Detection of Weak Radiation Involving Generation and Progress of Water Tree

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

Ryouichi Taniguchi Non-member (Osaka Prefecture University)

Keywords : XLPE cable, water tree, bow-tie tree, deterioration, radiation, X-ray, γ -ray

It is well known that generation and progress of water tree in XLPE cable are remarkably influenced by inorganic impurities. We have investigated the behavior of them in water tree and reported the experimental results as follows: (i) the anomalous increase or decrease in several kinds of inorganic elements was observed in water-treed XLPE sample, (ii) a distinctive relationship was found for the mass numbers for the elements, (iii) the isotopic content of the elements such as Zn deviated over 6% from the natural abundance. These results suggest that water tree is concerned with unknown phenomena, e.g., cold fusion or nuclear transmutation in condensed matter.

In order to study the relationship between water tree and these phenomena, we attempted to detect neutron, γ -ray or X-ray involving generation and progress of water tree in XLPE samples. Figure 1 shows configuration of radiation counter (^3He , BF_3 and CdZnTe) and chamber for sheltering from background radiation. The samples, in which fine fibers of absorbent cotton were contaminated as bow-tie tree cores, were immersed in soft or hard water as shown in Fig.2. AC voltage ($\sim 2.7\text{kV}$, 2000Hz) was applied to the samples for about 1000 hours in test cell. Figure 3 shows typical result of radiation counted by BF_3 proportional counter from August 25 to September 14, 2004. Figure 4 shows comparison of energy spectra obtained by BF_3 proportional counter just before observing anomalous count and while observing it in August 26, 2004. For the experiments weak and burst-like radiation seemed to be low energy γ -ray or X-ray was often detected by BF_3 and/or CdZnTe counter. The radiation tended to be detected from the samples in which a lot of water trees were generated by supplying inorganic cations (Mg^{2+} and Ca^{2+}) abundantly. These experimental results also suggest that water tree is concerned with unknown phenomena mentioned above.

Fig. 1. Configuration of radiation counter and chamber for sheltering from background radiation

Fig. 2. Test cell for applying voltage

Fig. 3. Typical result of radiation counted by BF_3 proportional counter from August 25 to September 14, 2004. The arrows show anomalous count

Fig. 4. Comparison of energy spectra obtained by BF_3 proportional counter in August 26, 2004. (a) just before observing the anomalous count, (b) while observing it

水トリーの発生・進展に伴う微弱放射線の検出

正員 熊澤 孝夫* 非会員 谷口 良一**

Detection of Weak Radiation Involving Generation and Progress of Water Tree

Takao Kumazawa*, Member, Ryouichi Taniguchi**, Non-member

It is well known that generation and progress of water tree in XLPE cable are remarkably influenced by inorganic impurities. We have investigated the behavior of them in water tree and reported the experimental results as follows: i) the anomalous increase or decrease in several kinds of inorganic elements was observed in water treed XLPE samples, ii) a distinctive relationship was found for the mass numbers for the elements, iii) the isotopic content of the elements such as Zn deviated over 6% from the natural abundance. These results suggest that water tree is concerned with unknown phenomena *e.g.*, cold fusion or nuclear transmutation in condensed matter. In order to study the relationship between water tree and these phenomena, we attempted to detect neutron, γ -ray or X-ray involving generation and progress of water tree in XLPE samples. For the experiments weak and burst-like radiation seemed to be low energy γ -ray or X-ray was often detected by BF₃ and/or CdZnTe counter. The radiation tended to be detected from the samples in which a lot of water trees were generated by supplying inorganic cations abundantly.

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, 放射線, X線, γ 線

Keywords: XLPE cable, water tree, bow-tie tree, deterioration, radiation, X-ray, γ -ray

1. まえがき

CV ケーブルの主要な劣化形態である水トリーの発生・進展メカニズムについては、これまでも多くの仮説が提案されてきた⁽¹⁾。例えば初期においては、微小突起や異物近傍の電界集中部で発生するマクスウェル応力、あるいは誘電泳動力等に基づいた物理的（機械的）なメカニズムが考えられた。また、近年においては水トリー一部の FT-IR 分析によりカルボニル化合物等の酸化生成物が観測されるに至り⁽²⁾⁽³⁾、その結果、不純物として存在する金属イオンの触媒作用により XLPE（架橋ポリエチレン）が酸化・分子鎖切断に至るとする化学的なメカニズムも考えられている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。他方、水トリーの進展と酸化生成物の間には、一貫した相関性が見られないとして、XLPE や酸素、イオンが関与する未知の化学反応が示唆されるとの報告もある⁽⁶⁾。

こうした背景から、著者らは従来の視点とは一旦切り離

して、未知の発生・進展メカニズムが存在する可能性について、様々な実験により考察を進めてきた。その中で最も注目したのは、水トリー劣化領域でしばしば検出される不純物である。とくに無機元素（金属イオン）は、水トリーの発生・進展に深く関与することが知られており^{(5)~(7)}、メカニズム解明の鍵を握る重要なメッセージが、何らかの“痕跡”として託されていることも考えられる。

既に報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾したように、著者らは ppb オーダで不純物をコントロールしながら XLPE 試料に水トリーを発生させ、試料中に存在する無機元素の濃度や同位体組成比の変化を詳しく調査した。一連の実験では、水トリーが発生した試料において、質量数が特殊な関係にある金属元素の異常な増減（例えば増加した元素は減少した元素より原子番号が 1~2 大きく、微量同位体を除けば質量数は 1~4 程度大きい）や 6% を超える同位体組成比の有意な変化を捉えた。これらの実験結果は、既知の物理的あるいは電気化学的な反応では合理的な説明が困難であり、原子核レベルでの何らかの反応、例えば凝集系核反応⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾の関与を示唆している。

仮にそのような反応が存在・関与するならば、水トリーの発生・進展時に微弱な放射線（X 線、 γ 線あるいは中性子線）が検出される可能性もある。そこで今回は、バックグラウンド（BG）放射線を効果的に遮蔽する特殊なチャンパー内で水トリーを発生させながら、放射線の長時間連続計測

* 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
Electric Power R&D Center, Chubu Electric Power Co., Inc.

20-1, Kitasekiyama Ohdaka, Midori-ku, Nagoya 459-8522
** 大阪府立大学 放射線研究センター
〒599-8570 堺市学園町 1-2
Radiation Research Center, Osaka Prefecture University
1-2, Gakuen-cho, Sakai 599-8570

を行った。この実験では、金属イオンの供給により水トリーが多発した XLPE 試料において、バースト的に発生する γ 線もしくは X 線と思われる微弱な放射線を検出した。本論文では、その実験方法ならびに実験結果について述べるとともに、水トリーの発生・進展と放射線検出の関連性について考察した。

2. 実験方法

〈2・1〉 試料 水トリーの発生・進展時に放射線が検出されるとすれば、極めて微弱であろう。それ故、XLPE 試料にできるだけ多くの水トリーを発生させながら放射線検出を試みるのが効率的と思われる。絶縁体中の微小異物から発生するボウ・タイ状水トリー（以下、BTT と略記）は、界面水トリー（Vented tree）と比べて発生密度を容易に高くできるため、この実験には好都合である。そこで今回は、綿糸（繊維屑）を異物として試料に混入させることにした。綿糸は形状が不定形で電界集中を生じやすく、また予め電解質を含浸させることにより発生起点から直接イオンを供給できるため、BTT を大量発生させるのに適している。

表 1 に綿糸を用いた BTT 発生核 (Type I および Type II) の作製方法を示す。まず脱脂綿に、Type I は硬水（通常のミネラルウォーター）を Type II は軟水（同）を各々含浸させ、さらに液体窒素で冷却後、金属研磨紙 (#240) を用いて微粉化した。大きさは概ね数百 μm 以下である。その後、これらの綿糸粉を熱ロールにより XLPE に混練した（刷毛またはスポイトを用いて分散）。使用した XLPE ペレットは日本ユニカー製 HFDJ-4201 である。なお、綿糸に硬水または軟水を含浸させた理由は、表 2 に示すように両者に含まれる一部の金属イオン (Mg^{2+} , Ca^{2+}) の濃度が大きく異なることから、水トリーの発生挙動の違いによって放射線の計測結果に有意な差が生じることを期待したためである。

これらの綿糸混入済み XLPE と半導電性電極（高压ケーブルの半導電層と同じもの）を用いて、図 1 に示すサンドイッチシート試料をプレス成型により作製した。さらに前処理として、全てのシート試料を 90°C の雰囲気中に 48 時間暴露し、架橋剤分解残渣ならびに水分を除去した（前処理後の水分量は 5ppm 未満である）。

〈2・2〉 課電用セル 後述するように試料の課電およ

び放射線の計測はバックグラウンド放射線を遮蔽する特殊なチャンバー内で連続的に行うため、その間に課電条件が変わることは好ましくない。そこで試料の課電は、図 2 に示す課電用セルを用いて行った。このような密閉系課電においては、浸漬水の蒸発・揮散がないため、溶存している金属イオンの濃度をほぼ一定に保つことができる⁽¹²⁾。ただし、密閉状態のため、①結露等で試料に付着した水滴により閃絡する恐れがあること、②試料の浸水界面部は電界集中が起こり易く絶縁破壊を引き起こす可能性があることから、シリコーンゴムおよびエポキシ樹脂で当該部分を覆い、防水・絶縁補強処理を施した。課電用セルのセッティング方法は、まずセパラブルビーカーに前述の硬水または軟水を注入し、次に Type I または Type II の 2 枚の試料を浸漬した後、セパラブルカバーで密閉した。

表 3 に課電条件を示す。試料および浸漬水の違いにより、合計 4 通りの実験を行った。各試料には、2.6~2.9kV（実

表 2 硬水および軟水の定量分析結果

Table 2. Result of quantitative analysis for hard and soft water.

Sample	Ion concentration [$\mu\text{g}/\text{cm}^3$]			
	Na^+	Mg^{2+}	K^+	Ca^{2+}
Hard water	12.1	87.5	4.18	327
Soft water	12.3	8.65	6.38	13.1

図 1 試料形状

Fig. 1. Construction of XLPE sample.

表 1 BTT 発生核の作製方法

Table 1. Method to make BTT core.

Contaminant	Shape	Density (N/mm^3)	Process
Cotton fiber		6.5~7.3	①Type I : Immersing absorbent cotton in hard water Type II : Immersing absorbent cotton in soft water ②Freezing the absorbent cotton by immersing it in liquid nitrogen ③Powdering it using metal grinding paper (#240) ④Mixing the powder with XLPE pellets using brush or syringe and kneading them by using heated roll machine

効値), 2000Hz の電圧を 800~1100 時間程度印加した。平均電界ならびに周波数については, 6kV 級 CV ケーブルの一般的な周波数加速劣化試験条件を基に決定した。放射線の計測時間は概ね 800~1000 時間である。

〈2・3〉 測定体系 図 3 に測定体系を示す。課電用セルの周囲に配置した ^3He , BF_3 中性子計数管, CdZnTe X線検出器および電圧・電流モニタ等からの各データは外部のコンピュータに送られる。データの記録は, 放射線データについては 3 系統が独立して働く多重波高分析器で解析し, 1 時間毎にエネルギースペクトルを記録した。また電流, 電圧, 温度の各データについては 10 分毎に記録した。

このような放射線計測においては, 電磁ノイズの発生・混入を未然に防止することが極めて重要になる。課電用の高周波電源および課電用セルは, セッティングに何らかの不具合があると部分放電や微小ギャップ放電により電磁ノイズが発生する可能性があるため, アルミ箱で包みシールドを施した。さらに, 放射線計測回路と他の計測・課電回路の各駆動電源を別系統にしたほか, 接地線を分離するなどの対策を施した。

放射線の計測は図 4 に示すように, 1 辺が 1200mm の立方体の鉄箱 (壁面厚は全て 180mm) の中で行い, さらに鉄箱の内外に中性子遮蔽材 (ポリエチレンまたはリチウム入りパラフィン) を多層配置して, 宇宙線

図 3 測定体系

Fig. 3. Measurement system.

図 2 課電用セル

Fig. 2. Test cell for applying voltage.

図 4 バックグラウンド放射線遮蔽用チャンバー

Fig. 4. Chamber for sheltering from background radiation.

表 3 課電条件

Table 3. Condition of voltage application.

No.	1	2	3	4
BTT core	Type I	Type II	Type I	Type II
Frequency	2000Hz	2000Hz	2000Hz	2000Hz
Applied voltage (Mean electric field)	2.9kV (1.8kV/mm)	2.7kV (1.7kV/mm)	2.6kV (1.6kV/mm)	2.7kV (1.7kV/mm)
Duration time	787h	997h	1087h	1019h
Dipping water	Hard water	Hard water	Soft water	Soft water
Volume resistivity	445 Ω cm at 27°C	441 Ω cm at 28°C	4900 Ω cm at 28°C	5050 Ω cm at 16°C

図5 BTT 観察用試料片の採取方法

Fig. 5. Method to collect sample for BTT observation.

図6 BTT 観察結果の一例(No. 1)

Fig. 6. Typical result of BTT observation (No.1). BTT length:1375 μ m

表4 BTT 観察結果および放射線計測結果

Table 4. Results of BTT observation and radiation counting.

No.	BTT core	Dipping water	BTT observation			Average count rate(*)			Frequency of anomalous count
			Number [N/cm ³]	Average length [μ m]	Maximum length [μ m]	BF ₃ Proportional counter [cph]	³ He Proportional counter [cph]	CdZnTe counter [cph]	
1	Type I	Hard water	1232	346	1400	36.9 $\pm$ 6.3	41.6 $\pm$ 6.4	Failure	Low
2	Type II	Hard water	709	308	1125	67.5 $\pm$ 60.9	40.5 $\pm$ 6.6	12.4 $\pm$ 4.7	High
3	Type I	Soft water	840	373	1375	36.4 $\pm$ 6.4	41.9 $\pm$ 6.7	12.2 $\pm$ 4.0	Middle
4	Type II	Soft water	321	299	1225	35.2 $\pm$ 6.6	41.2 $\pm$ 6.7	12.2 $\pm$ 3.5	None
BG	—	—	—	—	—	38.1 $\pm$ 7.7	42.8 $\pm$ 6.5	13.0 $\pm$ 3.6	None

(*)The numbers behind $\pm$ show standard deviation.

に由来する γ 線と中性子の各バックグラウンドを同時に遮蔽するようにした。その結果、 γ 線バックグラウンドを約 1/30 に、中性子バックグラウンドを約 1/6 にそれぞれ減少させることができた。

〈2・4〉 試料の観察 図5にBTT観察用試料片の採取方法を示す。まず、2枚の試料のいずれか一方のBTT発生部分(平等電界部)から、観察体積が一定(約1020mm³)になるように切り出し、これを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 μ m以上のBTTを観察した。

3. 結果および考察

〈3・1〉 試料の観察 図6にBTT観察結果の一例を示す。綿糸は不定形であるため、BTTは通常見られるようなシンメトリックな形状にはならず、大部分は電界の単方向のみに進展する特徴的なものであった。

〈3・2〉 計測結果の概要 表4にBTTの発生状況と放射線計測結果を対比して示す。BTTの発生数については、No.1が最多、No.4が最少で、No.2とNo.3はほぼ中間の水準となっている。また平均伸びと最大伸びについては、いずれもBTT発生核がType IのNo.1とNo.3が大きく、Type

IIのNo.2とNo.4が小さい。総じてBTTの発生・進展は、

$$\text{No.1} > \text{No.2} \approx \text{No.3} > \text{No.4}$$

の順で顕著である。これらの結果から、少なくとも綿糸の含浸もしくは試料の浸漬のいずれかに金属イオンの多い硬水を用いると、BTTの発生・進展が促進され易いことがわかる。特に綿糸の含浸に用いた場合は効果が大きく、これは含浸処理によってBTT発生核から直接イオンが供給されたためと考えられる。典型的な例として、No.1のみ課電開始から20日後に長大なBTTが原因と思われる試料の貫通破壊が起きた。ただし電圧・電流モニタの記録から、これ以降も微小な放電を伴いながら課電が継続されたと推察され、電気分解によるミネラル成分の析出が見られた。

一方、放射線の計測結果については、No.4を除いて頻度の差はあるものの、いずれも異常計数(主としてバースト的な計数増加)が観測されている。3種類の検出器による同時計測にもかかわらず、その殆どはBF₃検出器でのみ捉えられていた。前述のようにNo.4は水トリーの発生・進展が最も緩慢であるが、結果的に異常応答が観測されない唯一の実験となったことは非常に示唆的である。なお、CdZnTe検出器は素子の冷却系が不安定になることがあり、No.1で

は残念ながら正確な計測ができなかった。

〈3・3〉 放射線計数とエネルギースペクトル 図7に、異常計数が最も多かったNo.2におけるBF₃検出器の放射線計測結果の一部を示す。代表的な異常計数(2004年8月25日～27日)を矢印で表示した。また、図8にNo.3におけるBF₃検出器の放射線計測結果を示す。同様に異常計数(同10月25日)を矢印で表示した。これらの異常計数は、いずれも課電直後から数日の間に観測されているが、概して課電初期に観測されやすい傾向があった。

図9に、8月26日に観測されたBF₃検出器の異常計数時におけるエネルギースペクトルを、その直前のものと比較して示した。図10には10月25日に観測された異常計数時におけるエネルギースペクトルを同様に示した。ただ

図7 BF₃検出器による放射線計測結果 (No.2)

Fig. 7. Result of radiation counted by BF₃ proportional counter (No.2). The arrows show anomalous count.

図8 BF₃検出器による放射線計測結果 (No.3)

Fig. 8. Result of radiation counted by BF₃ proportional counter (No.3). The arrow shows anomalous count.

し、計数管の劣化を考慮して標準線源によるキャリブレーションは未実施のため、今回は相対比較とした。いずれのスペクトルも異常計数直前ではほぼ正常であるが、異常計数時には比較的高エネルギーの領域で計数が増大している(低エネルギーになるほど電磁ノイズの可能性が高い)。この領域に着目すると、図9のケースでは中性子を検出している可能性も否定できない。ただし、³He検出器では異常計数が観測されていないことから、同時計数による確認には至らなかった。

なお、CdZnTe検出器については、中性子の検出は原理上困難である(X線またはγ線の検出が可能)。

他方、図10のケースは図9と比べてやや低エネルギー領域の計数増加が見られることから、中性子ではなくγ線もしくはX線を検出している可能性が考えられる。仮にγ線(X線)であるとする、³He検出器はBF₃検出器よりも感度が低いため、異常計数が観測され難くなる。そこで、CdZnTe検出器のエネルギースペクトルに着目した。図11に、図10と同時刻に得られたCdZnTe検出器のエネルギースペクトルを示す。異常計数直前ではほぼ正常であるが、異常計数時には100ch近傍のエネルギー領域で計数が大きく増加しているのがわかる。これらの結果から、BF₃検出器とCdZnTe検出器の双方で同時刻に同一の現象、すなわちγ線(X線)を捉えていた可能性が高い。

ところで、電気トリーでは発生・進展時に部分放電を伴うほか、発生の前駆段階に発光現象(可視領域にスペクトルのピークを形成、部分放電発生時は紫外領域にピークを形成)が観測される⁽¹³⁾。水トリーでは同様の報告はないが、これは、低電界で発生・進展する水トリーの場合、先端の電界集中部での電荷の注入や加速、再結合等が実質的に起

図9 8月26日に観測されたBF₃検出器の異常計数とその直前の計数に対応するエネルギースペクトルの比較

Fig. 9. Comparison of energy spectra obtained by BF₃ proportional counter in August 26, 2004. (a) just before observing the anomalous count, (b) while observing it.

図 10 10月25日に観測されたBF₃検出器の異常計数とその直前の計数に対応するエネルギースペクトルの比較

Fig. 10. Comparison of energy spectra obtained by BF₃ proportional counter in October 25, 2004. (a) just before observing the anomalous count, (b) while observing it.

図 11 10月25日に観測されたCdZnTe検出器の異常計数とその直前の計数に対応するエネルギースペクトルの比較

Fig. 11. Comparison of energy spectra obtained by CdZnTe counter in October 25, 2004. (a) just before observing the anomalous count, (b) while observing it.

きないためと考えられる。その意味では、比較的穏やかな劣化現象と言えよう。しかしながらγ線(X線)の放射を伴うとすれば、観測されるフォトンエネルギーは電気トリ-の場合と比べて桁違いに大きいため、非常に激しい劣化現象と言う一面も併せ持つことになる。しかも既知の物理的あるいは電気化学的な反応では十分な説明が難しい。すなわち、γ線は原子核に基因(X線は原子に基因)するため、従来の分子レベルのアプローチのみでは水トリ-の発生・進展メカニズムの解明が困難になってくることが予想さ

れる。

既に報告⁽⁸⁾⁽⁹⁾したように水トリ-発生試料で観測された無機元素の異常な増減や同位体組成比の有意な変化などは、水トリ-の発生・進展過程で生じた原子核レベルの“副産物”の可能性はある。今回観測された放射線の異常計数は散発的かつバースト的ではあるが、この可能性を支持しているように見える。前述のようにγ線は原子核内部のエネルギー遷移の過程で、またX線は軌道電子のエネルギー遷移の過程でそれぞれ発生する。仮に何らかの反応によりMeVオーダの荷電粒子が生成されたとすると、これが軌道電子と衝突し減速する過程で特性X線が生じるため、その検出は原子核レベルの反応を裏付ける有力な証拠になると考えられている⁽¹⁰⁾。

今回の実験では、表4に示したようにBTTが発生しても異常計数が観測されないケースもあった。著者らは、これまでに1000時間を超えるバックグラウンド(BG; 課電用セルが未課電状態にあるかもしくは設置されていない状態)の測定を適宜実施してきたが、異常計数は全く観測されていない。このことから、異常計数は水トリ-の発生・進展を必要条件(勿論、十分条件ではない)として観測されるのではないかと考えている。ただし、課電初期に観測され易いといった点に関しては、現時点において理由は不明である。

一方、発生する放射線は極めて微弱であるから、XLPEの分子鎖切断を進行させるものとは考え難く(勿論、生体には無害である)、同様に“副産物”の一つと考えれば合理的である。すなわち、水トリ-の発生・進展に不可欠なエネルギーを直接供給するような、原子核レベルの何らかの反応による副次的な生成物と考えるわけである。このように、原子・原子核レベルで水トリ-劣化現象を観測すると多くの興味深い実験データが得られることから、何らかの核的な反応が関与している可能性が示唆される。例えば、0.1MV/mmオーダの局所高電界中を運動する金属イオンとXLPE分子中の極めて豊富な水素原子が関与した未知の反応が考えられる⁽¹²⁾。最近では、水トリ-が発生した課電後のXLPE試料やそれを浸漬した水溶液が放射化されたことを示唆するγ線の計測データも得られている⁽¹⁴⁾。これについては、別の機会に詳しく報告したいと思う。

〈3・4〉 電磁ノイズの影響 放射線計測時にシステムに電磁ノイズが混入すると、放射線の計数値が増加することがあるが、この場合、低エネルギー領域が強調された(持ち上がった)エネルギースペクトルとなる。これが顕著な場合は、S/Nが悪化して真の異常計数が埋もれてしまい、現象が非常に観測し辛くなる。そのため実験方法で述べたように、電磁ノイズの抑制に十分な注意を払った。この効果は、結果的に試料の絶縁破壊が生じたNo.1の実験で評価することができた。

図12に、試料が8月3日に絶縁破壊する直前・直後のBF₃検出器と³He検出器の放射線計測結果を示す。既に述べたように、これ以降も微小な放電を伴いながら課電が継

図 12 試料の破壊前後における放射線計測結果 (No.1)

Fig. 12. Results of radiation counted by BF_3 and ^3He proportional counter before and after breakdown of sample (No.1).

続されたと推察される。この場合、放電に伴う電磁パルスの輻射は避けられず、一部が測定体系に混入する可能性は否定できない。しかしながら、同図に示すように不自然な計数増加等は何ら見られないため、電磁ノイズ対策が十分に機能していたことが実証された。

4. あとがき

CV ケーブルの主要な劣化形態である水トリーの発生・進展メカニズムについては、依然として不明な点が多い。今回は新たな視点に立ってそのメカニズムを検討するため、XLPE 試料に水トリーを発生させながら放射線の連続測定を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

(1) BF_3 中性子検出器ではパースト的に現れる異常計数を観測したが、 ^3He 中性子検出器では全ての試料で異常計数は観測されなかった

(2) CdZnTe X線検出器では同時刻にエネルギースペクトルの変化を観測した

(3) γ 線に対する感度は ^3He 検出器よりも BF_3 検出器の方が高いこと、 CdZnTe 検出器により同時計測したことから検出したのは γ 線である可能性が高い

(4) 異常計数は、イオンの大量供給により多数の水トリーが発生した試料において、課電初期に観測されやすい傾向があった

(5) 水トリーの発生・進展時に原子核レベルの未知の反応が関与している可能性が示唆された

今後は、水トリーの発生・進展時における放射線計測データをさらに蓄積するとともに、エネルギースペクトルを詳しく分析して、放射線の起源・発生メカニズム等について検討する予定である。

最後に、本実験にご協力頂いたタツタ電線 (株) の中川渡

氏 (電線総合技術センターに出向中) に感謝いたします。
(平成 17 年 11 月 25 日受付, 平成 18 年 10 月 23 日再受付)

文 献

- (1) 絶縁材料・インパルスツリー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)ーボウタイ状水トリーー」, 電気学会技術報告, I 部, No.134 (1982)
- (2) R. Ross and J. J. Smit: "Composition and Growth of Water Trees in XLPE", *IEEE Trans. EI*, Vol.27, No.3, pp.519-531 (1992)
- (3) 武藤秀二・丸山義雄:「水トリーの化学的的特性の検討」, 平成 6 年電気学会全国大会, No.399 (1994)
- (4) 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)
- (5) 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)
- (6) A. T. Bulinski, J. P. Crine, B. Noirhoome, R. J. Densley, and S. Bamji: "Polymer Oxidation and Water Treeing", *IEEE Trans. DEI*, Vol.5, No.4, pp.558-570 (1998)
- (7) T. Kumazawa, H. Date, W. Nakagawa, and H. Tsurumaru: "Characteristic of Bow-tie Water Tree in XLPE Including Contaminants (3)", 1999 National Convention Record IEE Japan, No.374 (1999-3) (in Japanese)
熊澤孝夫・伊達 博・中川 渡・鶴丸秀一:「ボウタイ状水トリーの特性について (その 3)」, 平成 11 年度電気学会全国大会, No.374 (1999-3)
- (8) T. Kumazawa, W. Nakagawa, and H. Tsurumaru: "A Study on Behavior of Inorganic Impurities in Water-tree", *IEEE 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 (2004-9)
- (9) 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)
- (10) 高橋亮人・沼田博雄・山田 弘・岩村康弘・大森唯義・水野忠彦・秋本 正: 個体内核反応研究, No.1, 工学社 (1999-12)
- (11) 高橋亮人:「凝集体内核融合の研究」, 核データニュース(日本原子力研究所核データセンター), No.75, pp.38-54 (2003)
- (12) T. Kumazawa, W. Nakagawa, and H. Tsurumaru: "Influence of Water and Ion Diffusion on Generation and Progress of Bow-tie Tree", *IEEE 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)
- (13) K. Kaminaga, N. Yoshifuji, T. Uozumi, J. Yorita, Y. Inoue, and S. Fukunaga: "Study on Deterioration Mechanism of XLPE Cables", *T. IEE Japan*, Vol.117-A, No.1, pp.35-41 (1997-1) (in Japanese)
神永建二・吉藤直久・魚住 剛・依田 潤・井上喜之・福永定夫:「XLPE ケーブルの劣化メカニズムの基礎検討」, 電学論 A, **117**, 1, pp.35-41 (1997-1)
- (14) T. Kumazawa and R. Taniguchi: "Measurement of Radiation Emission Associated with Growth of Water Trees (5) ~Induced Radio-activities in Water-treed sample~, Proc. 2006 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, K16 (2006-3) (in Japanese)
熊澤孝夫・谷口良一:「水トリー発生に伴う放射線の計測(5); 水トリー劣化試料中の微弱放射性核種の測定」, 日本原子力学会 2006 年春の年会, K16 (2006-3)

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月中部電力株式会社に入社。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。日本原子力学会員。2006年電気学会論文賞受賞。

谷口良一

(非会員) 1955年3月28日生まれ。大阪大学大学院工学研究科原子力工学専攻修士課程終了。現在、大阪府立大学産学官連携機構放射線研究センター助教授、電子線加速器の維持管理、開発に従事。研究では、放射線計測、特に放射線画像計測、大線量計測、微弱放射線計測を得意とする。博士(工学)、日本原子力学会員、応用物理学会員、日本非破壊検査協会員。