelerated aging test using electrolyte solution.

Water quality	Water content		Number of cores (N/mm ³)	BTT		
	Before aging (ppm)	After aging (ppm)		Number (N)	Generating ratio (%)	Maximum length (μ m)
Demineralized water (D ₂ O:0wt%)	< 5	37	~11.3	100	8.7	820
Tap water ⁽⁷⁾		56		56	4.9	520
0.2 mol/kg NaCl solution		60		28	2.4	260
2.0 mol/kg NaCl solution		53		42	3.6	530
4.0 mol/kg NaCl solution		28		18	1.6	250
0.2 mol/kg CaCl ₂ solution		57		28	2.4	375
2.0 mol/kg CaCl ₂ solution		37		9	0.8	190
4.0 mol/kg CaCl ₂ solution		23		0	0	—

Volume of observation : 1020mm³, Length of observation on BTT and VT : ≥100 μ m

同位体効果は同位体の質量差に起因する物理的あるいは化学的な効果を指すが、この H と D の質量差が BTT の発生・進展環境に何らかのネガティブな影響を及ぼしたのは間違いない。そこで表 3 に、軽水と重水の代表的な化学的性質を比較して示した。誘電率は両者ほぼ等しいものの、塩の溶解度やイオンの移動度は、軽水と比べて重水のほうが 15~20%程度小さな値となっている。したがって、重水の中では電解質のイオン解離が起き難く、イオンの運動もやや緩慢になる。これらの性質が BTT の抑制につながった可能性が考えられるため、以下では水とイオン解離（生成）の関係に着目して考察した。

〈3・2〉 浸漬水中のイオン解離 今回の実験では浸漬

水中の不純物（イオン）がもともと少ないため、イオン解離の影響を直接評価することは難しい。そこで、所定の濃度（0.2 mol/kg、2.0 mol/kg および 4.0 mol/kg の 3 水準）に調整した NaCl 水溶液と CaCl₂ 水溶液（いずれも溶媒はイオン交換水を使用）を浸漬水として用い、前述と同一の課電条件にて試料に BTT を発生させて、イオン解離の影響を評価した。表 4 に BTT の観察結果を示す。表中の水道水については、参考値として文献(7)より引用した（実験条件等は全て同じである）。表 4 から BTT の発生・進展は概ね、イオン交換水>水道水>NaCl 水溶液>CaCl₂ 水溶液の順で顕著であり、さらに NaCl 水溶液および CaCl₂ 水溶液においては、いずれも濃度が低いほど顕著である。総じ

図7 界面トリーの一例

Fig. 7. A sample of vented tree.

て電解質（イオン）の濃度が高いほど BTT の発生・進展が抑制されていることから、重水の BTT 抑制効果は、少なくとも浸漬水中のイオン解離の減少に起因したものではないと推察される。他方、試料中の水分量に関しては、電解質の濃度が高いほど減少しているが、前述のようにこの程度の変化であれば影響はないと考えられる。

ここで、NaCl 水溶液および CaCl₂ 水溶液では、図 7 に示すようなイオン交換水や水道水では観察されなかった界面トリー（vented tree; VT）が多数観察されたことを付け加えておく。発生起点となる界面不整や微小突起部からのイオンの大量供給は、界面トリーの発生・進展を顕著に促進することが改めて確認できた。

〈3・3〉 発生核とイオン生成 これまでの考察から、重水の BTT 抑制効果は浸漬水中ではなく、主として試料中で発現する水素の同位体効果に起因していると推察される。前述のように界面トリーにおいては、発生起点となる界面不整や微小突起部からのイオンの大量供給は重要な促進条件となる。このことから BTT においては、XLPE 外部（浸漬水）からのイオン供給のみならず、発生核となる異物からの直接的なイオン供給も発生・進展に深く関与していると思われる。特に今回の実験では発生核が銅粉であるため、XLPE との界面に水分が凝集・液化するとイオン化（溶出）する可能性が高い。この機構はデンドライトを形成するようなマイグレーションの類ではなく、例えば銅配管で生じる銅イオンの溶出（一般的に数 ppm 以下とされる）と同じであろう。そのため XLPE との界面に重水が凝集・液化した場合には、銅粉のイオン化が阻害され BTT が抑制されることが考えられる。このモデルはボイドやブラック（炭素粉）、アンバー（焼け樹脂）といったイオン化し難い非金属性の発生核との比較実験により、ある程度の検証は可能であろう。ただし、BTT 発生核の影響に関しては後述するように局所的な環境の違いも考慮する必要がある、実験データの単純な比較のみでは不十分である。

金属イオンの溶出に関しては、イオン化傾向がより上位にあるイオンが拡散してくる場合にも、類似した BTT 抑制効果が現れると考えられる。例えば浸漬水から試料中に拡散してきたであろう Ca²⁺および Na⁺に着目すると、それらのイオン化傾向は Ca > Na >> Cu の順であるから、Ca²⁺のほうが Cu のイオン化を阻害しやすい。実際、CaCl₂ 水溶

液のほうが NaCl 水溶液よりも BTT 抑制効果が顕著に現れている。逆に、イオン交換水では BTT の発生・進展が顕著であるが、これは Cu のイオン化を阻害する不純物（アルカリ金属やアルカリ土類金属等）が最も少ないためと考えられる。概略、0.2 mol/kg の CaCl₂ 水溶液または NaCl 水溶液における BTT 抑制効果は、重水 100wt% の場合にほぼ匹敵する（表 4 参照）。

ところで今回のような密閉系課電では、浸漬水の蒸発・揮散（電解質の濃縮）が起きる開放系課電と比較すると、BTT の発生数が著しく減少する⁽⁷⁾。これは、BTT の発生・進展が試料外部すなわち浸漬水のイオン濃度の経時変化に対して極めて敏感に反応することを示している。したがって密閉系課電は、そうした外的環境の変化による影響を受け難く、発生核およびその近傍の水分の振る舞いを考察するのに適した課電方法と言える。なお、発生核に関しては近傍の局所電場の大きさのみならず、XLPE 界面との相溶性等も BTT の発生挙動に大きな影響を及ぼしている可能性があることから⁽⁹⁾、改めて報告したいと考えている。

〈3・4〉 水トリー現象の本質とイオンの役割 最近、界面トリーの発生・進展に対する水（溶媒）の主な役割として、XLPE 中へのイオンの運搬が指摘されているが⁽¹⁰⁾、BTT においても同様の役割があることは容易に類推できる。さらに今回の実験で観察された重水の BTT 抑制効果を踏まえると、水分は微小異物－XLPE 界面におけるイオンの生成（溶出）といった役割も果たしているのは間違いのない。ただし、絶縁体外部からのイオン供給と比べると、密閉系課電の結果が示すように必ずしも効率的とは言えない面もある。いずれにせよ、イオンが重要な鍵を握っていることは確かで、この意味では水トリー現象の本質は水ではなくイオンにあると考えて良い。最近の著者らの実験では、水トリー中の無機不純物に関して、特定の元素の異常な増減や同位体比の有意な変化が観測されるなど、奇妙な振る舞いを示すデータが得られている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。イオン（特に金属イオン）が関与した未知の物理的あるいは電気化学的な反応によって、水トリーが発生・進展するモデルが考えられる。

4. あとがき

CV ケーブルの重要な寿命決定因子の一つであるボウ・タイ状水トリー（BTT）の発生・進展に対する水分の役割について実験的に考察した。今回は、所定の濃度に調整した軽水（H₂O）および重水（D₂O）の混合液体に XLPE 試料を浸漬し、密閉系課電にて BTT を発生させた。さらに、それぞれの液体が有する化学的性質の違いが BTT の発生にどのような影響を及ぼすかを調査した。実験の結果、以下の知見が得られた。

（１） BTT の外観は軽水と重水で特に違いは見られず、形状に関しては水素の同位体の影響は認められなかった

（２） 重水では軽水と比べて BTT の発生数は 1/3 に減少し、最大伸びも鈍化した

(3) 重水には、BTT の発生・進展を抑制する水素の同位体効果が認められた

(4) 重水の BTT 抑制効果は、BTT の発生核として混入した銅粉のイオン化（溶出）を阻害することによって発現していると考えられた

(5) BTT の発生・進展に対する水分の役割として、絶縁体外部からのイオン供給の他に、微小異物－絶縁体界面におけるイオンの生成（溶出）が考えられた

最後に、本実験でご協力頂いた元タツタ電線株式会社の伊達 博氏に感謝いたします。

（平成 17 年 9 月 22 日受付，平成 18 年 1 月 27 日再受付）

文 献

- (1) 畑 良輔：「電力ケーブル技術の変遷」，電学誌，Vol.121，No.2，pp.123-126 (2001-2)
- (2) 絶縁材料・インパルスストリーミング調査専門委員会：「有機絶縁材料における水トリーについて(3)－ボウタイ状水トリー」，電気学会技術報告，I 部，No.134 (1982)
- (3) T. Hashizume, C. Shinoda, K. Nakamura, M. Hotta, and T. Tani : “Influence of Bow-tie Trees on Residual AC Breakdown Voltage of Dry-Cured XLPE Power Cables under Immersed Accelerated Aging Test”, *T. IEE Japan*, Vol.114-A, No.3, pp.258-266 (1994-3) (in Japanese)
橋詰俊成・篠田千春・中村和成・堀田昌弘・谷 恒夫：「浸水課電下における乾式架橋ポリエチレンケーブルの残存破壊電圧特性に及ぼすボウ・タイ状水トリーの影響」，電学論 A, **114**, 3, pp.258-266 (1994-3)
- (4) S. Kuma, K. Soma, and H. Sakaguchi : “Generation Mechanism of Bow-tie Trees and Development of their Suppression Method”, *T. IEE Japan*, Vol.103-A, No.10, pp.45-52 (1983-10) (in Japanese)
隈 彰二・柚謙一郎・坂口春典：「ボウタイ状水トリーの発生機構とその抑止」，電学論 A, **103**, 10, pp.45-52 (1983-10)
- (5) H. Ohno, G. Katsuta, I. Kajiki, K. Kato, Y. Sakaguchi, and G. Tanimoto : “A Study on Electrical Deterioration and Quality Control of XLPE Cable”, Proc. 4th Annual Conf. Power & Energy Society, IEE Japan, No.44 (1993-8) (in Japanese)
大野博伸・勝田銀造・加治木勇・加藤賢司・坂口義則・谷本 元：「CV ケーブルの絶縁劣化と品質管理に関する一考察」，平成 5 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.44 (1993-8)
- (6) Z. Fan, H. Miyata, I. Fujimoto, and T. Niwa : “Relation between Oxidation Ability of Various Ion and Growth of Water Trees”, The Papers of Technical Meeting on Dielectrics and Electrical Insulation, IEE Japan, DEI-97-57 (1997)
- (7) T. Kumazawa, W. Nakagawa, and H. Tsurumaru : “Influence of Water and Ion Diffusion on Generating and Progress of Bow-tie Tree”, *IEEEJ Trans. FM*, Vol.125, No.10, pp.828-834 (2005-10) (in Japanese)
熊澤孝夫・中川 渡・鶴丸秀一：「ボウ・タイ状水トリーの発生・進展に与える水分とイオン拡散の影響」，電学論 A, **125**, 10, pp.828-834 (2005-10)

- (8) 塚本裕一・近藤光興・桜井直行：「重水濃度測定法－新型転換炉「ふげん」発電所における管理技術 2」，動力炉技報，No.30, pp.45-52 (1979-5)
- (9) T. Kumazawa, H. Date, S. Morinaga, and W. Nakagawa : “Characteristic of Bow-tie Water Tree in XLPE Including Contaminants and Voids (1)”, 1998 National Convention Record, IEE Japan, No.343 (1998-3) (in Japanese)
熊澤孝夫・伊達 博・森永清司・中川 渡：「ボウタイ状水トリーの特性について (その 1)」，平成 10 年度電気学会全国大会，No.343 (1998-3)
- (10) Y. Miyashita : “Elucidation for Electro-chemical Degradation of Cross-linked Polyethylene Insulated Power Cable”, *IEEEJ Trans. FM*, Vol.125-A, No.4, pp.385-391 (2005-4) (in Japanese)
宮下芳次：「架橋ポリエチレン絶縁ケーブルの電気化学劣化メカニズムの解明」，電学論 A, **125**, 4, pp.385-391 (2005-4)
- (11) T. Kumazawa, W. Nakagawa, and H. Tsurumaru : “A Study on Behavior of Inorganic Impurities in Water-tree”, *IEEEJ Trans. FM*, Vol.124, No.9, pp.827-836 (2004-9) (in Japanese)
熊澤孝夫・中川 渡・鶴丸秀一：「水トリー中の無機不純物の挙動に関する一考察」，電学論 A, **124**, 9, pp.827-836 (2004)
- (12) T. Kumazawa, W. Nakagawa, and H. Tsurumaru : “A Study on Behavior of Inorganic Impurities in Water-tree”, *Electrical Engineering in Japan*, Vol.153, No.2, pp.1-13 (2005-11)

熊澤孝夫

(正員) 1958 年 6 月 26 日生まれ。1983 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科修士課程修了。同年 4 月中部電力(株)に入社。現在，同社電力技術研究所にて高分子絶縁材料の劣化様相解明や電力ケーブル・機器の劣化診断に関する研究に従事。1995 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。日本原子力学会会員。

中川 渡

(正員) 1948 年 8 月 10 日生まれ。1972 年 3 月大阪大学基礎工学部卒業。同年 4 月タツタ電線(株)に入社。主として，高分子絶縁材料を用いた電力ケーブルの改良・開発と絶縁劣化に関する研究に従事。2005 年 4 月より(社)電線総合技術センターに出向，現在に至る。

鶴丸 秀一

(正員) 1947 年 2 月 2 日生まれ。1969 年 3 月同志社大学工学部工業化学科卒業。同年 4 月タツタ電線(株)に入社。主として，電力ケーブルの開発改良，高分子材料の劣化に関する研究に従事，現在に至る。