

# 高速データ取得ソリューションが実現する、UHF 部分放電検知による電力網のモニタリング

2021 年 2 月



## はじめに

20 世紀を通じて、電気はどこでも使えるユビキタスなものになり日常生活に欠かせないものとなりました。いうまでもなく、現在の電力供給を支える電力網は非常に複雑です。古いシステムの保守や更改、旧式の設備と新しいグリーン発電ソリューションとの接続、日々変動するエネルギー需要へのサポート、混雑した地域へのエネルギーの長距離輸送、必要基準への適合、そしてこうした課題に取り組みながら、最終的には顧客満足度を向上させる必要があります。このため、ここ数十年間は停電を防ぐ方法について強い注目が集ま

っており、設備に起こりうる問題のモニタリング、予測、および予防などについて集中的に研究されています。こうした問題の検出には、部分放電（PD）という物理現象が用いられます。本稿では、部分放電の概念と利点、そして部分放電をとらえるのに使われる様々な技術を簡単に紹介し、さらに極超短波（UHF）システム、より具体的にはそのデータ取得システムに焦点を当てます。そして、こうしたシステムの構築に適したデータ変換ソリューションを紹介します。

## 部分放電現象と部分放電をモニタリングする理由

部分放電とは、電気装置（ケーブル、スイッチギア、サーキットブレーカなど）の絶縁層で発生する放電のことです。伝送路全体が完全に導通するわけではないので、「部分」という言葉が使われています。



図 1：部分放電

部分放電は電気網の中でも、主に絶縁体（固体、液体、空気）で囲まれた高電圧のかかる部分で発生します。局所的で繰り返し発生するため、時間が経つにつれ累積し、最終的に変圧器、電力ケーブル、ケーブルアクセサリなどが絶縁破壊することになります。絶縁破壊

を予測して防ぐためには、部分放電のモニタリングが有効です。モニタリングすることで利用者への影響を最小限に抑えながら電力網を局所的に中断し、部分放電の早期検出や効果の高い予防的交換を行うことができます。

今日においては、最新式のケーブルの製造工程は十分に確立されており、欠陥品が出回ることはほぼありません。設置する前に検出され、廃棄されることがほとんどです。したがって、部分放電による最も重大な問題は、接続部やケーブルアクセサリで発生します。部分放電のモニタリングは前述の保守計画という面で見れば、どのタイプの電力網にも有益です。また、部分放電の位置を評定することができるため、問題の早期発見と解決も可能です。これは特に地下埋設のケーブルに対して有効な方法と言えます。掘り出す際のコストや道路閉鎖などの影響を考慮しなくて済むためです。

# 高速データ取得ソリューションが実現する、UHF 部分放電検知による電力網のモニタリング

2021 年 2 月



## 部分放電の検出と位置評定の方法

部分放電の検出にはいくつかの方法があり、それぞれに利点や問題点、ユースケースがあります。本稿では極超短波（UHF）帯域に着目します。UHF を使用する場合、短いパルスをとらえて正確に検出するには高速検出システムが必要です。部分放電の代表的な検出方法を表 1 に示します。ここに示した技術については、それぞれに適した装置があることにご注意ください。

例えば、UHF や光学技術は、ガス絶縁（GIS）超高電圧（EHV）の変圧器への使用に適しています。さらに、複数の技術を使用して、モニタリングシステムの性能を総合的に向上させることもあります。それぞれの技術にある様々なユースケース、利点、問題点については、参考文献[A]、[B]、[C]をご覧ください。

技術	利点	欠点
音響／超音波	PD 位置評定 可能	低感度 環境ノイズの影響を受けやすい
VHF（超短波） UHF（極超短波）	高感度 PD 位置評定 可能 低ノイズ／ノイズ緩和 可能	電磁インターフェースの影響を受けやすい
化学	高感度	連続モニタリングには不向き PD の深刻度と検出結果との相関は不明確
光学	高感度 PD 位置評定 可能 電磁ノイズや音響ノイズに影響されにくい	不透明な絶縁体には不適切（ほとんどの液体および固体絶縁体）。

表 1：主な部分放電検出技術の概要

原則として、UHF 部分放電検出器では発生した短い放電パルス（通常ナノ秒程度の持続時間）をモニタリングします。パルス時間が短いため、放電信号は直流から数 GHz の周波数範囲にまで及びます。信号の UHF 部分を使うことには多くの利点があります。この周波数帯では、干渉の影響がほとんどなく、低減させることも比較的簡単にできます。また、最新の UHF センサーやデータ変換技術は高感度なため、UHF 検出システムではより高度な位置評定やデフォルトパターン認識が可能になります。このことにより、電力網のモニタリングでは、影響が発生している場所とその脅威の程度がよりはっきりとわかることになります。部分放電の位置評定には複数の技術を使用します。それぞれの技術には複数のセンシングチャンネルが必要で、各チャンネルでとらえたパルスの異なるパラメータを比較して位置決定を行います。多くのソリューションでは最低でも 4 つのセンシングチャンネルが必要で、1メートル以下の精度で部分放電の位置を特定でき

ます。最も重要な技術は三辺測量です。部分放電の位置からセンシングチャンネルまでのパルス伝搬時間（タイム・オブ・フライト）は、その 2 つの地点の距離と関係しています。異なるセンシングチャンネル間でのパルス到着時間を相対的に比較することで、部分放電の位置を約 1メートル以下の精度で推測できます（文献[D]をご覧ください）。

もう一つの方法は、異なるセンシングチャンネルでとらえた信号強度を考慮し、それに基づいて行うものです。信号の強度は、部分放電の位置からセンシングチャンネルまでの距離と相関があります。このため、異なるセンシングチャンネルでとらえた信号強度を比較することで、部分放電の発生位置を評定できるのです。近年、この技術をカバーする論文がいくつも発表されています（文献[E]、[F]、[G]をご覧ください）。

# 高速データ取得ソリューションが実現する、UHF 部分放電検知による電力網のモニタリング

2021 年 2 月



## 検出性能のカギとなる UHF 受信システム

この受信システムの目的は、部分放電センサーからのアナログ出力を正確に取得することです。この出力信号には部分放電発生情報が含まれています。信号調

整を行った後、アナログ信号をデジタル信号に変換し、部分放電の発生の有無、発生した位置、その他関連するパラメータを特定するための処理を行います。

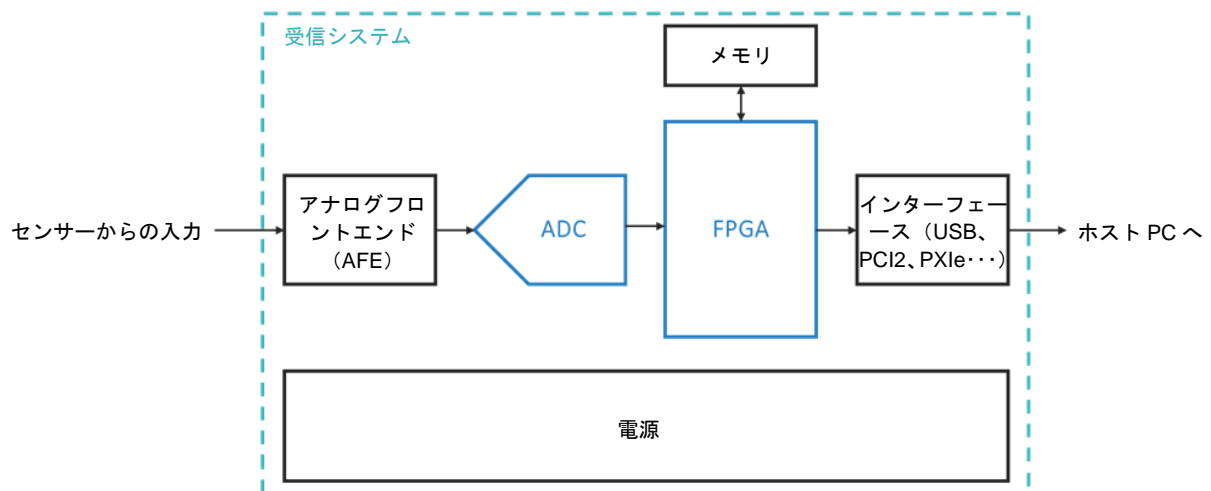


図2：取得システムの概略図

受信システムにおいて最も重要なコンポーネントの一つが、ADC（アナログデジタルコンバータ）です。センサー出力を、ホスト PC で処理可能なデジタルのデータストリームに変換します。部分放電は瞬時に起きる現象なので、UHF コンポーネントの時定数は 1ns 以下になります。このパルスをとらえるためには、ADC の複数のパラメータを考慮する必要があります。

- -3dB アナログ入力帯域幅：パルス周波数を正確にとらえるためには、ADC の帯域幅が十分に高い必要があります。パルス周波数が ADC の帯域幅より高いと、パルスに含まれる情報がシステムによってフィルターされ、抜け落ちてしまいます。大まかに言って、ADC の帯域幅がパルスのコンポーネントの最高周波数に対して 5~10 倍以上であれば、十分な精度で取得できます。パルスの時定数は、以下の式で周波数に換算できます。

$$B_p = \frac{0.35}{T_r}$$

この式の  $B_p$  はパルスの帯域幅、 $T_r$  は 10-90% の立ち上がり / 立ち下がり時間です。この式は RC ローパスフィルター応答に基づくもので、パルスをとらえるのに必要な帯域幅を推定する簡単な方法です。例えば、10-90% の立ち上がり時間が 1ns のときはパルスの帯域幅が 350 MHz となり、パルスを正確に復元するための ADC の -3dB アナログ入力帯域幅は、1.75 から 3.5 GHz である必要があります。

なお、システムが異なれば要件も異なりより高い ADC 帯域幅へのニーズもあり得ます。一般的には、装置から情報を多く引き出そうとすればするほど、パルスを正確にとらえる必要があり、帯域幅の要件も高くなります。逆に、部分放電の有無だけを特定するのであれば、パルス周波数の 2~3 倍という低い帯域幅で十分です。

# 高速データ取得ソリューションが実現する、UHF 部分放電検知による電力網のモニタリング

2021 年 2 月



- 分解能：垂直（電圧）分解能ともいわれるもので、各サンプルの測定値がどの程度正確かを表す指標です。分解能が高いほど、変換の正確さも向上します。例えば、分解能 10 ビットの ADC の場合、フルスケール（入力電圧範囲）の値を 1024 ( $2^{10}$ ) 個に分割できることになります。フルスケールが 1V だった場合は 997  $\mu$ V 刻みで判別が可能となり、理想的な ADC を想定すると、入力信号のサンプリングと変換の垂直誤差は  $\pm 488 \mu$ V の範囲となります。このことから、分解能を 2 ビット上げると、精度は 4 倍になることがわかります ( $2^{12}=4096$ )。より大きなパルスをとらえるためにフルスケールを大きくすると、電圧分解能は低下してしまうため、垂直分解能で理論上の性能が決まることに注意する必要があります。実際には、異なる種類のノイズが ADC の性能に影響します。垂直方向の解像度にはノイズ効果が含まれるため、ENOB（有効ビット数）を考慮するほうが現実的です。また、システムのターゲットにより ENOB の要件も変わります。一般的には、ENOB が高いほど処理は複雑になり、部分放電パルスから得られる情報もより詳細になります。
- サンプリング速度：水平（時間）分解能ともいわれるもので、ADC が 1 秒間にとらえるサンプル数を表します。サンプリングレートが高いほどサンプルの間隔が短くなり、パルスのタイミングの精度が上がります。理論的には、あるパルスを復元するのに必要な最低サンプリング速度は、ナイキスト・シャノンの定理から、 $2 \times Bp$  となります。先ほどの例ではパルスの帯域幅が 350 MHz なので、700 MSps の ADC であれば十分です。繰り返しますが、装置の目的によってこの要件は変わります。部分放電の場所、部分放電エネルギーやエネルギーパターンなど、パルスからより複雑な情報を引き出したい場合は、より高速なサンプリングが必要になります。
- チャンネル数：これは単純に、利用できる取得チャンネルの数です。部分放電システムにおけるマルチチャンネルの主な利点は、4 つのチャンネルが利用できる場合に三辺測量により位置評定ができることです。これに加え、多数のチャンネルがあることで同時測定が可能になります。同時測定は、例えば変電所の制御棟内の全ての部分放電結果を収集したり、遠隔監視のために情報を転送したりするなど、大規模なシステムにおいては利用価値があるとい

えます。

取得システムのもう一つのカギとなるのは、ADC とのインターフェースとなるフロント処理ユニットです。多くの場合、この役割は FPGA（フィールドプログラマブルゲートアレイ）が担います。FPGA は ADC とのインターフェースとなって第一段階の処理を実行し、処理したデータをホスト PC に送ります。そこでデータはさらに後処理されて保存、変換され、部分放電が起きている場合には対応が必要かどうかを決定します。FPGA は並列処理が可能であり、かつ高度なインターフェースオプションがあるため、このような役割に最適です。

さらに、高速 ADC で生成される大量のデータを処理することも可能です。例えば、2 GSps で動作するクアドチャネル 10 ビット ADC からは、80 Gbps から 10 GBps のローデータが生成されます。FPGA は ADC とのインターフェースになり、全てのデータを復元して、第一レベルの処理（例えばデジタルフィルタ、非線形ノイズ抑制、デジタルベースライン安定化など）をリアルタイムで行い、その後複雑なトリガリングに基づき有効なデータを選択します。場合によっては、第二レベルの処理（例えばパルス解析など）も FPGA で実施することもあります。ホスト PC に送信する必要のあるデータをさらに低減させるためです。あるいは、この第二レベルの処理をホスト PC で行うこともできます。

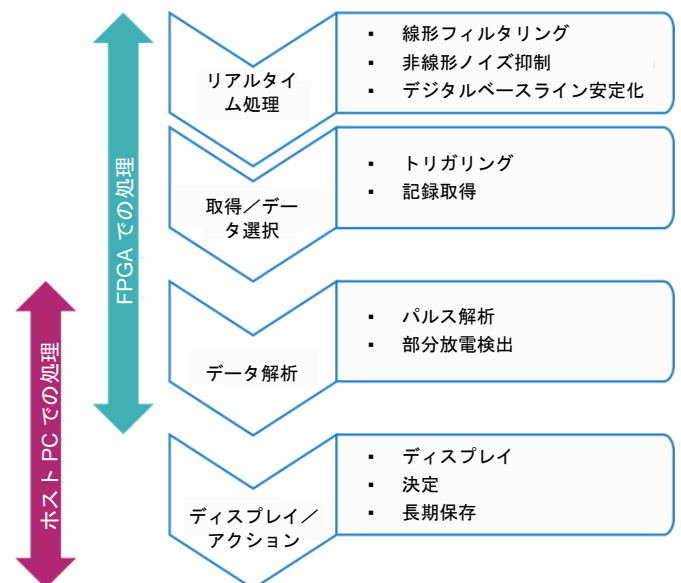


図3：処理ステップ概要



# 高速データ取得ソリューションが実現する、UHF 部分放電検知による電力網のモニタリング

2021 年 2 月



受信システムにおけるこれら 2 つの主要コンポーネントは、エコシステムに囲まれています。そのエコシステムは、図 2 に示すように、アナログ信号を調整するフロントエンド、大量のデータを保存するオンボードメモリ、ホスト PC との専用インターフェース、そしてソリューションのサポートに必要なすべての電源で構成されています。

Teledyne は部分放電装置メーカー向けに、2 種類のソリューションを提供しています。

- Teledyne SP Devices は、高性能のデータ取得ボード（デジタルイザ）を開発しました。これは ADC と FPGA を一つの完全なハードウェアソリューションとして統合したもので、信号のキャプチャと処理をサポートします。このデジタルイザは、センサーとホスト PC とをダイレクトに接続します。また強力

なファームウェアとソフトウェアソリューションもあります。このため、このデジタルイザによって製品設計が加速し、市場への早期投入とプロジェクトレベルのリスク低減がなされることにより、部分放電装置にはさらなる利点をもたらされます。

- Teledyne e2v は、高速アナログ／デジタル・コンバータを開発しています。この ADC により、部分放電装置には注目すべき利点をもたらされます。性能を維持しながらもコストとサイズを抑えることを主眼に置く場合、この ADC は部分放電装置に適していると言えるでしょう。

この 2 つのオプションの詳細は、以下のセクションで説明します。

## TELEDYNE SP DEVICES – デジタルイザ／取得ボード

Teledyne SP Devices はスウェーデンに拠点があり、高速デジタルイザを 15 年以上にわたり開発してきました。高速ソリューションに焦点を当てながら自由度を保つことで、様々なユースケースに対しデジタルイザを最適

化することができます。このデジタルイザは、表 2 にまとめるように、特に UHF 部分放電検出器として有用です。

部品番号	サンプリング速度	チャンネル数	分解能	立ち上がり／立ち下がり開始時間 (10/90%)	入力範囲	フォームファクタ	オンボードメモリ
ADQ8-4X	2/4 GSps	4/2	10	~350ps	0.25, 0.5, 1, 2, 5 Vpp	PXIe	1 GB
ADQ14	0.5/ 1/2 GSps	1-4	14	~300ps	0.25, 0.5, 1, 2, 5 Vpp	USB, PCIe, PXIe, 10GbE, MTCA 4	2 GB
ADQ7DC	5/10GSps	2/1	14	~120ps	1Vpp	USB, PCIe, PXIe, 10GbE, MTCA.4	4 GB



表 2 : UHF 部分放電システムに適した Teledyne SP Devices のデジタルイザ

上記の表にあるように、ADQ8-4X は小型でチャンネル数が多く、コスト面で有利なソリューションです。複数のボードや筐体間のシンクロナイゼーションを 200 ps の精度でサポートし、より広範囲に対応する複雑な検出システムをサポートします。8 チャンネルでサンプリングレートが 1 GSps のモデルもあります

(ADQ8-8C)。ADQ14 は ADQ8 より分解能が高いため、より精度の高いパルス測定が可能です。シングル、デュアル、クアッドチャンネルの構成があります。部分放電の影響のある位置の評定やその程度を知るためには、クアッドチャンネル構成が適しています。

# 高速データ取得ソリューションが実現する、UHF 部分放電検知による電力網のモニタリング

2021 年 2 月



そして ADQ7DC では、より少ないチャンネル数で 10 GSps という非常に高いサンプリング速度を提供しており、高性能、高帯域幅の装置となっています。

この 3 つのデジタイザには、いくつかのファームウェアオプションがあります。また一般的な取得やトリガリング機能のほか、ファームウェア開発キットもあり、ユーザーがオンボードの FPGA にカスタムアルゴリズムを実装することが可能です。ソフトウェア側では、ユーザーフレンドリーな Digitizer Studio GUI を使用して、データの構成、取得、表示、分析、および保存を

簡単に行うことができます。また、API やサンプル設計により、より複雑なシステムや専用システムの要件に合わせてソフトウェアを最適化することも可能です。

さらに、ADQ14 や ADQ7DC はどちらも 10GbE というフォームファクターで提供しています。デジタイザとホスト PC 間で電氣的に絶縁できるため、変電所などの厳しい環境にも使えるという利点があります。光ファイバーを利用することで、PC とデジタイザの距離が長くなっても対応できるため、広範囲に複数の測定点が分散するような大規模な施設にも対応できます。

## Teledyne e2v 社—アナログ／デジタル・コンバータ

フランスに拠点を置く Teledyne e2v は、これまで 25 年にわたって高速データコンバータを開発し、高速クアドチャネル ADC の技術分野で市場を先導してきま

した。代表的な 2 つの UHF 部分放電検出器用 ADC の仕様を、表 3 にまとめます。

部品番号	サンプリング速度	チャンネル数	分解能	立ち上がり／立ち下がり開始時間	データ出力	消費電力	温度範囲	パッケージ
EV12AQ60x	1.6/3.2/6.4 GSps	4/2/1	12	~60ps	ESStream 8 HSSL	6.6 W	0°C to +90°C -40°C to +110°C	CBGA323 (HITCE) 16x16 mm
EV10AQ190	1.25/2.5/SGSps	4/2/1	10	~120ps	LVDS DMUX 1:4	5.6 W	0°C to +90°C -40°C to +110°C	EBGA380 31x31 mm

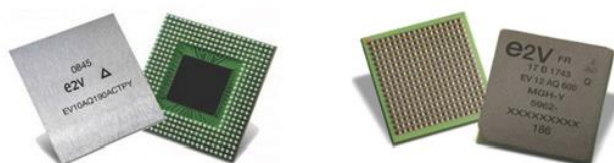


表 3 : UHF 部分放電システムに適した Teledyne e2v の ADC

EV10AQ190 と EV12AQ60x のどちらも、クアドチャネルでそれぞれ 1.25 GSps、1.6 GSps に対応しており、一つの ADC コンポーネントだけで部分放電の位置評定を達成できます。4 つのチャンネルが一つのコンポーネントで実現できると、2 つのデバイスを使用する場合に比べてデバイス間のタイミング誤差が少なくなるので、キャプチャされた部分放電間の比較が優れ、三辺測定の精度が上がります。

EV12AQ60x は EV10AQ190 の進化型で、以下のような利点があります。

- 分解能を 10b から 12b に上げることで、測定精度が上がります。
- シリアルインターフェイスにより、FPGA に接続する際にレイアウトしやすくなります。
- 複数のコンポーネント間でより高度にシンクロナイゼーションする機能により、変電所全体をカバーするような複雑なシステムにはメリットがもたらされる場合があります。

# 高速データ取得ソリューションが実現する、UHF 部分放電検知による電力網のモニタリング

2021 年 2 月



さらに、バイポーラや BiCMOS 技術を選択すると、このような ADC の立ち上がり、立ち下がり、安定時間が非常に高速になり、より正確にパルスをとらえることができます。EV12AQ60x の測定結果を図 4 に示します。表の値は、入力信号の特性の影響が取り除かれ ADC の性能のみが考慮されているもので、ADC の実際の性能を示しています。このような性能から、EV12AQ60x は約 250 ps の立ち上がり・立ち下がり時間で正確で精密な信号測定をサポートします。この測定のセットアップは最適化されたわけではなく、また試験に用いたハードウェアの AC 結合コンデンサによる立ち上がり・立ち下がり時間への影響もあります。このため、ハードウェアを高速なパルスキャプチャに最適化することで、ここに示した結果を上回る性能が得られると予測でき

ます。

一つのデバイスに 4 つのチャンネルがあれば、減衰設定をずらした並列データキャプチャパスを使用してダイナミックレンジを拡張することができます。これにより、測定した信号のダイナミックパフォーマンスを向上させることができます。また、4 つのチャンネルを一つのデバイスに備えることで、チャンネル間の不整合（オフセットやゲイン、フェーズ）の影響や、反射の原因となるインピーダンスの不整合を低減することもできます。このアーキテクチャは複数の ADC の場合にも適用できるので、文献[H]にあるような要求に対しても、ダイナミックパフォーマンスをさらに向上させることができます。

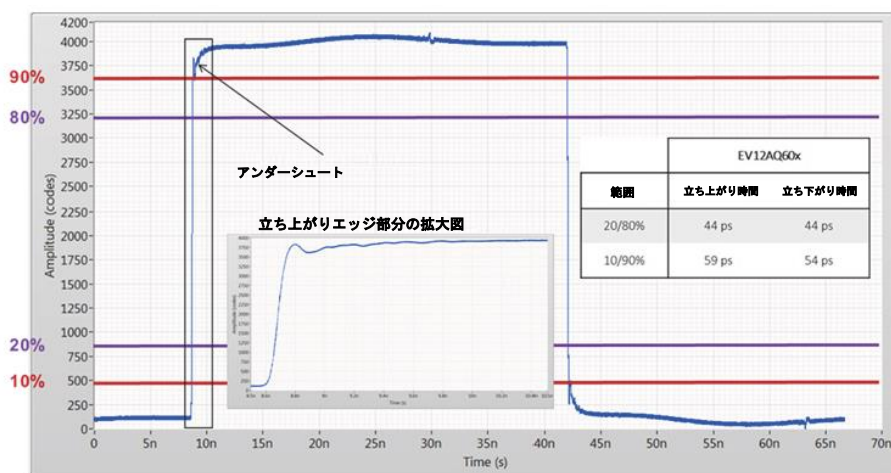


図 4 : EV12AQ600、パルス測定

## 結論

増え続けるエネルギー消費に対応するため、電力網の発電、貯蔵、輸送能力は向上し続けています。このような複雑な設備のモニタリングは、電力網の信頼性向上や影響の大きい障害を防ぐためにも最重要事項です。本稿で述べたように、UHF 部分放電検知は現実的に実行可能なソリューションであり、補完的な技術と統合することで部分放電に関連する問題の検出と予防を可

能にします。これに加え、Teledyne SP Devices と Teledyne e2v では、ハードウェアやコンポーネントレベルでの高速取得システムの要件に適合する商用（COTS）製品を提供しています。こうした製品により、標準的なものから高性能なものまで、UHF 部分放電検出装置の設計をお手伝いします。

## 詳細は以下をご参照ください。

ADQ8-4X 製品ページ: <https://www.spdevices.com/products/hardware/10-bit-digitizers/adq8-4x>

ADQ14 製品ページ: <https://www.spdevices.com/products/hardware/14-bit-digitizers/adq14>

ADQ7DC 製品ページ: <https://www.spdevices.com/products/hardware/14-bit-digitizers/adq7dc>

EV12AQ60x 製品ページ: <https://www.teledyne-e2v.com/products/semiconductors/adc/ev12aq600>

EV10AQ190 製品ページ: <https://www.teledyne-e2v.com/products/semiconductors/adc/ev10aq190a/>

# 高速データ取得ソリューションが実現する、UHF 部分放電検知による電力網のモニタリング

2021 年 2 月



## 参考資料

- [A]: 電力システム装置の部分放電検出における UHF センサーの応用：概論、フア・チャイ、B.T. プン、スティーブ・ミッチェル、Sensors 2019, 19, 1029 (『センサー』2019 年 19 号 1029)
- [B]: 状態モニタリングのための最先端の部分放電解析技術の概要、ミン・ウ、ホン・カオ、ジアンネン・カオ、ハイロン・グエン、ジョアン・バルトロ・ゴメス、ショナリ・プリヤダルシニ・クリシュナスワミ、IEEE Electrical Insulation Magazine, November/December 2015 issue, Vol. 31, No.6 (『IEEE 電氣的絶縁』2015 年 31 巻 No.6)
- [C]: 様々なセンサーを使用する高電圧電力装置に関連する部分放電検出技術の概論、MM. ヤコブ、MA アルサイディ、JR ラシェド、AM ダヒル、SF アティヤ、Photonic Sensors Vol. 4, No. 4, 2014: 325-337 (『フォトニックセンサー』2014 年 4 巻 No.4、325-337)
- [D]: 干渉への耐性を向上した電力用変圧器における部分放電の検出と位置決定のためのセンサーシステム、P. ドレクスラー、M. カップ、P. フィアラ、M. スタインバウアー、R. カドレツ、M. カスカ、L. コチシュ、Sensors 2019, 19, 923 (『センサー』2019 年 19 号 923)
- [E]: 受信信号強度に基づく部分放電位置の評定、H. ムハンマド、P. ラザリディス、D. アプトン、U. カーン、K. ミストリ、B. サイド、P. メイザー、M.F.Q. ヴィエラ、K.W. バーリー、D.S.W. アトキンソン、I.A. グローバ、23rd International Conference on Automation & Computing, 7-8 September 2017 (2017 年 9 月 7、8 日開催の第 23 回オートメーション・コンピューティングに関する国際会議での発表)
- [F]: ワイヤレス UHF センサーアレイによる変電所における新たな部分放電の位置評定法、ゼン・リー、リンゲン・ルオ、ナン・ジョウ、ゲハオ・シェン、シウチェン・ジャン、Sensors 2017 August (『センサー』2017 年 8 月)
- [G]: UHF 信号振幅強度減衰アプローチによる部分放電の位置評定、ティンボ・ジア、ナン・ツェン、アンチン・サン、ペン・リー、チーチェン・ユ、リンゲン・ルオ、2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 486 012123 (2019 年 IOP カンファレンスシリーズ：材料科学とエンジニアリング、486、012123)
- [H]: RFEL により拡張した ADC ダイナミックレンジによる「クラス最上の」製品性能、プレスリリース、Design & Reuse in October 2012 (『設計とリユース』2012 年 10 月)

## お問い合わせはこちら：



Ulrik Lindblad、  
ビジネス開発&戦略  
的マーケティング  
[ulrik.lindblad@teledyne.com](mailto:ulrik.lindblad@teledyne.com)



Marc Stackler、  
セールス&アプリケーションエンジニア、APAC  
[marc.stackler@teledyne.com](mailto:marc.stackler@teledyne.com)



Yuki Chan、  
マーケティング&コミュニケーションマネージャー  
[yuki.chan@teledyne.com](mailto:yuki.chan@teledyne.com)

