

活線下部分放電検出装置 PDD-7202

ケーブル・機器開発センター 小川 達也¹

Live-line Partial-discharge Detector PDD-7202

T. Ogawa

運転中のケーブルを対象とした部分放電 (PD) 検出装置を開発した。装置は、部分放電の電流パルスを検出する CT と堅牢なアタッシュケースに収納した信号処理装置およびパソコンで構成され、分割型 CT を運転中ケーブルの接地線にクランプすることで放電パルス信号を検出するものである。

ここでは、放電パルス信号の検出手法と作業性をふまえた装置機能について紹介する。また、実験室での検証結果と実際の活線ケーブルで得られた放電波形の事例から本手法の妥当性を示すとともに、AM ラジオ放送波など、環境ノイズによる測定障害とその対応についても例示する。

A partial discharge (PD) detector for electric cables has been developed. It consists of a CT for PD pulse sensing, a signal processor put into a robust attaché case, and a personal computer. This PD measurement system is usable for cables in service, because the CT can be split open and clamped on an earth line of an existing facility.

This paper describes a method of PD pulse detection in the measurement system and a function which we have given to the equipment for easy measurement. Validity of the system has been verified not only in laboratory but also in fields where PD pulses have been acquired in live lines. We have also studied an effect of noises in the environment, for example, AM radio waves, and a countermeasure to remove the influence.

1. ま え が き

高圧 CV ケーブルは 1960 年代に登場し、その基本特性の有用性だけでなくケーブル設計・製造技術の進歩とあいまって幅広く普及している。普及過程での様々な知見の蓄積と製品としての品質が確保された結果、運用中ケーブルの劣化進行や余寿命は、ケーブル個体の特性よりも、敷設環境や運用条件が重要な影響因子となって決定されると考えられる。そのため、運用 30 年を超えるような線路であっても停電診断において劣化が認められない場合もあれば、敷設環境や運用条件に起因する様々な理由により短い期間でケーブル事故にいたるケースもありうる。また、CV ケーブル創生期の製造品ではあるが適切に運用され現在も運転中である高経年線路や、半導電層にテープを用いた (T-T) 型で水没部では水トリ-発生の可能性が高いケーブルなど、様々なケーブルが混在して運用されている実情も鑑みると、保安規定にのっとった年次点検を含め、随時点検・診断を行うことが重要である。

一方、大工場・プラント等の連続操業設備だけでなく一般生活においても、電力供給が不断であることが求められており、点検・診断のための停電時間が取り難い昨

今、活線診断手法へのニーズが高まるばかりである。

筆者らは、高圧ケーブルの接地線に CT (Current Transformer) をクランプして測定を行う活線下部分放電検出装置 (図 1) の開発・改良を進めてきた^{1) 2)}。

ここでは、装置の検出機構と機能を紹介し、実験室や実線路での適用と問題点とその解決処方等について報告する。

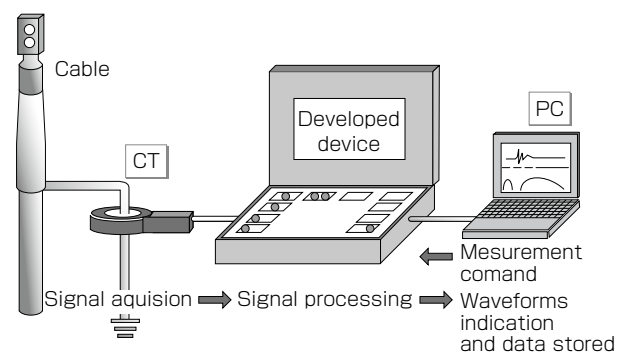


図 1 装置構成と機能
Fig. 1. System and function.

¹ ケーブル・機器開発センター 主席研究員

2. 装置の概要

2. 1 装置の構成

装置は図 2 に示すとおり、持ち運び可能なトランクケースに収納した本体と 2 台の分割型CTで構成されている。

運用時は、図 2 の装置にノートパソコンを接続し、装置の測定動作の制御を行う。また、測定結果の表示や記録を当該のパソコンで行うことができる。

2. 2 装置の機構と検出原理

2. 2. 1 測定方法

測定は、課電された高圧ケーブルの接地線に、分割型CTをクランプして行う。

検出センサーであるCTが分割型であるので、図 3 左図に示すように、運転中の高圧ケーブル接地線にクランプして信号取得することは容易である。また、図 3 右図に示すように、実験室の測定においても、試料を接地する接地線にCTをクランプすればよい。

なお、本手法は放電信号を電流として検出するものであり、図 4 に示すように、電流が流れるための閉回路

が構成されていなければならない。図 4 は、隣接ケーブルやトランス等の高圧機器を介してのパルス循環ルートの例である。ここでは、並列に接続されている隣接ケーブルのサージインピーダンスや巻線浮遊容量を經由して閉回路が形成されている。この場合に、当該ケーブルの接地線にCTをクランプすることで放電信号を検出することができる。

2. 2. 2 ノイズ除去

部分放電検出において、検出原理と同等以上に重要となるのは、ノイズ除去である。

本装置の場合、信号帯域を、200 ~ 400 kHz・2 ~ 4 MHzの 2 域に限定しており、商用周波 (50 Hz・60 Hz) に起因する充電電流などの成分は信号取得の対象外としている。

さらに、本装置では、図 5、図 6 に示すように、測定信号と参照信号の 2 つを使用してノイズ除去を行っている。

ノイズキャンセル機構は、図 6 に示すように、測定用チャンネルである<CH1>と参照用チャンネル<CH2>の常時比較を行い、両チャンネルに類似の形状



図2 部分放電検出装置PDD-7202
Fig. 2. PDD-7202.

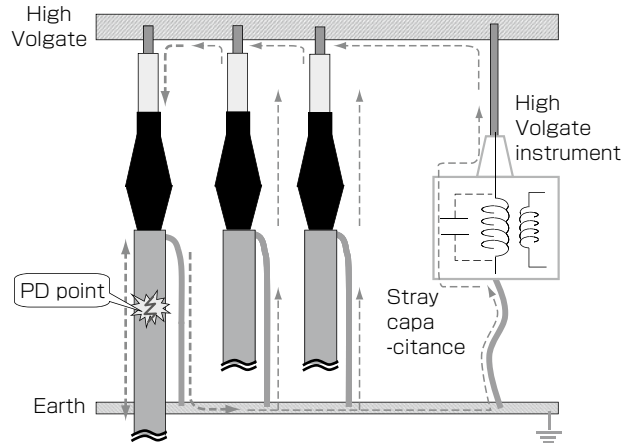


図4 放電パルス電流の循環ルート
Fig. 4. Current flow of PD pulse through grounding wires.

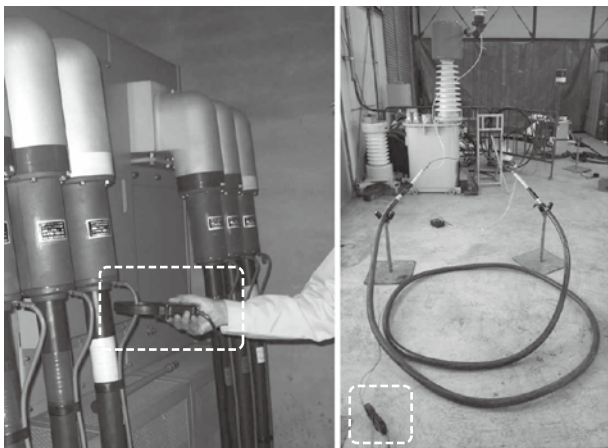


図3 測定風景
Fig. 3. Measurement method.

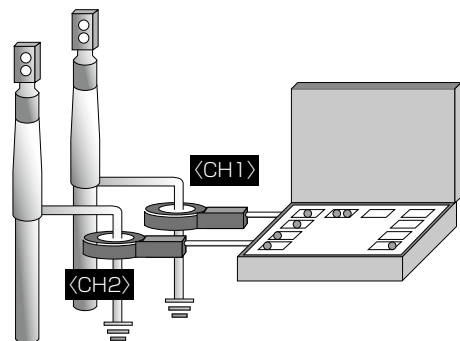


図5 ノイズキャンセル機構
Fig. 5. Noise cancellation.

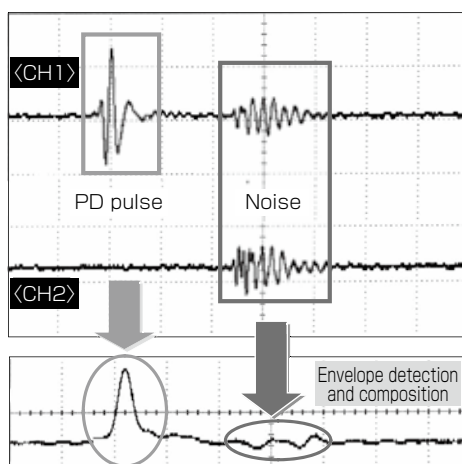


図6 ノイズキャンセル機構
Fig. 6. Noise cancellation.

で同時に生じた信号入力も系統全体への環境ノイズと判断して判別動作から除外する処理を行うものである。

2. 2. 3 部分放電判別機構

本装置の部分放電判別機構は、検出波形を鍵とした判別動作を行うものである。

部分放電信号はnsecオーダーで急峻に立ち上がる持続時間の短いパルス波形である。この波形を本装置で観察すると、図7のような減衰振動波形として観察される。本装置は、この波形の形状や周波数解析した結果の特徴量を要素として部分放電とノイズの弁別を行っている。

図8は、本装置に部分放電の校正パルスを検出させた際のデータである。本装置の信号処理によって、部分放電信号は上段の減衰振動波形として捉えられる。また、取得信号に対して高速フーリエ変換（FFT）による周波数解析を行い下段の結果が得られる。本装置はこれらの形状因子を標準化・一般化して判別動作を行っている。

2. 2. 4 その他の機能

実際の測定・診断の作業性を考慮し、本装置は下記の機能・機構を有している。

- ・装置本体にバッテリーを搭載し、ノートパソコンとあわせて、商用電源なしで測定が行える
- ・測定操作はパソコンから行い、同時に測定対象などについての情報も入力し記録に残せる
- ・測定中の装置の動作は、装置盤面のランプと液晶画面で測定中に確認できる
- ・取得波形はパソコン上で確認でき、さらに、都度の測定結果を専用ソフトでまとめて、報告書を簡単に作成することができる

2. 2. 5 制限事項

この手法には、下記の適用条件や能力上の制限がある。

- ・対象信号帯域（200～400 kHz・2～4 MHz）に甚大かつ連続的なノイズがない環境での適用が前提

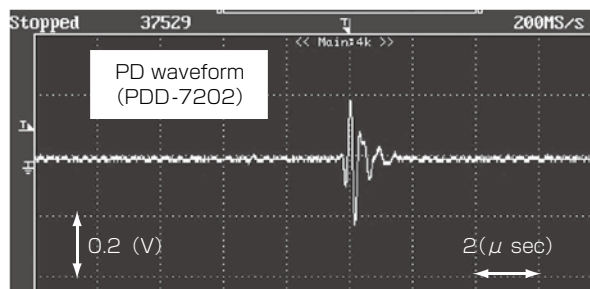


図7 本装置での放電波形
Fig. 7. PD waveform detected by PDD-7202.

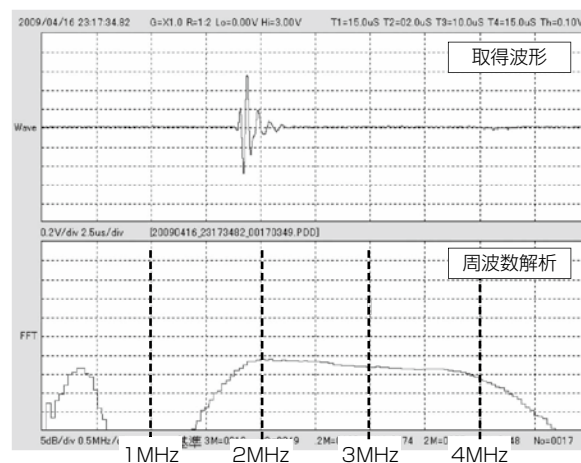


図8 放電波形のパターン（校正パルス）
Fig. 8. PD waveform pattern (Calibrating Pulse).

- ・環境ノイズが無い場合、装置は10 pCの放電信号を検出可能であるが、一般環境では環境ノイズの大きさが上回るため、最小検出感度は測定環境に依存する
- ・運転中ケーブルに適用する場合、作業保安上の理由で校正が行えないため、検出用CTをクランプした位置の信号の大きさ評価となる。つまり、この場合、生じている放電現象と検出信号の大きさに直接的な関係を見出そうとすることは不適切である。
- ・本装置の放電波形定義の基本は純粋な放電現象に基づくものであるため、測定対象系統に接続される高圧機器の開閉サージなども放電波形として捉えられる場合がある。開閉サージは、発生頻度の面で、放電現象と区別できるので障害とはなっていない。また、これまでの様々な実フィールド測定において、インバータなどの連続的なスイッチングを放電と見誤った事実はない。
- ・現時点では、発生源を特定する手法までいたっていないため、複数のケーブルや機器が並列する系統においては、放電発生源は1箇所でも系統の複数箇所放電が検出されることがある。但し、個々のケーブル・機器が1点接地の場合は、当該放電信号が最も大きく観察される接地線の近傍に発生源がある

るものと類推することはできる。

- ・同様に、多点接地やこう長が短いケーブルが存在するような系統においては、放電パルスの伝搬・循環が複雑になるとともに、反射波の問題も生ずるため適用に注意が必要である。

3. 実験室での測定

前掲した図3の右図に示すような、実験室の課電トランスを用いて、様々な試料で放電を発生させて、本装置で検出する手法について紹介する。

図9に示す構成で、種々の放電発生源を設けた2~3mのケーブル試料に、100kV-30kVA課電トランス(ノーコロナ式) <東京変圧器製>にて電圧を印加し、本装置[PDD-7202]にて試料の接地線の信号を観察する。課電前に、校正用パルス発生器[PG-1D<三菱電線製>]を用いて電荷量校正を実施したうえで、課電は部分放電が検出されるまで印加電圧を昇圧する方法を行った。なお、実験室は一般的な建築物であり、特別な電磁遮蔽が施されていない(シールド室ではない)。本装置のノイズキャンセル機構には、別の高圧機器(課電

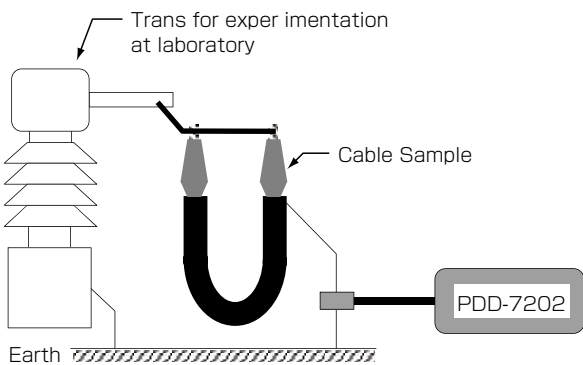


図9 実験室での放電検出
Fig. 9. PD detection at laboratory.

トランス付属のノイズカットトランス)の筐体接地を参照信号源として使用した。

試料は、未使用のCVケーブルを加工して用意したものであり、試料自体の劣化について考慮する必要はない。また、特に断り書きの無い物は、試料端末にはAC 30kVコロナフリー相当の端末加工を施してある。実験結果(表1)の部分放電開始電圧からもうかがえるが、この端末加工を施した試料では、試料端末が部分放電の発生源ではない。

表1に示すとおり、意図的な欠陥を設けた試料はAC印加電圧 数~十数kVで放電が発生することを本装置で観察した。また、印加電圧を上昇・下降させることで、本装置のランプ・LCD画面にて、放電開始・消滅が確認できる。

図10に、課電電圧波形と放電の発生頻度をオシロスコープで観察した事例を示す。放電開始電圧付近では課

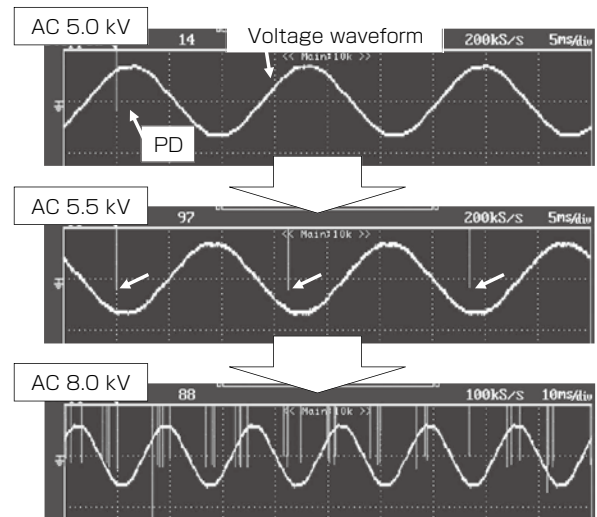


図10 印加電圧と放電発生頻度(PDD-7202)
Fig. 10. Frequency of PD detection (PDD-7202).

表1 実験試料と放電検出結果
Table 1. Experiment samples and PDD-7202 PD detection results.

試料名・処方	外導テープ品	端末電界緩和処理なし	絶縁体に穿孔(孔上絶縁テープ巻)	絶縁体表面欠陥および外導欠損	外導・遮へい断裂
ケーブル種類	6 kV CV 325 mm ² (E-T)	6 kV CV 38 mm ² (E-E)	6 kV CV 38 mm ² (E-E)	6 kV CV 38 mm ² (E-E)	6 kV CV 38 mm ² (E-E)
放電発生源	外部半導電層三角ポイド	ケーブル端末	穿孔部	絶縁体表面欠損部	外導・遮へい断裂部
放電開始電圧	AC 22 kV	AC 5.5 kV	AC 7.1 kV	AC 11.2 kV	AC 3.4 kV
平均放電電荷量 (min, max)	88 pC (72, 100)	118 pC (86, 178)	146 pC (89, 258)	162 pC (92, 216)	179 pC (143, 236)

※写真は、課電時の状態ではなく、加工時の途中経過もしくは類似試料

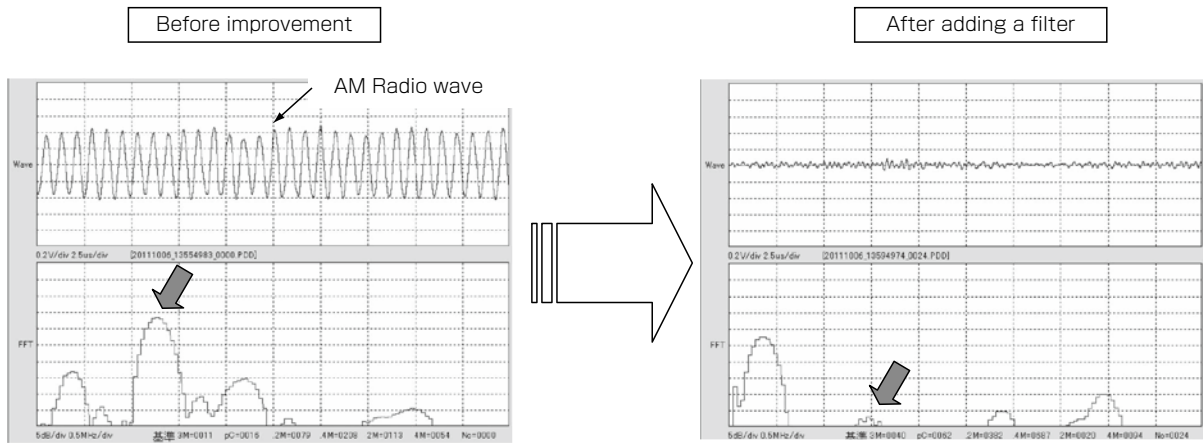


図 11 AMラジオ波による妨害事象とフィルタによる除去
 Fig. 11. Obstruction of AM Radio wave and elimination of AM Radio wave with a filter.

電圧波形の一部の周期だけに放電が観察されるが、印加電圧をさらに上昇させると課電電圧の全周期で放電が発生し、それ以上に上昇させると 1 周期に複数の放電が発生することも観察される。

これらの結果から、本装置の手法で的確に部分放電信号が捉えられていると考える。

4. 実線路での測定

運転中の実線路の本装置での測定は、主に 6 kV 系統で実施している。本装置で運転中部分放電を検出した事例は多数あるが、発生線路の断定（推定）と事後検証（当該線路が運転電圧で放電が出ている状態であったこと、もしくは、劣化が進展し絶縁破壊に至ったこと）まで含めて確認できている事例は現時点でもまだ僅かである。

6 kV 系統において、水トリーが絶縁体を貫通しても状態によっては 3800 V の対地電圧に対して運転可能であることは、現在ではよく知られている。その点では、何らかの事象により絶縁体の一部に欠陥が生じ部分放電が発生しても、絶縁体を貫通するような欠陥への進展や破壊事故に至るまでにタイムラグがあるものと考えられる。つまり、放電が発生している線路が停電診断で異常と判断されない場合がある。また、運転中に放電を検出した線路が引替え更新となる際に、可能な場合には、撤去されたケーブルの劣化度の評価を行っているが、現在のところ検証成果は得られていない。

実線路での異常検出と事後検証も含めた実績の蓄積は今後も継続するところである。

本装置を実線路の測定に適用する場合の最大の障害事項は、環境ノイズである。事例をいくつか紹介する。

本装置の対象信号帯域（200 ～ 400 kHz・2 ～ 4 MHz）の間には AM ラジオ放送（500 kHz ～ 1600 kHz）がある。測定作業において放送波の妨害を受けないよう、当

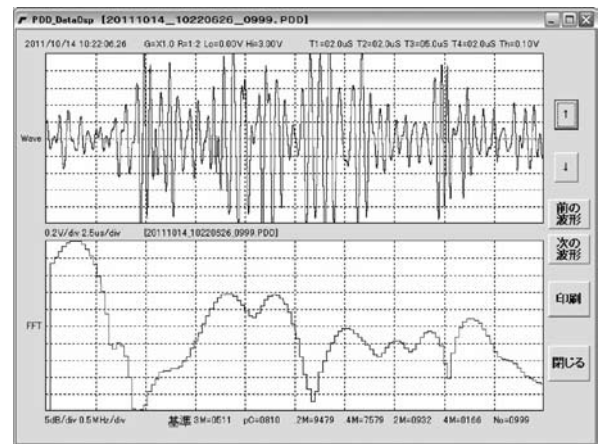


図 12 測定を妨害する実線路ノイズの事例
 Fig. 12. Noise at live line.

該の周波数帯は信号帯域から除外している。

しかしながら、AM ラジオ放送の大出力（100 kW）放送塔の近傍（10 km 以内）の屋外設備において、測定対象系統全体に放送波が重畳していた場合があり、本装置のカットオフ周波数帯であるにも関わらず、測定時に放送波が大きな成分として検出されて測定が妨害されてしまった事例があった。このケースでは、妨害信号の周波数は明確で、装置の対象信号帯域ではないので、当該放送波の周波数を除去するフィルタを適用した。これにより放送波の影響を除いて測定が可能となった（図 11）。

本紙 2.2 項 (5) 制限事項に記したとおり、本装置の対象信号帯域（200 ～ 400 kHz・2 ～ 4 MHz）に、甚大かつ連続的な環境ノイズがある場合、装置は探査する放電波形が環境ノイズに混在してしまうため検出不能となってしまう。

図 12 に示すような波形が観察される系統においては、本装置では測定不能としている。一方で、図 13 は、

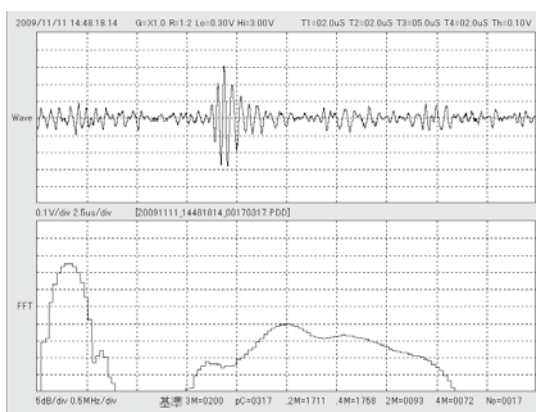


図13 実線路ノイズ中の放電波形の事例
Fig. 13. PD waveform in noise at live line.

環境ノイズと混在しながらも放電を検出した事例である。

全ての環境において適用可能とすることは難しいことではあるが、様々なアイデアを適用し、装置の性能向上・改善を継続している。

5. むすび

高圧ケーブルの接地線にCTをクランプして測定を行う手法の部分放電検出装置について紹介した。本手法の妥当性は実験室検証にて充分確認できたと考えているが、実線路における活線診断の標準的な手法として普及できるよう、今後も様々なフィールドにおいて実績を蓄積するとともに、改良・性能向上を続けていく。

本装置の汎用性を高めるためには、様々なフィールドでの環境ノイズ耐性をさらに向上させることが重要と考えているが、併せて、「部分放電の発生源特定」「部分放電を要素とした劣化度評価の一般化」も要用のテーマとして検討している。

参考文献

- 1) 室伏，小川，新元：「CTを用いた活線下部分放電検出装置の開発」，電気学会 誘電・絶縁材料研究会，DEI-04-56 (2004)
- 2) 小川，新元，浦辺，室伏：「実線路に適用可能な部分放電検出装置の開発」，電学論B，Vol. 127，No. 2pp. 353-360 (2007)