

水車発電機固定子巻線絶縁劣化診断への音響・電気ハイブリッド部分放電計測に関する基礎研究

Fundamental Research on Diagnosing Insulation Deterioration for Hydrogenerator Stator Winding Using Acoustic and Electrical Hybrid Partial Discharge Measurements

金子正光・竹之内修

高電圧水車発電機は、数十年間長期にわたり運用している間に電氣的、熱的、機械的や環境的なストレスにより、機器内部の電気絶縁体が絶縁劣化する。そして、絶縁体の絶縁劣化が極限に達すると最終的に絶縁破壊ひいては機器の故障に至ることがある。したがって、水車発電機を長期間運用するに際しては、機器の絶縁劣化、特に高電圧が印加される固定子巻線の絶縁劣化を監視、診断することが重要である。

水車発電機固定子巻線の高経年化による保全対策として、水車発電機固定子巻線の絶縁劣化診断は定期的に、非破壊試験が実施されている。水車発電機固定子巻線絶縁劣化診断では、水車発電機運転電圧以上の電圧を加えるため、水車発電機固定子巻線にとってはストレスとなり寿命を縮める要因となる。そのため、運転中水車発電機固定子巻線の絶縁劣化状況を常時監視するシステム構築が喫緊の課題である。

本論文は、水車発電機を運転した状態で、固定子巻線絶縁劣化時に生じる微小放電（部分放電）（Partial Discharge：PD）を「音響（超音波）絶縁診断法」及び「電気（中性点漏れ電流）絶縁診断法」で検出し、それぞれの部分放電診断手法を活用した音響・電気ハイブリッド絶縁診断技術確立に関する一連の基礎研究成果をまとめたものである。

キーワード：状態監視保全、運転中絶縁診断、水車発電機固定子巻線、部分放電、音響・電気ハイブリッド

目次
I 序論
II A E センサに関する基本特性等
1 A E センサの感度特性
2 A E 法の解析手法と A E センサの選択
III 水車発電機運転履歴・環境・A E 信号特定及び固定子巻線部分放電位置評価システムの開発

	1 水車発電機運転履歴・環境・A E 信号特性
	2 水車発電機固定子巻線部分放電位置評価システムの開発
IV	部分放電の超音波特性と電気特性の比較
	1 実験方法
	2 実験結果および考察
	3 まとめ
V	停止中診断データと運転中診断データとの相関関係
	1 オフライン試験における最大放電電荷量とA E 信号強度の関係
VI	運転中水車発電機固定子固定子巻線の部分放電特性に及ぼす温度と湿度等の環境条件の影響
VII	長期水車発電機連続部分放電特性
VIII	音響・電氣的測定法を用いた水車発電機運転・停止中における部分放電特性
	1 I-水車発電機およびO-水車発電機における中性点接地線漏れ電流およびA E 信号の測定
IX	音響・電気信号ハイブリット水車発電機絶縁劣化診断システムの構築
X	水車発電機固定子巻線の簡易絶縁診断法と絶縁劣化判定例
	1 簡易絶縁診断法
	2 絶縁劣化判定例
XI	総括
参考文献	
研究業績リスト	
付録	
	付録1 本研究で使用したA E センサの仕様
	付録2 本研究で使用したC T センサの仕様
	付録3 共振型センサtype-703の周波数特性例
	付録4 研究対象水車発電機の仕様概要
	付録5 平成14年度から平成21年度までの産学共同研究事業

謝辞

I 序論

現在、地球温暖化をはじめとする様々な環境問題が発生しており、その中で原因とされる二酸化炭素の削減を目指す低炭素社会が注目されている。低炭素社会実現に向けて、水力発電は、発電する際に二酸化炭素を排出しないクリーンな再生可能エネルギーとして再認識されている。しかしながら、現在稼動している水車発電所の水車発電機の多くは、1960年代の高度経済成長期に設置さ

水車発電機固定子巻線絶縁劣化診断への音響・電気ハイブリッド部分放電計測に関する基礎研究（金子正光・竹之内修）

れたので、建設されてから約50年以上経過し老朽化が進み、特に水車発電機固定子巻線の絶縁性能が低下し、更新時期を迎えている⁽¹⁾。

一方、電力の自由化以降、電力会社は更なるコスト削減が求められるなかにおいて、電力設備の円滑な運用と信頼性の確保が極めて重要である⁽¹⁾。

高電圧水車発電機においては、長期にわたり運用している間に電氣的、熱的、機械的や環境的なストレスにより、機器内部の電気絶縁体が絶縁劣化する。そして、絶縁体の絶縁劣化が極限に達すると最終的に絶縁破壊ひいては機器の故障に至ることがある。したがって、水車発電機を長期間運用するに際しては、機器の絶縁劣化、特に高電圧が印加される水車発電機固定子巻線の絶縁劣化を監視、診断することが重要である。

ところで、固定子巻線の絶縁劣化原因としては、絶縁層中のボイド、巻線導体と絶縁層の剥離、巻線電磁振動によるコロナ防止層の損傷、巻線エンド部の電解緩和層や絶縁表面の汚損等が挙げられる。

このように固定子巻線が絶縁劣化している状態で、水車発電機が長期連続運転すると絶縁劣化部位に電気ストレス（電界）が加わるため、部分放電（Partial Discharge：PD）が発生する。この部分放電の発生に伴って高周波数の電位振動、電磁波、光、音が発生する。

従来、水車発電機固定子巻線の絶縁劣化を検出する方法として、運転中（オンライン）による監視手法で固定子巻線に発生する部分放電を電氣的なパルス信号として計測する方法がある。また、従来の部分放電計測手段としては、高周波の電位振動、すなわち電気パルスは巻線導体あるいはアース（鉄心やフレーム）を伝搬して、機器外部で比較的容易に検出できることから、電気パルスの計測が利用されていた。

しかし、電気パルスのみを検出では、水車発電機固定子巻線全体の絶縁劣化傾向を捉えることはできるが、放電劣化箇所を特定することはできない。また、電気パルスは光速に近い速さで巻線導体全体あるいはアース全体を広がる（伝搬する）ことから、測定器の分解能によっては発生源の特定が困難である。さらに、光、電磁波は絶縁層自身や金属(鉄心やフレーム)により伝搬が著しく減衰するため、部分放電の検出が困難である。

ところで、音響信号AE（Acoustic Emission）は、部分放電発生部周辺の絶縁層や鉄心の一部を音速で伝搬・減衰することから、部分放電発生位置の特定に有効であると考えられ、最近ではAEセンサを用いた部分放電検出装置が採用されている。

現在の水車発電機絶縁劣化診断は定期診断時などに水車発電機を停止させて行う停止中（オフライン）診断が主流であり、それらの絶縁劣化診断結果によって、水車発電機の更新時期が考慮されている⁽²⁾。しかし、オフライン絶縁診断では、水車発電機運転電圧以上の電圧を加えるため、水車発電機固定子巻線に対してストレスとなり寿命を縮める要因となることから、水車発電機運転状態で絶縁状態を監視する状態監視保全の技術開発が必要である⁽²⁾⁽³⁾。

このような社会情勢から、著者らは、これまで長期にわたり状態監視保全方式による水車発電機

固定子巻線を対象に絶縁状態の把握・評価する部分放電(PD)に伴う音響信号・電気信号に着目し研究を行っている。

本論文では、宮崎県内の水力発電所の水車発電機4台（N-水車発電機、M-水車発電機、I-水車発電機、O-水車発電機）（付録表3参照）を対象に、2000年12月から2011年6月までの長期間での部分放電によるAE信号の測定を行ったので報告する。また、これまで測定を行うことが出来なかった、I-水車発電機固定子巻線の引出し点付近での水車発電機の1日のAE信号の変化を起動時、および定常運転時に着目し、AEセンサを用いて部分放電によるAE信号検出実験を行った。さらに、水車発電機運転状態で、絶縁劣化時に生じる微小な放電をAEセンサによる「音（超音波）絶縁診断法」とCTセンサによる「電気（中性点漏れ電流）絶縁診断法」で検出し、それぞれの診断手法を活用したハイブリッド絶縁診断技術の基礎研究成果について述べる。

II AEセンサに関する基本特性等

1 AEセンサの感度特性

AEセンサに用いられる圧電素子は、同じ型の素子でも周波数特性の違いがあり、また、温度変化による周波数特性の変化も考えられる（付録表1と付録図1参照）。加えて、各センサのグリス塗布量により感度差が生じることも考えられる。そこで、各種要因によるセンサ感度特性を調べ

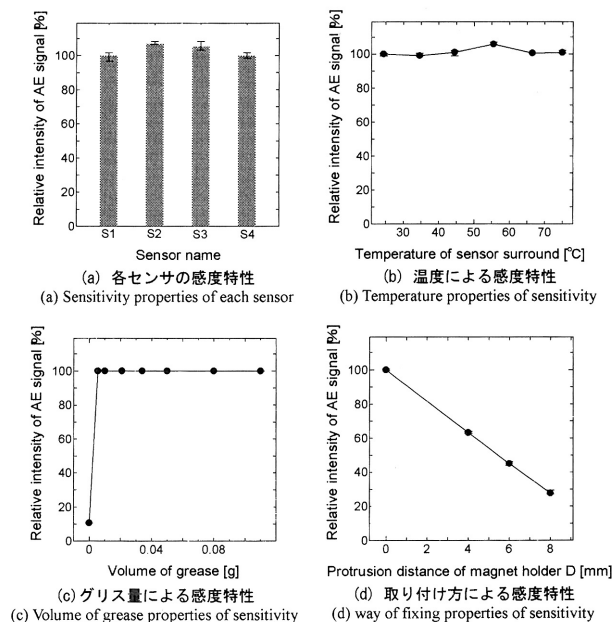
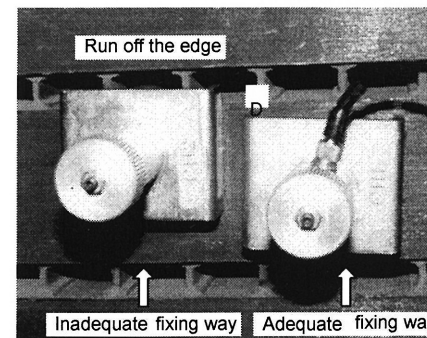


図1 各種要因によるAEセンサ感度特性

た。図1はその結果を示す。図1(a)では使用したセンサ4つを選び感度特性を調べた。同図(b)はセンサ周囲温度を変化させてセンサ感度を調べたものである。これらの図より、センサ固有の周波数特性や温度変化による特性の変化は小さい。また、図1(c)ではグリス塗布量を変化させて感度を調べた。この図から、グリスを塗布しなければ、感度が非常に悪くなるが、塗布すれば量にかかわらず一定値を示した。図2はマグネットホルダーを用いてAEセンサを鉄心外枠に取り付けたときの適切な場合と不適切な場合を示す。ここで、マグネットホルダーの取り付け状態の感度特性を調べるために、図1(d)では鉄心から意図的にマグネットホルダーのマグネット部分をずらした場合の感度特性を調べた。この図から、マグネットのはみ出し距離(D)が大きくなると感度の減衰が著しいことがわかる。これは、マグネット部分が鉄心からはみ出すことによるセンサ受波面と鉄心面の押さえつけ圧力の減少によるものと考えられる。一連の実験により、水車発電機の絶縁診断にAEセンサを適用する場合において、グリスを塗布し、固定子鉄心外枠に適切にマグネットホルダーを取り付ければ、複数のセンサを使用しても同様の感度が得られることがわかった。



* D: Protrusion distance of magnet holder

図2 感度に及ぼすAEセンサ取り付け効果

2 AE法の解析手法とAEセンサの選択

これまでの研究成果から、ロータの回転による振動力や磁気振動、いわゆる機械的ノイズは10kHz以下の低周波領域であることがわかった。そこで、AE信号の強度評価の際、簡便な解析方法として、これまでの解析方法と同様に、計測したAE信号の10kHz以上の周波数帯域をフーリエ変換解析(FFT)から抽出し、包絡線検波を行い、1kHz以下をローパスフィルタ処理した波形の波高値を採用した。

図3に、M-水車発電機を用いて、定格電圧6.6kVで測定したAE信号の原波形並びに原波形の10kHz以下の低周波帯域成分をカットするフィルター処理の波形（以下、フィルター処理波形という）の例を示す。AE信号は、部分放電に伴う音響パルスが気中および固定子鉄心を経由して伝播するが、本実験では、一番大きなAE信号パルスが出現する位置においたAEセンサの解析結果を中心に述べる。さらに、図3の波形データを基に、FFT解析したスペクトル強度分布を図4(a)に、そしてウェーブレット変換で解析したウェーブレット変換分布を図4(b)に示す。ここで、簡単にウェーブレット変換の解析について述べる。ウェーブレット変換とは、周波数変換の一種であり、周波数が増える位置の情報を容易に取り出されるところに特長があり、近年、ウェーブレット変換

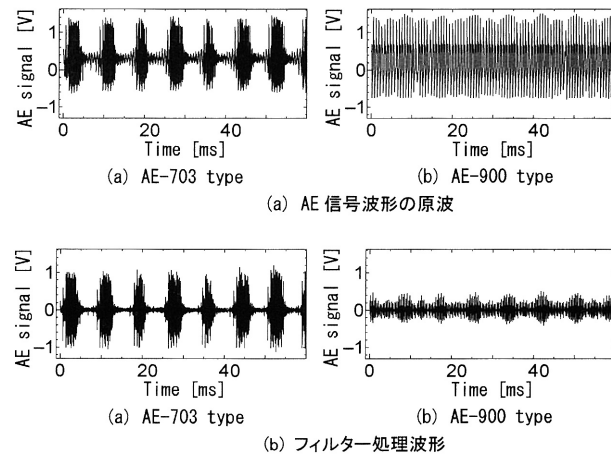


図3 70kHz共振型と広帯域型のAEセンサを用いたときのAE信号波形の原波形とフィルター処理波形の例

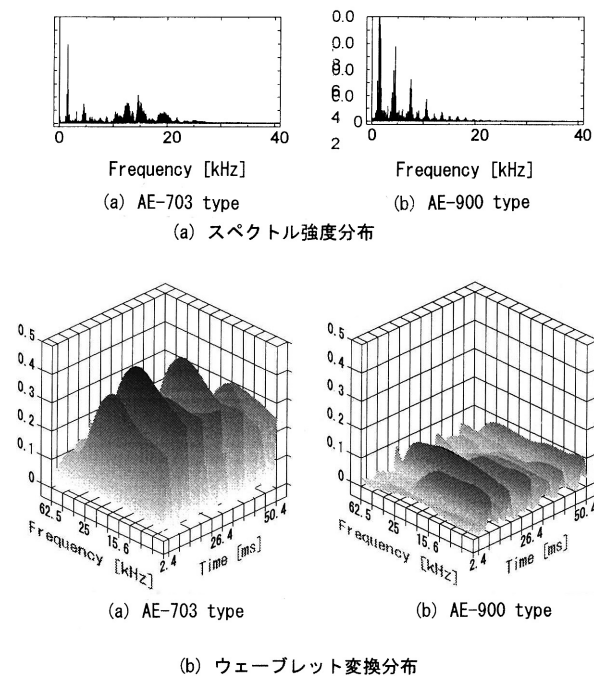


図4 図3のスペクトル強度分布とウェーブレット変換分布

の解析手法を絶縁劣化診断に適用する試みに行われている。図4(b)からわかるように、ウェーブレット変換解析することで、これまでのFFT解析手法より比べて、AE波にどのような周波数成分

がいつ発生したのかを視覚的に捕らえることができる。また、ウェーブレット変換の結果から、部分放電が周期的に発生していることを確認できるとともに、25～30kHzの周波数成分が部分放電によるAE波の信号に対応しているがわかる。これらの図から、703型と900型のAEセンサの特性を比較すると、本研究では、703型のAEセンサの方が900型のAEセンサより高精度に部分放電を検出することがわかった。そこで、本研究では、703型のAEセンサを採用した。

III 水車発電機運転履歴・環境・AE信号特定及び固定子巻線部分放電位置評価システムの開発

1 水車発電機の運転履歴・環境

図5にM-水車発電機の出力と巻線温度の時系列特性例を示す。図5に示すように、水車発電機の出力（図中の記号：△）と巻線温度（図中の記号：□）は、水車発電機の冷却方式によってその特性は異なるが、水車発電機の起動とともに固定子巻線温度は急に上昇し、水車発電機の定常運転時には固定子巻線温度は高温の

一定値に落ち着くようになる。

この場合、固定子巻線温度の上昇特性は周囲温度の影響を受ける

とともに、水車発電機の停止時間にも影響を受ける。図6に、8月5日～8月11日における水車発電機の出力と固定子巻線温度の時系列特性を示す。落雷の影響で、8月6日と7日の18時頃、急に水車発電機が停止した。その後、直ちに水車発電機を起動している。なお、水車発電機の停止時間を整理して、図中(a、b、c、d)にまとめて併記した。ここでは、停止時間の長い場合として、204時間も水車発電機が停止している場合(図6中の(a))と停止時間が0.3時間と短い場合(図6中の(b))のAE信号特性の結果について検討した。

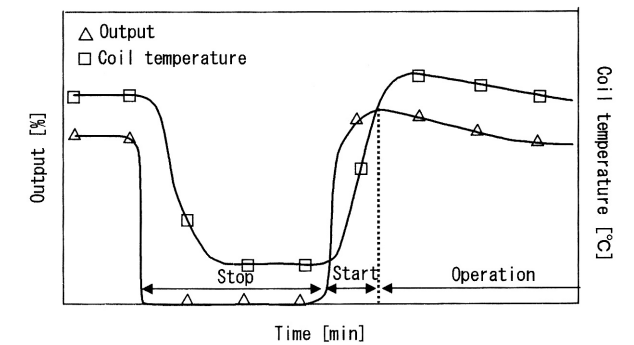


図5 M-水車発電機の出力と巻線温度の時系列特性例

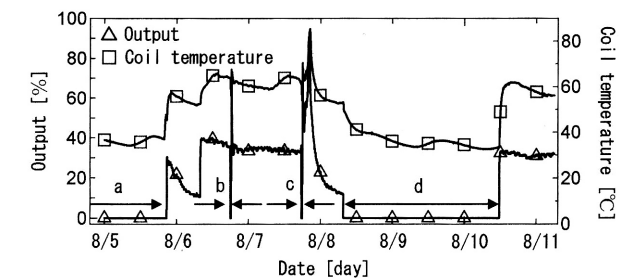


図6 8月5日～8月11日における水車発電機の出力と巻線温度の時系列特性

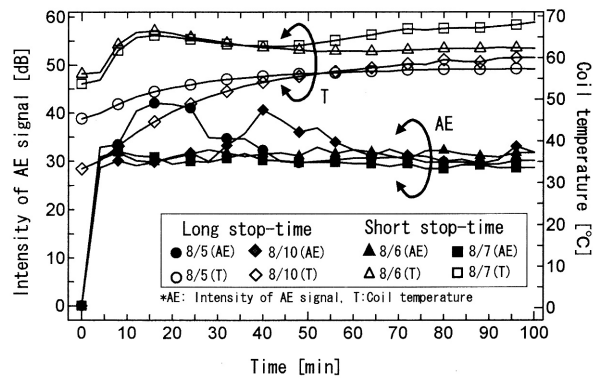


図7 水車発電機運転履歴の各起動時 (a, b, c, d) におけるAE信号強度と巻線温度の時系列特性

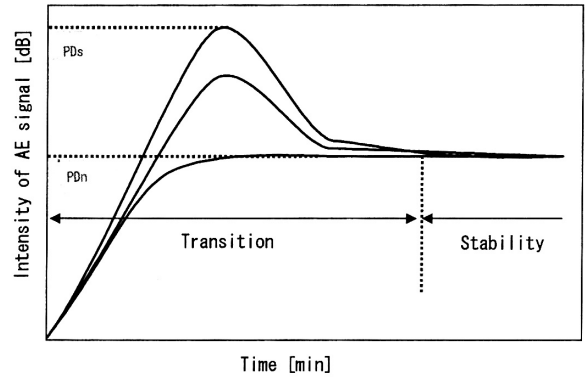


図8 起動時におけるAE信号強度特性の略図

水車発電機では、停止時間が長い場合、AE信号強度は固定子巻線温度の増加とともにAE信号強度は増加するが、約50℃の固定子巻線温度でAE信号は最大となったのち、減少することがわかる。一方、水車発電機の停止時間が短く、固定子巻線が高温乾燥されている場合は、高温になるほど、AE信号はゆるやかに減少する傾向を示す。

固定子巻線の部分放電に及ぼす固定子巻線温度の影響は、B種絶縁交流電気子の絶縁抵抗特性がよく知られているように、通常乾燥運転の初期には温度上昇によって絶縁抵抗が減少し、乾燥が進むにつれて上昇し、その後絶縁抵抗値が飽和する特性と類似する⁽¹⁾。また、絶縁物が吸湿するとイオン伝導が著しくなり、温度上昇によりtan δの増加の度合も大になることが知られている⁽¹⁾。すなわち、この特性は、水車発電機停止中に固定子巻線が吸湿され、起動から固定子巻線温度が上昇するにともな吸湿されていた水分が蒸発し、絶縁低下が顕著に出現して部分放電が活発に生じたことによると考えられる。従って、過渡期におけるAE信号特性は、固定子巻線の絶縁劣化程度を

図7に、M-水車発電機運転履歴の各起動直後 (a, b, c, d) におけるAE信号強度特性をまとめて示すとともに、そのときの固定子巻線温度も併記する。この図から水車発電機の停止時間が長いほど起動直後のAE信号強度の最大値は高くなる傾向を示すとともに (図中の記号●と◆)、水車発電機の停止時間が短い場合は (図中の記号▲と■)、起動直後のAE信号強度は直ちに一定値に落ち着くようになる。これらの特性を図的に表示すると図8のようになる。ここで、図中に過渡期におけるAE信号強度の最大値をPDs、また、安定期におけるAE信号強度の平均値をPDnで表示する。

次に、停止時間をパラメータに、一連の測定結果を整理した結果を、図9にAE信号強度対固定子巻線温度特性として示す。この図からわかるように、実験条件下の水

示す重要な一つの指針になると考えられる。一方、固定子巻線が高温の状態の水車発電機が運転している場合、水分が十分に蒸発した安定期においては、絶縁状態が回復し、AE信号強度は一定に安定することが、一連の測定結果から確認できた。

2 水車発電機固定子巻線部分放電位置評価システムの開発

電力機器の状態監視において最大PDの発生位置を検出し、監視する重要性が増している。また、水車発電機における絶縁劣化位置の評定において、固定子巻線の劣化箇所が一部あるいは全体的なものを調べるには、固定子巻線の取替計画を考えるうえで重要となる。

表1はAE法による電力機器の位置評定の方法⁽²⁾⁽³⁾を示す。この表に示すように、AEセンサを用いたPD発生位置検出には、各センサ間に到達するAE波の伝搬時間差により算出する方法がある。しかし、水車発電機の場合、大小のPD発生位置が複数個ある場合があり、また、変圧器やGISに比べて機器が大型であるのでPDによるAEの伝搬経路が長くなり、PDによるAEの減衰が著しい。そのため、複数のAEセンサを用いて特定のPD信号の伝搬時間差でその発生位置を算出するのは困難であると考えられる⁽²⁾⁽³⁾。そこで、本研究ではPDによるAE波の減衰特性を考慮し、複数のAEセンサを用いて水車発電機全体を監視できるように取り付け、最大PD信号を検出したセンサ位置付近にセンサを集中させ、最大PD発生位置を信号の大きさに直接検出する方法を行った。この方法を行うことで最大PD発生位置に最も近い鉄心位置にセンサを取り付けることが可能となり、より確実な水車発電機の絶縁状態把握につながる事が可能となった。

本研究では、計測したAE信号のマシンノイズをカットし、現場で即座にPDによるAE信号強度を調べることのできるコンパクトで可搬性に優れた部分放電位置評定システムを開発した。そし

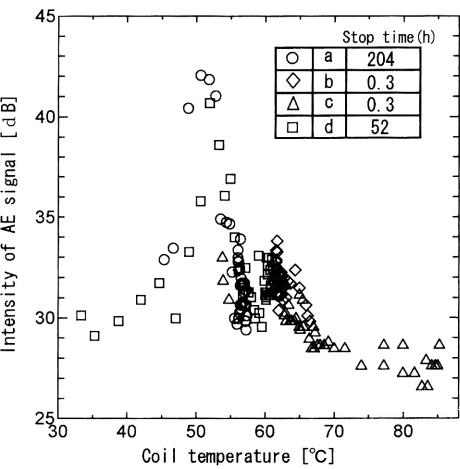


図9 停止時間をパラメータとしてAE信号強度対巻線温度特性

表1 AE法による電力機器の部分放電発生位置評定

Power Apparatus	Method of location of PD
Hydrogenerator	Intensity of AE signal
Transformer	Arrival time interval of AE signal
GIS	Arrival time interval of AE signal

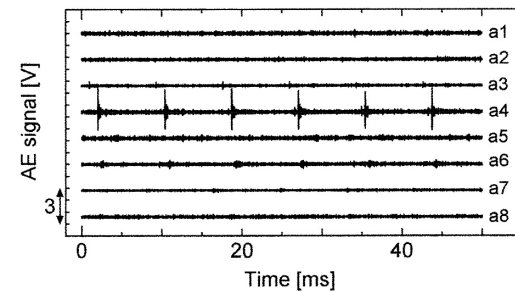


図10 PDによるAE信号のフィルター処理波形例
(10kHz以下カット、センサ間隔2m)

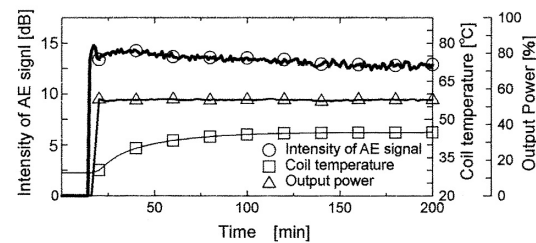


図11 AE信号強度及び巻線温度、出力の時系列特性

定子巻線温度、出力の時系列特性である。この図から水車発電機起動時にAE信号強度は約15dBのピークを示した後に、定常運転時では平均して約13dBの安定した値を示すことがわかる。このことから、定常運転時のAE信号を多く測定し平均を取ることで、複数のAEセンサ間で部分放電によるAE信号強度の比較を行い部分放電発生位置の推定をすることができると考えられる。

図12に各取り付け位置でのAE信号強度の強さを表す。図中において定常運転時のAE信号強度を200回測定した時の平均値及び誤差値を示す。この図からa4の位置が最も高いAE信号強度を示

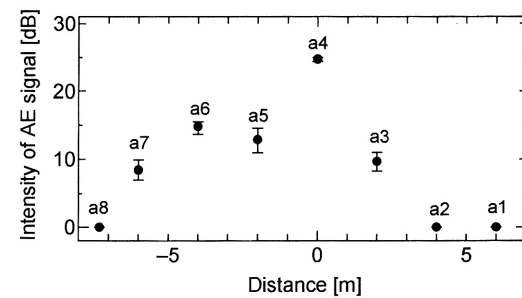


図12 センサ間隔2mにおけるAE信号強度の水平位置特性

て、本装置を用いてPD信号レベルが平均して一定である水車発電機定常運転時に、複数の場所において固定子巻線の部分放電によるAE波を計測し、水車発電機固定子巻線における部分放電の発生位置を推定した。

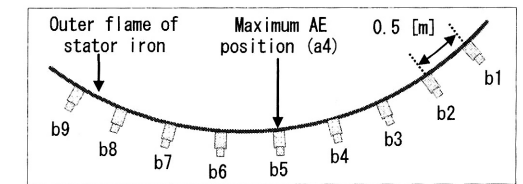
図10はI-水車発電機運転中にAEセンサを2m間隔に取り付けた時の各センサにおけるマシンノイズをカットしたフィルター処理波形の例である。この図から、a4の取り付け位置の波形において運転中水車発電機固定子巻線の位置で発生する部分放電が最も顕著に現れていることがわかる。図11は取り付け位置a3で、起動から定常運転における水車発電機のAE信号強度と固

定子巻線温度、出力の時系列特性である。この図から水車発電機起動時にAE信号強度は約15dBのピークを示した後に、定常運転時では平均して約13dBの安定した値を示すことがわかる。このことから、定常運転時のAE信号を多く測定し平均を取ることで、複数のAEセンサ間で部分放電によるAE信号強度の比較を行い部分放電発生位置の推定をすることができると考えられる。

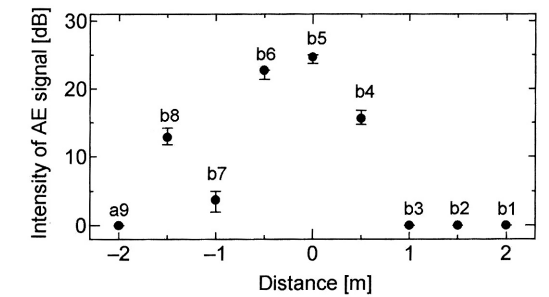
次に、図12から位置a4が最大部分放電発生位置に最も近いと推測できるので、図12の位置a4を中心に0.5m間隔でAEセンサを配置した。図13(a)にa4（ここではb5とした）を中心に0.5m間隔でAEセンサを配置した場合の固定子鉄心外枠へのAE

センサ取り付け位置の概略図を示す。また、図13(b)に、0.5m間隔でAEセンサを配置したときの定常運転時においてAE信号強度を200回測定した時の平均値と誤差値を示す。この図からb5の位置が最も高いAE信号強度を示しており、位置b5が固定子巻線の最大部分放電発生位置である。0.2m間隔でAEセンサを配置して、定常運転時においてAE信号強度を200回測定した時の平均値と誤差値を示す。この図からc5の位置が最も高いAE信号強度を示しており、位置c5が固定子巻線の最大部分放電発生位置に最も近いことが推測できる。次に、図14(b)から位置c5が最大部分放電発生位置に最も近いと推測できるので、c5（ここではd5とした）を中心に0.1m間隔でAEセンサを取り付けた。図15(b)に、0.1m間隔でAEセンサを配置して、定常運転時においてAE信号強度を200回測定した時の平均値と誤差値を示す。図15(b)よりd6の位置が最も高いAE信号強度を示しており、位置d6が固定子巻線の最大部分放電発生位置に最も近いことが推測できる。

一連の結果により、水車発電機固定子巻線外枠にAEセンサを同じ高さ位置に複数回取り付けを行い、部分放電によるAE信号強度を測定し、その強度を比較することで水車発電機固定子巻線から発する最大部分放電の水平方向の発生位置を推定する

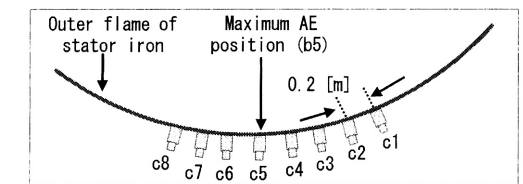


(a) Setting position of AE sensor

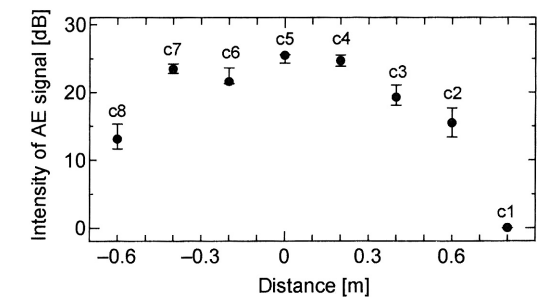


(b) Intensity of AE sensor at each position

図13 センサ間隔0.5mにおけるAE信号強度の水平位置特性



(a) Setting position of AE sensor



(b) Intensity of AE sensor at each position

図14 センサ間隔0.2mにおけるAE信号強度の水平位置特性

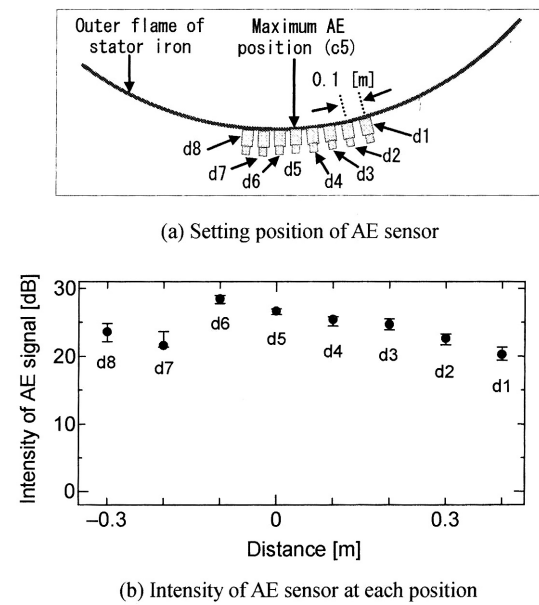


図15 センサ間隔0.1mにおけるAE信号強度の水平位置特性

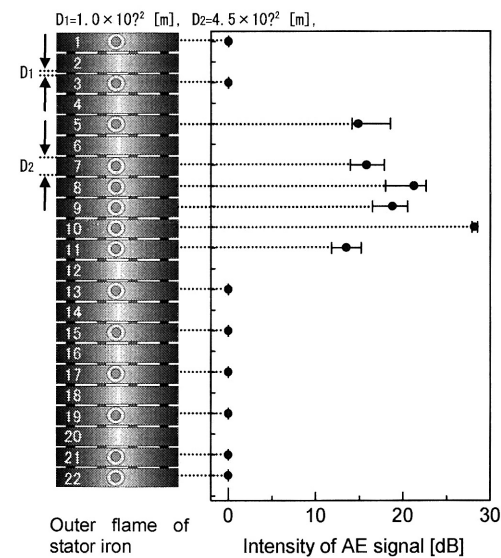


図16 各センサにおけるAE信号強度の垂直方向特性

ことができた。

続いて、水平方向で、最も強い部分放電によるAE信号を検出した取り付け位置d6における垂直方向の部分放電によるAE信号強度の比較を行った。図16に位置d6（図15中の固定子鉄心外枠10番目の位置にあたる）の垂直方向にAEセンサを取り付けて、部分放電によるAE信号強度を調べた結果を示す。垂直方向は固定子鉄心外枠が、全22層からなっており、センサの数に限りがあることから、2回に分けて測定を行った。センサの取り付け位置を図16中の左図に示す。図16のAE信号強度は垂直方向のAEセンサ取り付けを行ったときの、定常運転時におけるAE信号強度を200回測定した時の平均値と誤差値を示す。図16のAE信号強度より鉄心外枠10番目の位置が最も高いAE信号強度を示しており、鉄心外枠10番目の位置が固定子巻線の最大部分放電発生位置に最も近いことが推測できる。従って、この図から鉄心外枠10番目の中間位置で最も大きいPDが発生していることがわかる。

図17は約4ヶ月間の運転データを整理して、水車発電機巻線温度対定常運転時のPDによるAE信号強度の平均値の特性を示す。この図から分かるように定常運転時のPDによるAE信号の平均値は固定子巻線温度の上昇とともに増加し、相関が見られる。このことから、定常運転時の

PDによるAE信号の平均値は固定子巻線温度が高いほど大きな値に落ち着くことが分かる。ここで、鉄心外枠10番目の位置で最も大きいPDによるAE信号強度を検出した原因として、I-発電所では水車発電機の上下から空気を取り込みその外部取り込み空気により固定子巻線を冷却している。そのため、固定子端部は冷却方式による冷却効果が著しいが、それに対して、固定子の中間位置では最も温度が高くなり、熱的な劣化が進展したと考えられる。

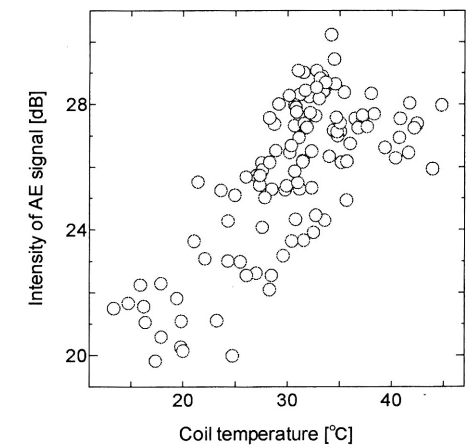


図17 定常運転時における平均AE信号強度対巻線温度特性

IV 部分放電の超音波特性と電気特性の比較

運転中の水車発電機固定子巻線における絶縁劣化診断基準の確立を行うためには、固定子巻線の部分放電による超音波（AE）信号と電気的特性の相関関係を解明する必要がある。そこで、著者らはAEセンサを用いて模擬ボイドの位置を変化させ、部分放電によるAE信号と電気的特性の相関関係を検討した。

1 実験方法

図18にボイド位置のモデル図を示す。電極として平板銅電極（直径30mm）と鉄板（100×300mm）を使用した。電極系として、厚さ3mmの試料（アクリル板）二枚と3mmの孔をあけた厚さ1mmの試料1枚を重ね合わせることで、ボイドの位置を絶縁層内、高圧側、低圧側と変化した。そして、AEセンサを鉄板に直接取り付け、交流電圧（60Hz）印加におけるAE信号強度と最大放電電荷量（ Q_{max} ）と

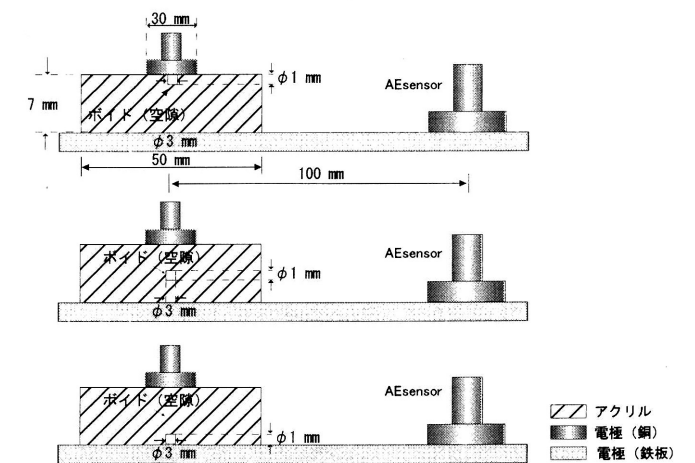


図18 ボイド位置モデル図

の同時測定を行った。

2 実験結果および考察

解析方法として、AE信号波形にフィルター処理を行い、正極性と負極性それぞれの波高値をAE信号強度としている。絶縁層内ボイド位置における波形例として、図19に印加電圧12kVにおける ϕ -q-n特性図及びAE信号波形を示す。また、図20に各印加電圧における Q_{\max} 対AE信号強度特性を示す。この結果から、正極性、負極性共にAE信号強度は Q_{\max} の上昇と共に増加し、相関が見られることがわかる。また、正極性の場合、印加電圧9kVまでは Q_{\max} 、AE信号強度共に、低圧側ボイド、絶縁層内ボイド、高圧側ボイドの順に大きな値を示すが、印加電圧10kVを越えるとその特性は見られないことがわかる。負極性の場合は、 Q_{\max} 、AE信号強度共に、高圧側ボイド、絶縁層内ボイド、低圧側ボイドの順に大きな値を示した。これは、ボイドが高圧側では負極性の Q_{\max} が大きくなり、絶縁層内では、正負対称に Q_{\max} は発生し、低圧側では、正極性の Q_{\max} が大きな値を示すと考えられる。

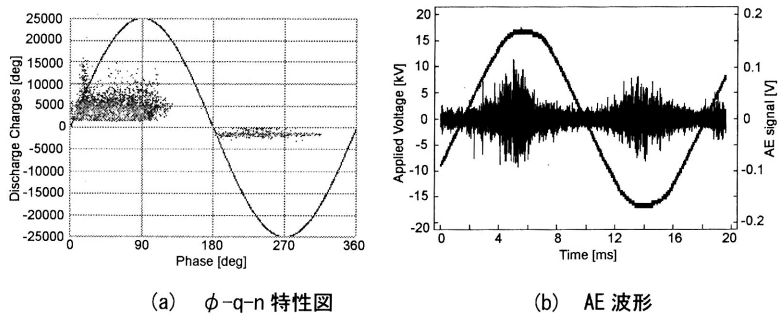


図19 印加電圧12kVにおける ϕ -q-n特性図及びAE波形図

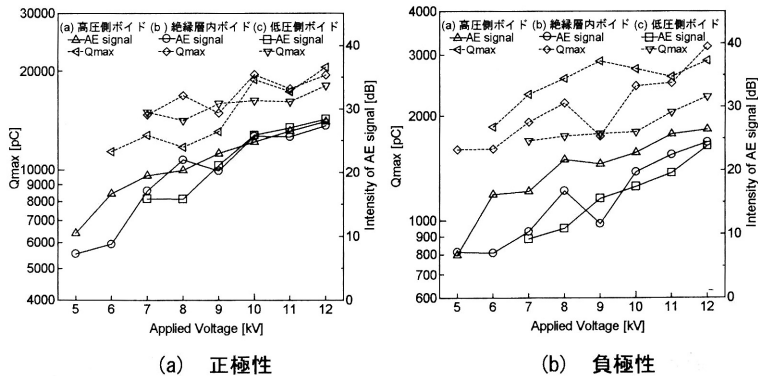


図20 各印加電圧における Q_{\max} 対AE信号強度特性

3 まとめ

本実験で、AE信号強度と Q_{\max} の相関関係を得ることができた。また、ボイド位置の違いにより Q_{\max} に違いが見られた。今後、運転中の水車発電機固定子巻線における絶縁劣化診断基準の確立を行うため、実機水車発電機固定子巻線の部分放電による超音波信号と電気的特性の相関関係の解明が必要である。

V 停止中診断データと運転中診断データとの相関関係

1 オフライン試験における最大放電電荷量とAE信号強度の関係

回転機絶縁物の絶縁材料がエポキシ絶縁の場合、現在のところ絶縁劣化診断技術はまだ基準として定着するに至っていないが、しかし、種々の特性値を導入して診断しようとする試みがされている。水車発電機の劣化現象を判定する停止中の絶縁劣化診断法として、誘電正接試験や部分放電試験などが適用されている。誘電正接試験は、絶縁物の吸湿・汚損の状況や絶縁劣化の状態を推定するのに役立ち、また、部分放電試験は、劣化によるクラックや剥離などの空隙の発生や進展状況より、絶縁劣化の進行を推定するのに利用されている⁽¹⁾。

金神らはサーチコイルを用いたオンラインの水車発電機の絶縁劣化基準として、オフラインにおける部分放電試験の最大放電電荷量（ Q_{\max} ）を採用して、 Q_{\max} の温度依存性からオンラインの水車発電機の絶縁劣化判定できる可能性を示している⁽⁴⁾。そこで、本研究でも、電気的絶縁劣化基準とAEセンサによる音響的絶縁劣化基準を比較検討するために、オフライン試験における最大放電電荷量とAE信号強度の関係を調べた。

I-水車発電機においてPDが最大に発生している位置にAEセンサを固定して、部分放電試験を各印加電圧に対してAE信号も同時に行

った。試験日は2003年12月16日と2005

年2月8日にデータをまとめた結果を

図21に示す。部分放電試験において印

加電圧約4kV付近で Q_{\max} が急に上昇

傾向を示し、それに伴いAE信号強度も

上昇する。このとき、回帰分析結果より

標準偏差（ σ ）を考慮することにより、

一般に水車発電機のオフライン時の

判定基準である $Q_{\max}=10,000\text{pC}$ を

基準にすると、そのときの平均AE信号

強度は15.6dBで、 $\sigma=4.6\text{dB}$ である。同

様に、O-水車発電機に対してもPDが

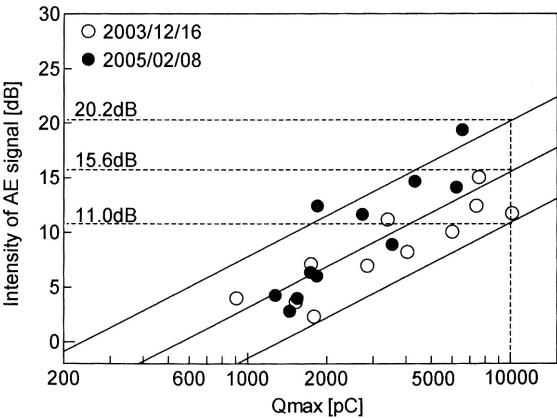


図21 オフライン測定時におけるI-水車発電機のAE信号強度対最大放電電荷量（ Q_{\max} ）特性

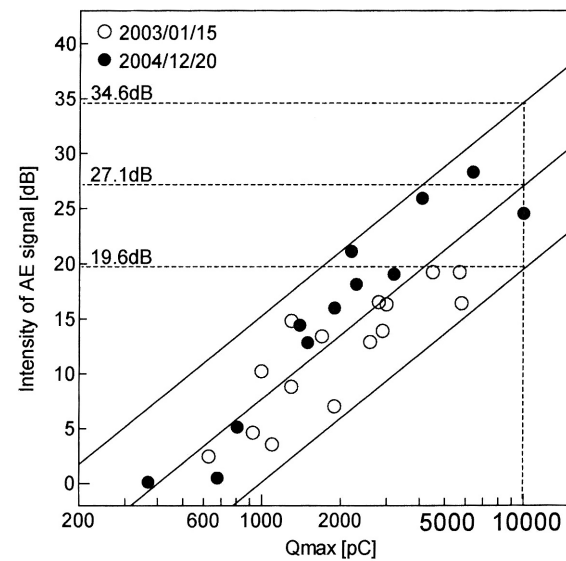


図22 オフライン測定時におけるO-水車発電機のAE信号強度対最大放電電荷量（ Q_{\max} ）特性

VI 運転中水車発電機固定子巻線の部分放電特性に及ぼす温度と湿度等の環境条件の影響

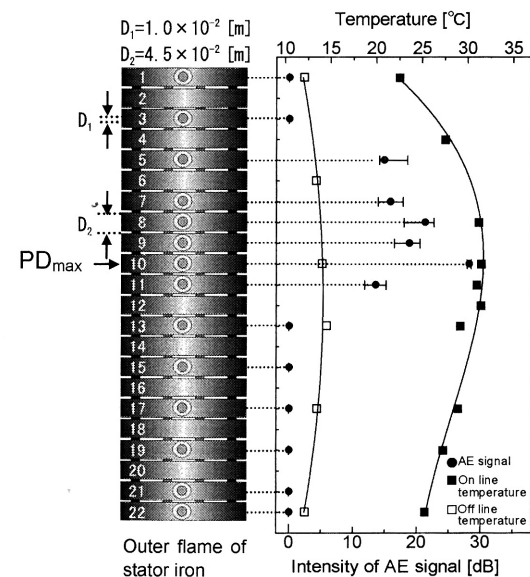


図23 オフライン測定時におけるI-水車発電機の垂直方向のAE信号強度特性に及ぼす温度

最大発生している場所にAEセンサを固定して、2003年1月15日と2004年12月20日に部分放電試験を実施した。部分放電試験において印加電圧約5 kV付近になると Q_{\max} が急に上昇するようになり、それに合わせてAE信号強度も増加傾向を示す。その結果を図22に示す。このとき $Q_{\max}=10,000\text{pC}$ を絶縁劣化基準と仮定する⁽⁵⁾と、そのときの平均AE信号強度は27.1dBで、 $\sigma=7.5\text{dB}$ となる。このように、水車発電機特有のAE信号強度対 Q_{\max} 特性はオフラインとオンラインにおける部分放電特性を関係づける重要な値を示す。

水車発電機固定子鉄心の外枠に複数のAEセンサを直接固定子鉄心の水平方向と垂直方向に対してAEセンサ間の距離を変えてAE信号を数回測定した。I-水車発電機は、水車発電機室内の空気を取り込み、固定子巻線などの加熱部分を冷却し、風道から出口管を通して建屋の外に排熱するという出口管通風形となっている。I-水車発電機においては、水平方向の温度変化は1℃と少ないが垂直方向の場合はその温度差は7℃ほど生じる。図23に水平方向における最大PD（ PD_{\max} ）発生箇所の位置を基準したときの垂直方向のAE信号強度に及ぼす固定子鉄心の温

度の影響を示す。この図からわかるように、水平方向で-0.1m、垂直方向で固定子鉄心10番目（図中に PD_{\max} を示す）のバーにおいて最大PDの位置を検出することができた。さらに、図24にI-水車発電機固定子巻線の全体のAE信号強度分布を示す。この図からわかるように、固定子鉄心の中央部に大きなPDが発生しやすいことがわかる。一方、O-水車発電機の場合、固定子鉄心は密閉されており外気の影響を受けにくい冷却システムである。O-水車発電機の場合も同様な実験を行った。その結果を図25に示す。O-水車発電機の場合は、水車発電機の下部に PD_{\max} が出現することがわかる。このときの固定子鉄心の垂直方向の温度分布を測定した結果も図中に併記した。その結果、O-水車発電機の PD_{\max} の発生場所は固定子鉄心の温度が高い固定子巻線の下部のところで生じていることがわかる。さらに、固定子巻線全体のAE信号強度分布を図26に示す。この図から固定子鉄心の温度が高い下部の部分において大きなPDが発生していることがわかる。これらの一連の結果から、オンライン測定時の水車発電機固定子巻線のAE信号強度すなわちPD特性は固定子巻線の温度に依存するとともに、最大PD発生場所は固定子巻線の冷却システムによる固定子巻線の温度分布に大きく影響していることがわかった。

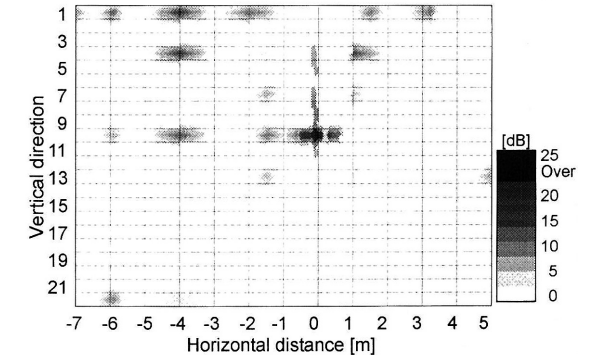


図24 オンライン測定時におけるI-水車発電機の固定子巻線全体のAE信号強度分布

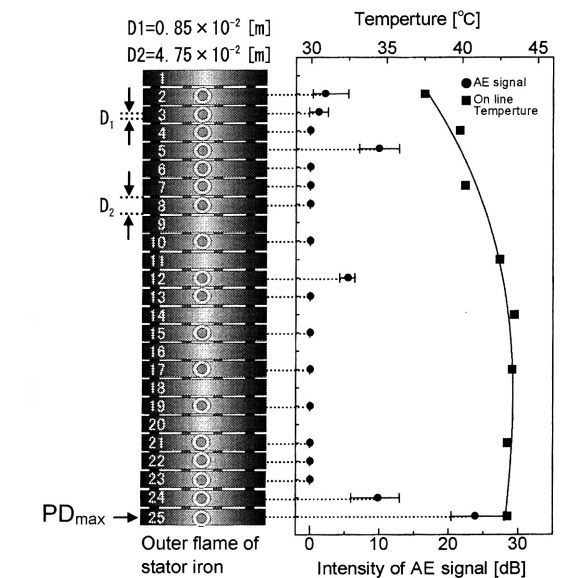


図25 オフライン測定時におけるO-水車発電機の垂直方向のAE信号強度特性に及ぼす温度

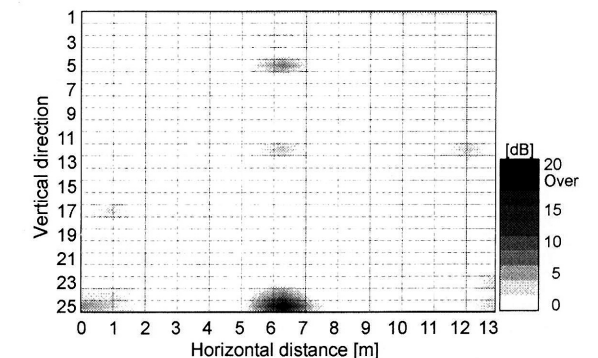


図26 オンライン測定時におけるO-水車発電機の固定子巻線全体のAE信号強度分布

VII 長期水車発電機連続部分放電特性

絶縁診断時において、最も重要な特性である最大放電電荷量は、測定条件、例えば、温度や湿度によって大きく依存することが知られている。そのため、停止時の絶縁診断結果は、測定条件の違いのため、運転時の絶縁診断結果との相関関係を説明することは極めて困難である。運転中水車発電機の固定子巻線の部分放電特性については、これまで多くの研究者らによって調べられている。例えば、水車発電機巻線の温度測定用抵抗体（サーチコイル）を部分放電検出器として用いる活線絶縁診断法の開発が進んでいる。金神氏は、この手法を適用した部分放電現場システムを、4台水車発電機を対象に、約1年間、最大放電電荷量、コイル温度、負荷電流を連続的に測定・収集して、データの解析を行い、その結果、運転中水車発電機の固定子巻線の長期部分放電特性が絶縁劣化診断に役立つ可能性があることを示している⁽⁴⁾。しかし、水車発電機固定子巻線の絶縁診断に有力な手法である超音波法による研究は国内外において著者ら以外の研究が見当たらない。

そこで、著者らは、I-水車発電機に関しては2003年7月から2005年8月の期間中、そしてO-水車発電機に関しては2004年12月から2005年8月の期間中、AE信号波形、固定子巻線温度、風洞内湿度そして負荷電流を連続測定した。これまでの測定結果と同様に、AE信号は電源周波数（60Hz）の2倍の周期（8.3ms）で大きく信号が現れ、そして部分放電の周波数特性である20～30kHz付近で大きく信号強度が出ていることを再確認した。著者らのこれまでの研究成果から、図27に示すように起動時のAE信号強度は、起動直後に急激に上昇しある時刻で

最大値を示した後減少し、その後は定常運転時にはほぼ一定値に落ち着く傾向にあることがわかっている。著者らは同図に示すように起動時の最大部分放電によるAE信号強度をPDsとして、また定常状態における平均AE信号強度をPDnとする。これは、部分放電は固定子巻線の吸湿や応力による機械的ストレスに影響を受けることにより多く発生すると考えられる。

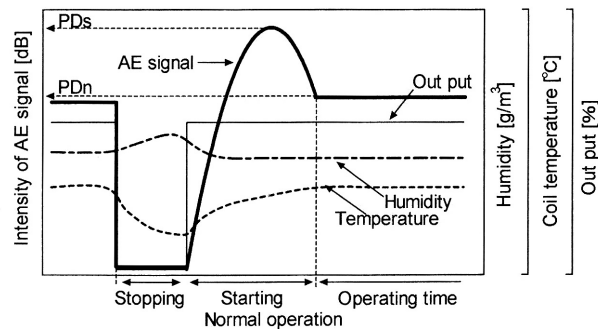
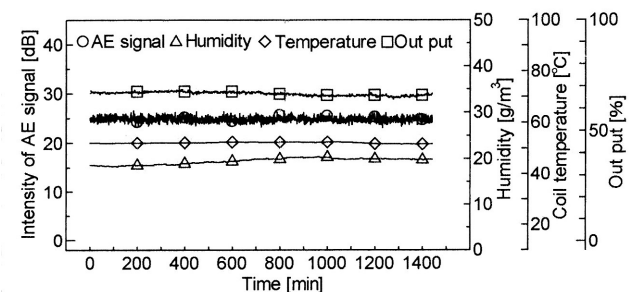


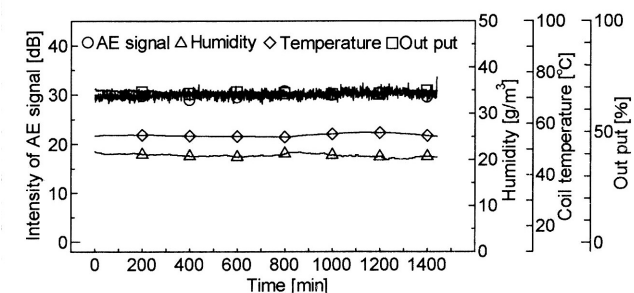
図27 オンライン測定 of 起動時におけるAE信号強度に及ぼす出力、巻線温度と湿度の影響の概念図

図28に夏場と冬場におけるオンライン測定 of I-水車発電機のAE信号強度（図中○）に及ぼす湿度（図中△）、固定子巻線温度（図中◇）そして出力（図中□）の時系列特性示す。特に、ここでは季節による特性比較を行うため、夏場の特性として2003年と2004年の8月（図中(a)）、そして冬場の特性として2004年と2005年の1月（図中(b)）の結果を中心に述べる。このとき、夏場の水車発電

機出力は14,000kW（定格75%）、そして冬場の水車発電機出力は11,000kW（定格59%）である。これらの図から、夏場において2004年の夏のAE信号強度レベルは2003年の値に比べて約5 dB程度の上昇していることがわかる。しかし、冬場におけるAE信号強度はあまりAE信号強度の変化が見られなかった。このように、I-水車発電機のAE信号強度は季節によって大きく変化することがわかる。次に2004年12月から2005年2月までの約3ヶ月間の長期連続測定結果のPDをPDsとPDnに分離して整理した結果を図29に示す。この図からPDsとPDnの差は小さいが、PDsとPDnは26～40dBと大きく変化することがわかる。さらに、I-水車発電機において、2003年と2004年の7月～9月の3カ月間の部分放電のデータを収集し、そのデータを基にして回帰直線と相関係数を求めた。その結果、起動時のPDsは固定子巻線温度よりは湿度の方に依存するが、定常時のPDnは、湿度より固定子巻線温度に依存することがわかった。これらの特性は水車発電機停止中では固定子巻線温度が低く、そのため固定子巻線表面が湿潤しており水車発電機が起動すると、この湿潤のためにPD特性が活発になると考えられる。さらに、ある程度の運転により固定子

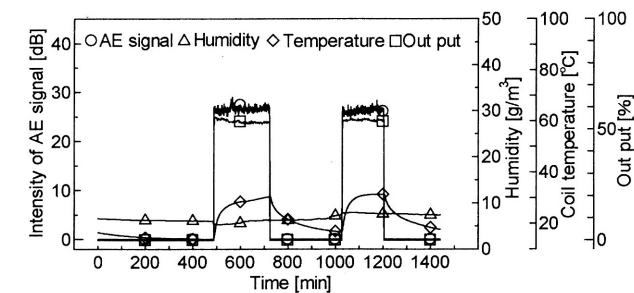


(a-1) 2003/08/23

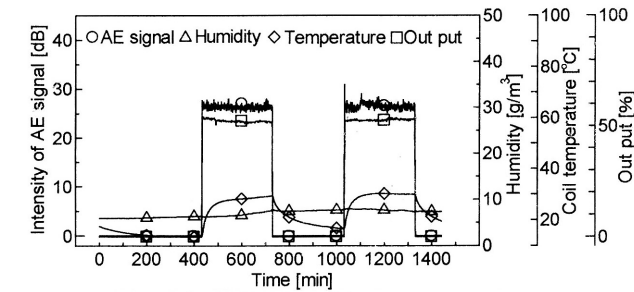


(a-2) 2004/08/20

(a) 夏場 (2003-2004)



(b-1) 2004/01/12



(b-2) 2005/01/06

(b) 冬場 (2004-2005)

図28 夏場と冬場におけるオンライン測定 of I-水車発電機のAE信号強度に及ぼす湿度、巻線温度そして出力の時系列特性

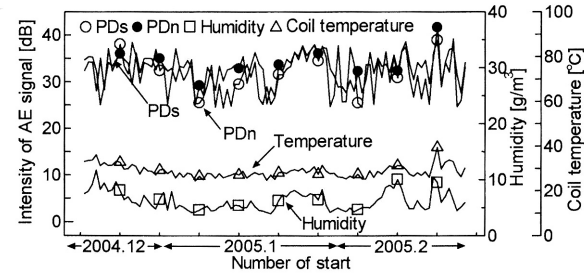


図29 オンライン測定時のPDsとPDnの3ヶ月間I-水車発電機のAE信号強度に及ぼす湿度、巻線温度そして出力の時系列特性

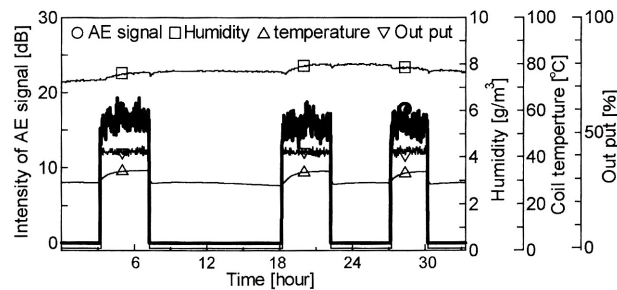


図30 オンライン測定時の2日間のO-水車発電機のAE信号強度に及ぼす湿度、巻線温度そして出力の時系列特性

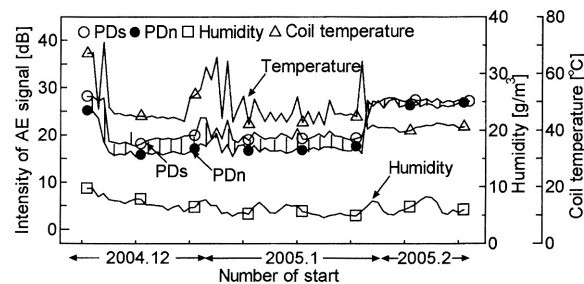


図31 オンライン測定時のPDsとPDnの3ヶ月間O-水車発電機のAE信号強度に及ぼす湿度、巻線温度そして出力の時系列特性

巻線温度が高温の一定値に落ち着くと、高い湿度状態にもかかわらず、固定子巻線表面が乾燥したためにPD特性が落ち着くことによるものと考えられる。

O-水車発電機の長期連続部分放電特性の一例を図30に示す。この図からわかるように、PDは定常運転時においても15～19dBの範囲内で大きく変化することわかる。さらに、2004年12月から2005年2月までの約3ヶ月間のPDをPDsとPDnに分離して整理した結果の例を図31に示す。この図からわかるように、O-水車発電機の場合はPDsとPDnの差が大きく、PDsとPDnは15～25dBの範

囲内で変化する。

一連の研究より、I-水車発電機とO-水車発電機の長期連続部分放電特性からPDsとPDnは固定子巻線温度などの運転環境に複雑に変化することがわかった。

VIII 音響・電氣的測定法を用いたハイブリッド方式の水車発電機運転・停止中における部分放電特性

本研究では、実機の2機の水車発電機（I-水車発電機とO-水車発電機）を対象に、中性点接地線にCTセンサ（付録表2参照）を、固定子鉄心に数個のAEセンサを設置し、水車発電機運転中並びに停止中のAE信号および中性点接地線漏れ電流を計測した。さらに、水車発電機風洞内に自動計測装置を設置し、部分放電によるAE信号および中性点接地線漏れ電流を長期間計測し、水車発電機出力とAE信号および中性点接地線漏れ電流の関係を研究した。

図32にO-水車発電機における音響・電気信号ハイブリッド検出装置およびそれぞれの装置の設置位置を示す。AEセンサの設置位置は固定子巻線の最大部分放電位置を決める位置評定実験により特定した。

1 I-水車発電機およびO-水車発電機における中性点接地線漏れ電流およびAE信号の測定

2機の水車発電機において音響・電氣的ハイブリッド方式で、AE信号および中性点接地線漏れ

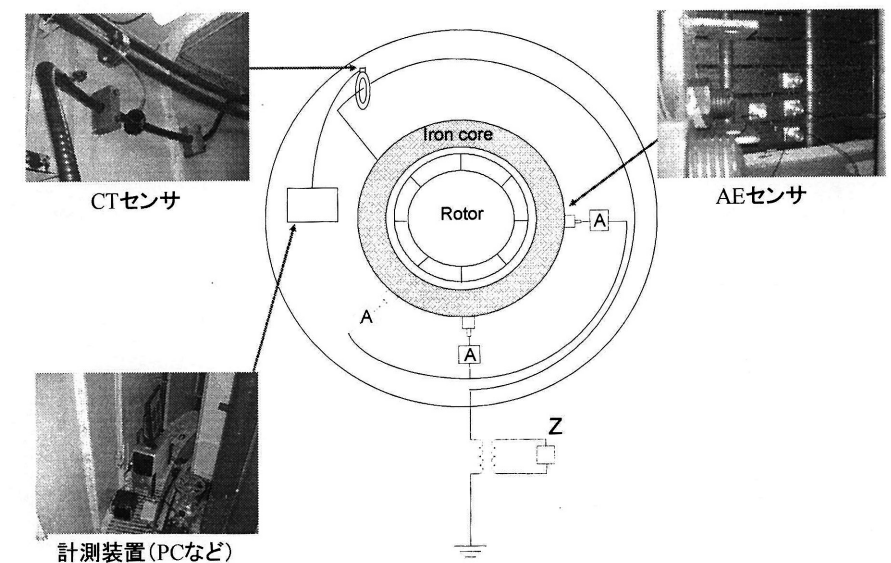


図32 O-水車発電機における音響・電気信号ハイブリッド検出装置とそれぞれの装置の設置位置

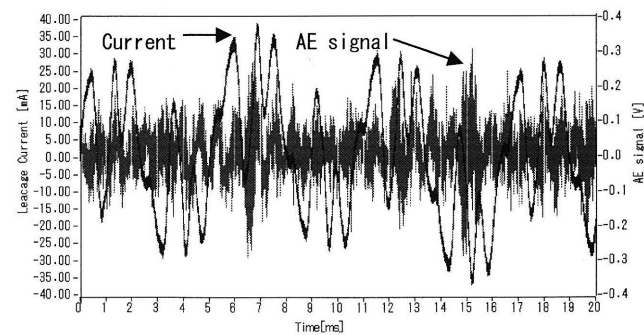
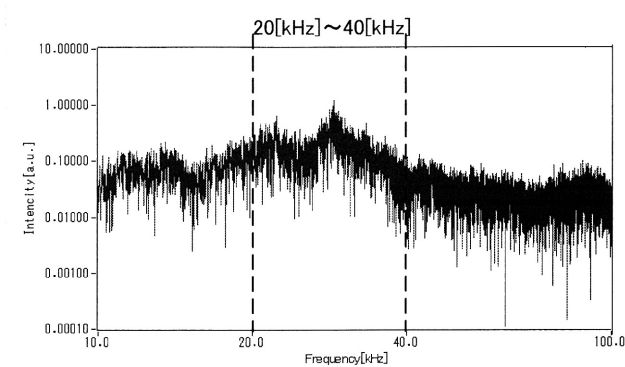
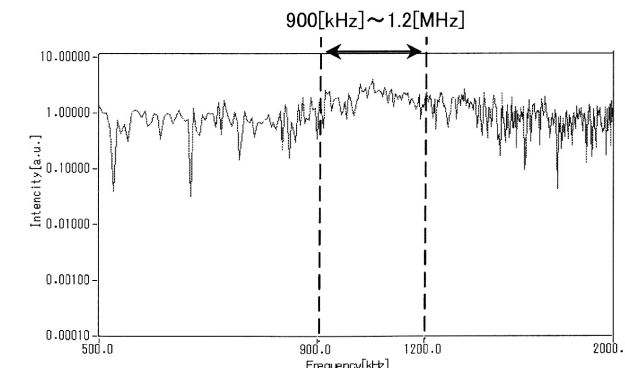


図33 I-水車発電機における中性点接地線漏れ電流とAE信号の原波形



(a) AE 信号の FFT 解析波形



(b) 中性点接地線漏れ電流の FFT 処理波形

図34 I-水車発電機のAE信号および中性点接地線漏れ電流のFFT解析波形

電流を検出した。図33にI-水車発電機で検出した中性点接地線漏れ電流およびAE信号の原波形、図34にI-水車発電機におけるAE信号および中性点接地線漏れ電流のFFT処理波形、図35にI-水車

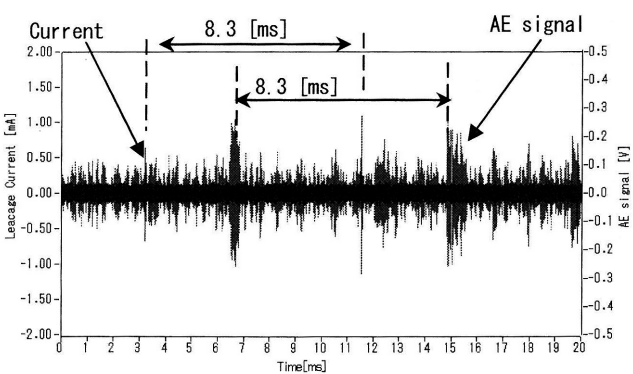


図35 I-水車発電機におけるAE信号および中性点接地線漏れ電流のバンドパスフィルタ処理波形

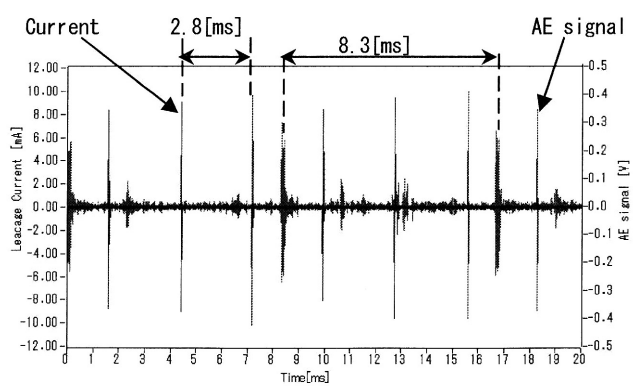


図36 O-水車発電機におけるAE信号および中性点接地線漏れ電流のバンドパスフィルタ処理波形

発電機、図36にO-水車発電機における中性点接地線漏れ電流のバンドパスフィルタ処理波形をそれぞれ示す。これまでの研究結果からI-水車発電機においては約900kHz～1.2MHz、O-水車発電機においては約700kHz～1 MHzの周波数帯域において中性点接地線漏れ電流の信号が見られ、AE信号は約20kHz～40kHzの周波数帯域において信号が確認された。さらに、それらの周波数帯域においてバンドパスフィルタ処理を施し、正確な中性点接地線漏れ電流波形およびAE信号を計測することができた。そしてI-水車発電機の中性点接地線漏れ電流のパルス間隔は約8.3ms、O-水車発電機の中性点接地線漏れ電流のパルス間隔は約2.8msであり、I-水車発電機においては一相分、O-水車発電機においては三相分が検出されていると考えられる。また、AE信号については信号のパルス間隔が8.3msであり、I-水車発電機の中性点接地線漏れ電流のパルス間隔と同じであるので、AE信号も一相分が検出されていると考えられるが、これらについては、今後さらに検討する必要がある。

IX 音響・電気信号ハイブリッド水車発電機絶縁劣化診断システムの構築

著者らは、これまで長期に渡り運転中の水車発電機固定子巻線の絶縁劣化した箇所から発生する部分放電により生じる音響的（AE）信号にはAEセンサを、部分放電によって水車発電機中性点接地線に流れる漏れ電流信号にはCTセンサを用いて、それぞれ研究を行ってきた。

音響的測定法は固定子巻線の部分的な絶縁劣化を診断することができ、また、電氣的雑音の影響を受けないなど優れた特徴を有する。一方、固定子巻線の中性点接地線に流れる電流を計測する電氣的測定法は固定子巻線の全体的な絶縁劣化を診断することができ、オンラインにおいて電流量を測定することができるメリットを有する。すでに、著者らは、これらの特徴と水車発電機の運転情報（起動、停止、出力変化など）を組み合わせることにより、水車発電機固定子巻線の精密な絶縁劣化診断が可能となることを提案した。

図37に音響・電気信号ハイブリッド水車発電機絶縁劣化診断システムの概念図を示す。図38にハイブリッド水車発電機絶縁劣化診断システム試作品の構成図を示す。このシステムは、著者らによるこれまでの研究成果を基にして、これまでの研究で培ってきた技術を用いてAE信号、漏れ電流信号、さらには水車発電機運転情報等を取り込むことにより、水車発電機固定子巻線の絶縁劣化状況を知ることができる。さらに、インターネット回線を用いてデータの転送を行うことにより、水車発電所から遠く離れた場所からでも水車発電機の絶縁劣化の状態をリアルタイムで確認することが出来る。ネットを活用した水車発電機絶縁劣化診断システムは、水車発電機の急な異

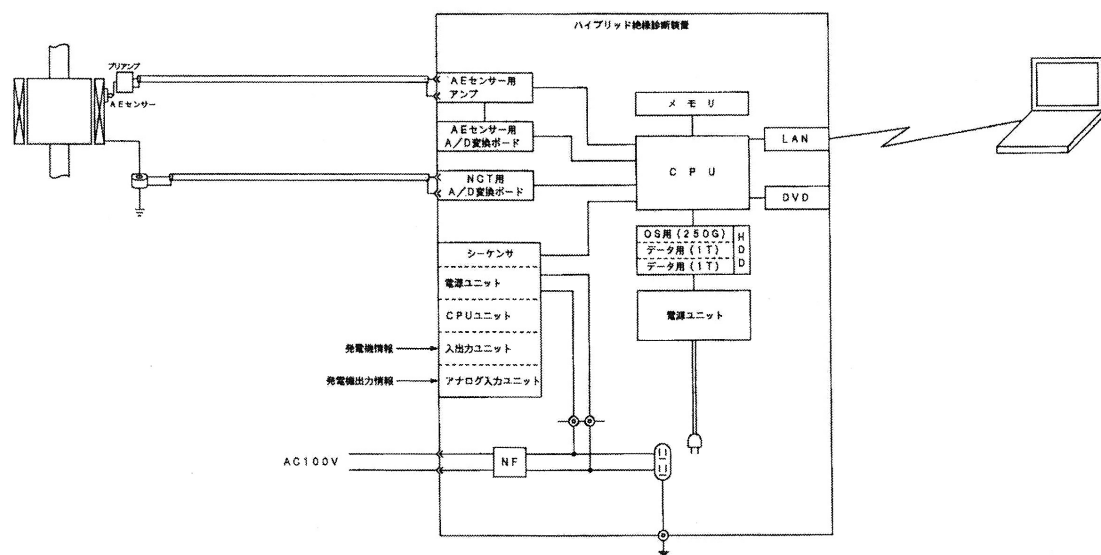


図37 音響・電気信号ハイブリッド水車発電機絶縁劣化診断システムの概念図

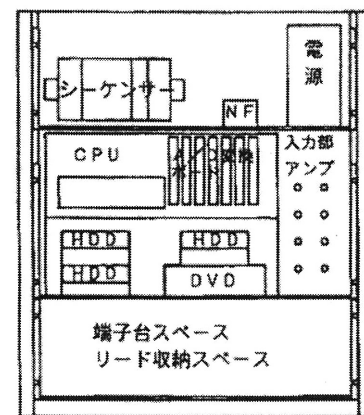


図38 音響・電気ハイブリッド水車発電機絶縁劣化診断システム試作品の構成図

常にも対応することができるので、水車発電機の故障を未然に防ぎ、寿命限界まで利用することが出来ると考えられる。

X 水車発電機固定子巻線の簡易絶縁診断法と絶縁劣化判定例

1 簡易絶縁診断法

図39に、オフライン試験とオンライン試験時のAEセンサを用いた水車発電機固定子巻線の簡易

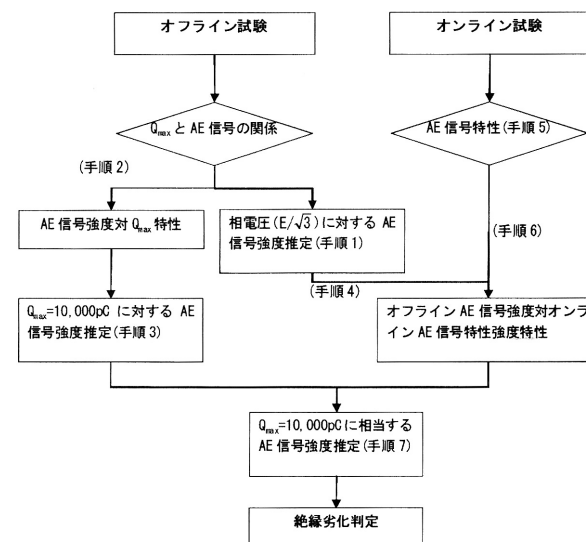


図39 簡易絶縁診断法の流れ図

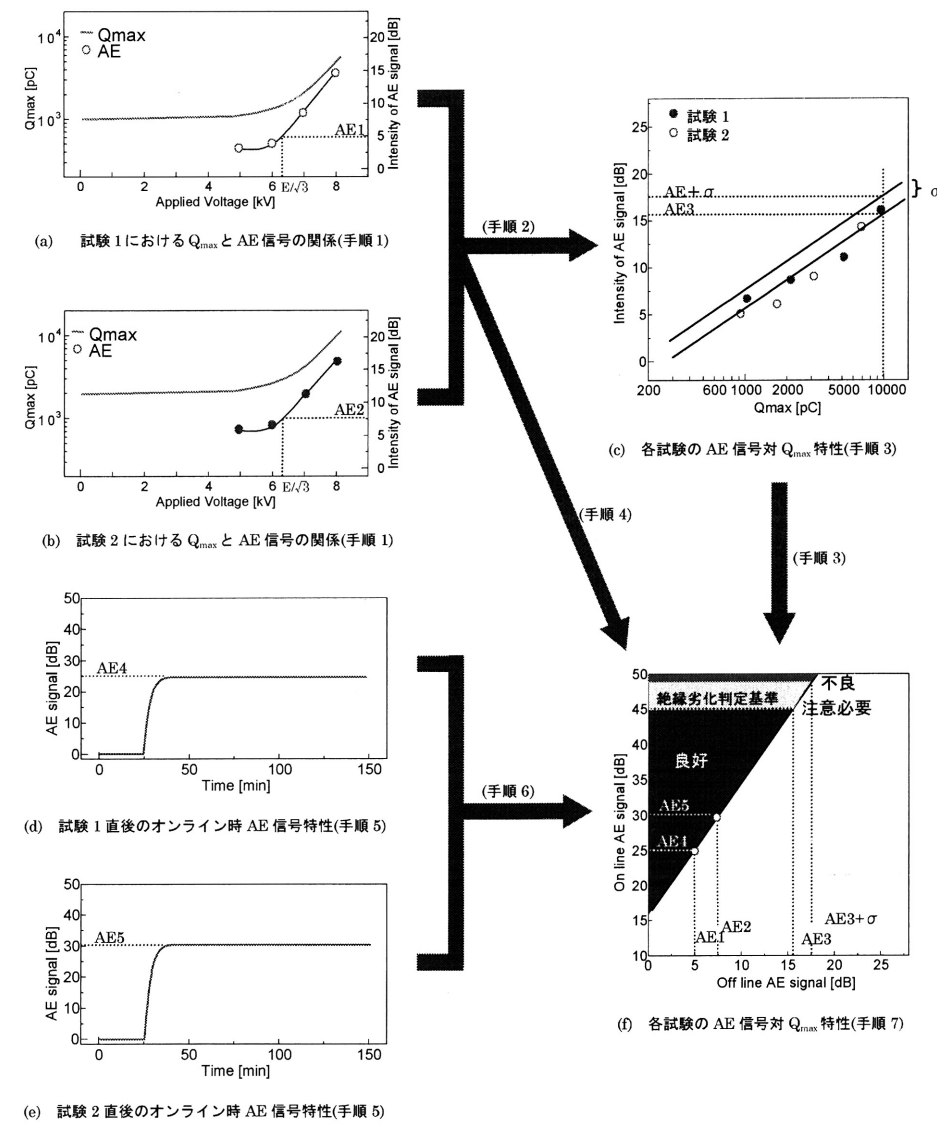


図40 絶縁劣化判定法のモデル図

絶縁診断法の流れ図を示す。図40に簡易絶縁診断法による測定例を整理して絶縁劣化判定のモデル図を示す。

簡易絶縁診断法として、オフライン絶縁試験における Q_{max} 対印加電圧特性（図40(a)(b)）から、相電圧（ $E/\sqrt{3}$ ）でのAE信号強度（AE1、AE2）を推定し、AE信号強度対最大放電電気量（ Q_{max} ）特性から部分放電試験の絶縁劣化判定基準⁽⁵⁾である $Q_{max}=10,000\text{pC}$ に相当するAE信号強度（AE3）

を推定する（図40(c)）。次に、オフライン試験終了後、初回の水車発電機起動時におけるAE信号特性から平均AE信号強度（AE4、AE5）を算出する。推定および算出したAE1、AE2、AE4およびAE5をもとにして、オンライン試験時のAE信号強度対オフライン試験時のAE信号強度特性を求め（図40(f)参照）、オフライン試験の判定基準である $Q_{max}=10,000\text{pC}$ に相当するAE信号強度を推定することで運転中水車発電機固定子巻線の絶縁劣化判定が可能となる。

2 絶縁劣化判定例

実機水車発電機におけるオフライン試験結果からオンライン試験時のAE信号強度の相互関係を検討した（図40参照）。オフライン・オンライン試験日は2006/02/03、2007/01/23、2007/12/12、2009/1/23である。表2に、水車発電機の相電圧（6.4kV）時におけるオフライン・オンライン試験のAE信号強度を示す。図41に、一例として、水車発電機における絶縁診断試験前後の水車発電機運転時AE信号強度特性を示す。一連のこれまでの研究成果から、絶縁診断試験前後において試験前の定常運転ではAE信号強度が安定しているのに対して運転直後はAE信号強度が急上昇することがわかっている。これは水車発電機停止による固定子巻線の吸湿の影響などが主な原因として考えられる。そのため、著者らは、オフライン試験終了後、初回の起動時における平均AE信号強度をオフライン試験時（6.4kV印加時）のAE信号強度に相当する運転中のAE信号強度の指標値と見なすことを提案する。各実験日

表2 相電圧におけるオフライン時・オンライン時のAE信号強度

水車発電機（ $E/\sqrt{3} = 6.4 \text{ kV}$ ）		
	Off-Line 測定 (dB)	On-Line 測定 (dB)
2006/02/03	13.1	40.2
2007/01/23	6.0	21.0
2007/12/12	13.8	36.7
2009/01/23	13.4	35.6

におけるオフラインAE信号強度に相当するオンラインAE信号強度を表2中に併記する。図41に各試験日におけるAE信号強度対 Q_{max} 特性を示す。合成レジン絶縁水車発電機での回帰分析結果から部分放電試験での判定基準（要注意）である $Q_{max}=10,000\text{pC}$ を基準⁽⁵⁾にすると、 $Q_{max}=10,000\text{pC}$ に相当するAE信号強度は14.7dBとなることが分かる。ここで、この14.7dBに対する誤差範囲として標準偏差（ $\pm\sigma$ ）を導入する。これらのデータを基にして、図42にオンライン時のAE信号強度対オフライン時のAE信号強度特性を示す。この図から、 $14.7 \pm \sigma \text{ dB}$ に対応し、

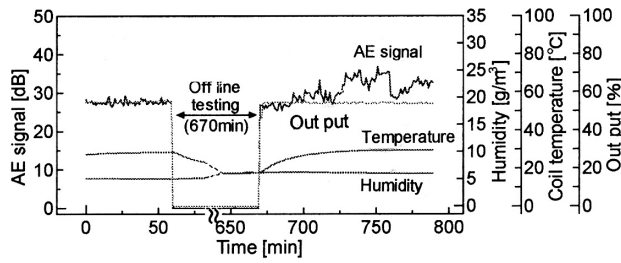


図41 絶縁診断試験前後の水車発電機運転時のAE信号強度特性例

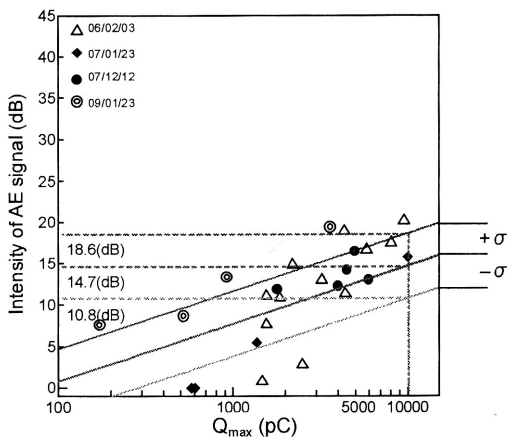


図42 各試験日におけるQ_{max}対AE信号強度特性

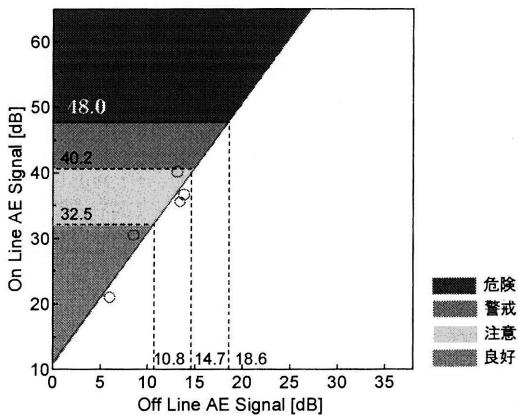


図43 オンライン時のAE信号強度対オフライン時のAE信号強度特性

Q_{max}=10,000pCに相当するオンライン時の判定強度を算出した。その結果を図43に示す。この図から、Q_{max}=10,000pCに相当するオンライン絶縁劣化判定基準として、40.2dBを算出することができる。そのときの誤差範囲(±σ)はそれぞれ32.5dBおよび48.0dBとなる。そこで、著者らは、同図において、Q_{max}=10,000pCに相当するAE信号強度の誤差範囲の下限である32.5dB未満のAE信号強度を「良好レベル」、また、32.5dB以上かつ40.2dB未満のAE信号強度を「注意レベル」、そして、40.2dB以上かつ誤差範囲の上限である48.0dB未満のAE信号強度を「警戒レベル」、最後に、48.0dB以上のAE信号強度を「危険レベル」を定義した。

上述した絶縁劣化判定レベルを採用すると、研究対象の水車発電機の絶縁状態は48.0dB以上の危険レベルには達していないが、ある季節では一時的にAE信号強度が上昇し、警戒レベル(40.2dB以上かつ48.0dB未満)に達することがわかった。

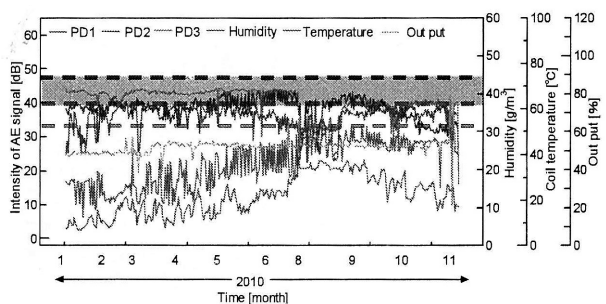


図44 実機I-水車発電機における絶縁劣化判定基準と長期間のAE信号強度特性の比較例

- ・ノイズ除去のための信号処理技術確立
 - ・有意な信号を分離する信号処理技術確立
- 3 分析技術（絶縁診断技術）
- ・音響絶縁診断法、電気絶縁診断法を組み合わせることで分析の精度向上
 - ・水車発電機運転状況で微小放電量が変化確認
- 4 評価技術（良否判定技術）
- ・音響絶縁診断法、電気絶縁診断法の評価技術確立
 - ・従来の絶縁診断データを研究データの相関から放電量の評価手法確立

運転状態で水車発電機固定子巻線の絶縁最弱点部を検出して、その位置での絶縁劣化基準を確立して、水車発電機固定子巻線の寿命限界利用を検討する状態監視保全が重要である。今後、絶縁破壊事故の未然防止及び設備の有効利用などの観点からも運転中で水車発電機固定子巻線の新絶縁劣化基準の確立など、さらになる応用研究が重要である。

東日本大震災の発生後、日本のエネルギー政策を検討すると、原子力発電に頼らない社会を研究する必要がある。その代替電源の希望の星は、風力や太陽光を始めとする自然エネルギーである。その中で、古くから日本のエネルギー供給源として、重要な役割を果たしてきたのが水力発電であり、東京電力福島第一原発事故後、自然エネルギーとして有力な水力発電の重要性が再評価された。

参考文献

- (1) 電気学会：「電気設備の診断技術」；オーム社，改訂版，(2003)
- (2) IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, IEEE Std 1434-2000

XI 総括

著者らが2001年度から2011年度本研究課題に関連する研究成果を概略整理すると次の通りとなる。詳細な研究成果については、研究業績参照のこと。

- 1 検出技術（センシング技術）
 - ・AEセンサの適正配置に関する手法確立
 - ・CTセンサの適正配置による手法確立
 - ・モデルの試験結果から絶縁不良時特有の信号特定
- 2 信号処理技術（ノイズ除去技術）
 - ・微弱検出信号の増幅手法確立

- (3) 電気学会：「ケーブル・電気機器のオンライン診断技術」，電気学会技術報告書，第1064号（2006年）
- (4) 金神雅樹・他：「水車発電機の連続長期部分放電計測」、第35回電気電子絶縁材料システムシンポジウム セッションH（H-6）、pp.165-168（2004）
- (5) 技術研究報告：「発電機巻線絶縁劣化判定基準」（1964）

研究業績リスト

学術論文（査読付：4編）

1. 「AEセンサを用いた水車発電機運転中部分放電測定」，電学論B，Vol.122，No.4，pp.513-519（2002-4）
2. "On-line Partial Discharge Measurement of Hydrogenerator Stator Winding using Acoustic Emission Detection Techniques", IEEJ Trans.PE,Vol.124, No2,pp.247-280（2004-2）
3. "Estimation of Position of On-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques", IEEJ Trans.FM,Vol.124,No7, pp.534-540（2004-7）
4. 「AEセンサを用いた水車発電機固定子巻線のオフライン・オンライン部分放電比較」，電学論B，Vol.126，No.6，pp.578-585（2006-6）

国際会議論文（査読付：13編）

1. "On-line Monitoring of Stator Winding Insulation on Hydrogenerator using Acoustic Emission Sensors", Japan Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering,pp.173-176 (2001-11)
2. "Characteristics of On-line Partial Discharge in Hydrogenrator Stator Winding using Acoustic Emission Sensor Techniques", The Conference of the Electric Power Supply Industry, T1-D-6, pp.361-366 (2002-11)
3. "Characteristics of Partial Discharge in Stator Winding for starting Hydrogenetator by Acoustic Emission Detection Method",2002 Joint Conference of ACED & Korea-Japan Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp.491-494 (2002-11)
4. "On-line Partial Discharge Measurement of Hydrogenerator Stator Winding using Acoustic Emission Detection Techniques",3rd International Workshop on High Voltage Engineering,ED-03-31,SP-93-20,HV-03-20, pp.105-110(2003-1)
5. "Development of On-line Insulation Diagnosis in Hydrogenerator Stator Winding using Acoustic Emission Detection Method", The XIIIth International Symposium on High

Voltage Engineering,pp.1-4 (2003-8)

6. "Estimation of Position of On-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Technique",2003 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage,E1, pp.85-88(2003-11)
7. "Detection of Position of On-line Maximum Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques", Proc. of 12th Asian Conference on Electrical Discharge at Shenzhen China,B3,pp.1-4 (2004-11)
8. "Characteristics of On-line and Off-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques", Proc. of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials,No.A6-5,Vol.3,pp.837-840 (2005-6)
9. "Characteristics of Change in On-line Partial Discharge Magnitude on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques", The 14th International Symposium on High Voltage Engineering,G-045,pp.1-6 (2005-8)
10. "Influence of Operation Environment Conditions on Partial Discharge of On-line Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques",2005 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage,No.PA-5,pp.112-115 (2005-11)
11. "Influence of Environmental Factors on Characteristics of On-line Partial Discharge in Hydrogenerator Stator Windings", ACED 2006 13th Asian Conference on Electrical Discharge,No.P-1-17 (2006-10)
12. "Characteristics of Online Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings by Hybrid Detection Method with AE sensors and CT sensor",2007 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage,ED-08-7 (2007-11)
13. "Characteristics of On-line and Off-line Partial Discharge for Hydrogenerator Stator Windings with AE Sensor and CT Sensor",2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials,MVP2-2-5,pp.577-578 (2008-9)

大学紀要等論文（9編）

1. 「超音波センサによる水車発電機固定子巻線の余寿命診断の開発」，宮崎大学地域共同研究センター年報，第7号，pp.1-2（2001-3）
2. 「超音波センサによる水草発電機固定子巻線の余寿命診断の開発」，宮崎大学地域共同研究センター年報，第8号，pp.1-2（2002-3）
3. 「超波法を用いた運転中水草発電機固定子巻線の部分放電測定」，宮崎大学地域共同研究センター（CRC）報告書，平成15年3月

4. 「AE法による水車発電機固定子巻線の絶縁診断システムの開発」, 平成16年度 宮崎大学工学部紀要, No.33, pp.215-220 (2004-7)
5. 「コンピュータ自動計測による水車発電機絶縁診断システムの開発」, 平成16年 3 月, 宮崎公立大学人文学部紀要, 第11巻, 第1号, pp.22-48
6. 「AE法を用いた水車発電機の運転環境条件による部分放電特性」, 平成18年度 宮崎大学工学部紀要, No.35, pp.83-88 (2005-8)
7. 「音響・電氣的信号ハイブリッド検出による運転中水車発電機の部分放電特性」, 平成19年度 宮崎大学工学部紀要, No.36, pp.109-114 (2007-8)
8. 「音響・電氣的測定法を用いた運転中水車発電機の長期部分放電特性」, 平成20年度 宮崎大学工学部紀要, No.37, pp.163-168 (2008-8)
9. 「水力発電所での遠隔絶縁診断データ伝送システムの構築」, 平成21年 3 月, 宮崎公立大学人文学部紀要, 第16巻, 第1号, pp.13-22

口頭発表論文 (42件)

1. 「超音波センサを用いた水車発電機固定子巻線のオンライン絶縁診断」, 電気学会放電, 誘電・絶縁材料, 高電圧合同研究会資料, ED-01-8, DEI-01-14, HV-01-8, pp.43-48 (2001-1)
2. 「超音波センサを利用した水車発電機固定子巻線の絶縁劣化診断の開発」, 平成12年度宮崎科学技術交流会, p.59 (2001-2)
3. 「水車発電機におけるAE法を用いた絶縁劣化診断技術の開発 (I)」, 平成13年電気学会全国大会, p.7-190, (2001-3)
4. 「超音波センサを用いた水車発電機固定子巻線の活線絶縁劣化診断法の検討」, 平成13年度電気設備学会全国大会, E-24, pp.325-326 (2001-8)
5. 「超音波センサを用いた水車発電機固定子巻線の運転中絶縁診断特性」, 九州・電力技術研究会, p.34 (2001-9)
6. 「超音波センサを用いた水車発電機固定子巻線の部分放電に及ぼす巻線温度の検討」, 平成13年度電気関係学会九州支部連合大会, p.100 (2001-10)
7. 「超音波センサを用いた水車発電機固定子巻線のオンライン及びオフライン時の絶縁特性」, 電気学会放電, 誘電・絶縁材料, 高電圧合同研究会資料, ED2-29, DEI-02-37, W-02-29, pp.69-74 (2002-1)
8. 「AE法による水車発電機構造転開始直後における固定子巻線の部分放電特性」, 平成14年度電気学会全国大会, (2002-3)
9. 「超音波法を用いた水車発電機固定子巻線の絶縁診断法の開発」, 第10回技術・研究発表交流会, No.8, pp.139-140 (2002-7)
10. 「超音波センサ法を用いた運転中水車発電機固定子巻線の部分放電測定」, 平成14年度電気学

- 会電力・エネルギー部門大会, B02, No.313, pp.145-146 (2002-8)
11. 「超音波法を用いた水車発電機起動時における固定子巻線の部分放電測定」, 平成14年度電気関係学会九州支部連合大会, p.727 (2002-9)
12. 「超音波法を用いた運転起動時における水車発電機固定子巻線の部分放電特性」, 第3回九州・電力技術研究会, pp.54-59 (2002-9)
13. 「水車発電機固定子巻線の部分放電特性におよぼす運転条件の影響」, 平成15年電気学会電力・エネルギー部門大会, 360, pp.389-390 (2003-8)
14. 「超音波法による水車発電機固定子巻線の部分放電位置推定」, 第4回九州・電力技術研究会, pp.31-36 (2003-9)
15. 「超音波法を用いた水車発電機固定子巻線における部分放電発生位置推定」, 平成15年度電気関係学会九州支部連合大会, 03-2P-01 (2003-9)
16. 「超音波法による水車発電機固定子巻線の最大部分放電検出」, 平成16年度 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.176, pp.11.23-11.24 (2004-8)
17. 「超音波法による水車発電機固定子巻線の部分放電経年劣化」, 平成16年度 電気関係学会九州支部連合大会, No.02-2A-15, p.91 (2004-9)
18. 「超音波法による運転中水車発電機固定子巻線の長期部分放電特性」, 電気学会放電、誘電・絶縁材料、高電圧合同研究会資料, ED-05-21, DEI-05-21, HV-05-21, pp.33-38 (2005-1)
19. 「超音波法による水車発電機・高圧電動機の非破壊試験特性」, 平成17年度電気学会全国大会, 2-077 (2005-3)
20. 「超音波法による運転中水車発電機固定子巻線の部分放電特性 [I]」, 平成17年 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.339, pp.4011-4012 (2005-8)
21. 「部分放電の超音波特性と電気特性の比較」, 平成17年度 電気関係学会九州支部連合大会, No.20-2A-13, p.104 (2005-9)
22. 「超音波法による運転中水車発電機固定子巻線の運転環境を考慮した部分放電特性」, 平成17年度 電気関係学会九州支部連合大会, No.20-2A-14, p.105 (2005-9)
23. 「運転中水車発電機固定子巻線の部分放電特性に及ぼす環境要因の影響」, 平成18年度 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.300, pp.24-17-24-18 (2006-9)
24. 「電氣的・音響的測定法による針対平板電極系の部分放電特性」, 平成18年 電気関係学会九州支部連合大会, No.01-2A-14, p.214 (2006-9)
25. 「長期間運転中水車発電機固定子巻線の部分放電位置特性」, 平成18年 電気関係学会九州支部連合大会, No.01-2A-13, p.213 (2006-9)
26. 「音響・電気信号ハイブリッド検出方式による運転中水車発電機の部分放電特性 (2)」, 平成19年度 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.173, pp.9-17-9-18 (2007-9)
27. 「電氣的・音響的測定法による 実機水車発電機固定子巻線と室内実験の部分放電特性」, 平成

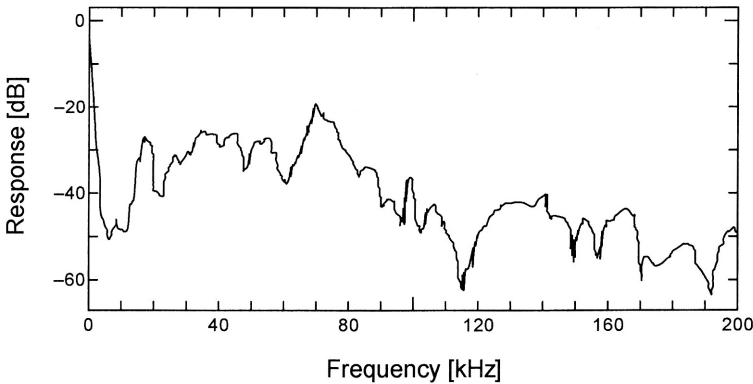
付録

本研究で使用したAEセンサの仕様（付録表1）とAEセンサ703型の周波数特性例（付録図1）、CTセンサの仕様（付録表2）、研究対象の水車発電機の仕様（付録表3）及び平成14年度から平成21年度までの産学共同研究事業リスト（付録表4）を示す。

付録表1 本研究で使用したAEセンサの仕様

	Type-703
Model	AE-703S
Frequency response	70kHz
Diameter-height	12mm-40mm
Operating temperature limit	-20～+80 ℃
Capacitance	110 PF
Manufacturing company	NF Electric Instruments

付録図1 共振型センサtype-703の周波数特性例



19年度 電気関係学会九州支部連合大会, No.01-2A-13, p.256 (2007-9)

28. 「音響・電氣的測定法を用いた水車発電機運転・停止中における部分放電特性」, 電気学会放電、誘電・絶縁材料、高電圧合同研究会資料, ED-08-7, DEI-08-7, HV-08-7, pp.35-40 (2008-1)

29. 「絶縁診断試験時における音響的・電氣的信号同時測定」, 平成20年度 電気学会全国大会, 5-043, pp.69-70 (2008-3)

30. 「オフライン絶縁診断試験時における水車発電機固定子巻線の電氣的・音響的部分放電特性」, 平成20年度 電気学会全国大会, 5-043, pp.69-70 (2008-3)

31. 「運転中水車発電機巻線の部分放電発生位置特性」, 平成20年度 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.361, pp.45-25-45-26 (2008-9)

32. 「音響的検出法による運転中水車発電機固定子巻線の部分放電長期測定と遠隔監視システムの構築」, 電気学会放電、誘電・絶縁材料、高電圧合同研究会資料, ED-09-019, DEI-09-044, HV-09-019, pp.49-53 (2009-1)

33. 「超音波センサによる運転中水車発電機固定子巻線の部分放電検証試験」, 平成21年度 電気学会全国大会, No.5-053, pp.89-90 (2009-3)

34. 「超音波センサによる水車発電機固定子巻線の部分放電発生位置特性」, 平成21年度 電気学会電力・エネルギー部門大会, NO.330, pp.41-13-41-14 (2009-8)

35. 「超音波センサを用いた運転中水車発電機固定子巻線の部分放電分布と長期部分放電特性」, 電気学会放電、誘電・絶縁材料、高電圧合同研究会資料, ED-10-014, DEI-10-038, HV-10-014, pp.19-24 (2010-1)

36. 「超音波センサを用いた水車発電機の長期オフライン試験とオンライン試験特性の推移」, 平成22年度 電気学会全国大会, No.5-035 (2010-3)

37. 「遠隔オンライン水車発電機巻線絶縁モニタリングシステムの開発」, 2010年(第28回)電気設備学会全国大会, D-16, pp.193-194 (2010-8)

38. 「音・電気ハイブリッド計測による水車発電機絶縁劣化診断システムの開発」, 平成22年度 電気学会電力・エネルギー部門大会, No.355, pp.45-5-45-6 (2010-9)

39. 「超音波センサを用いた運転中水車発電機固定子巻線の部分放電発生位置特性(Ⅲ)」, 平成22年度 電気関係学会九州支部連合大会, No.05-2P-12, p.563 (2010-9)

40. 「運転中水車発電機固定子巻線部分放電特性に及ぼす温度の影響」, 電気学会放電、誘電・絶縁材料、高電圧合同研究会資料, ED-11-019, DEI-11-032, HV-11-019, pp.25-28 (2011-1)

41. 「超音波センサを用いた運転中水車発電機固定子巻線の簡易絶縁診断法と絶縁劣化判定法の検討」, 2011年(第29回)電気設備学会全国大会, B-1, pp.55-58 (2011-9)

42. 「Influence of Temperature on Characteristics of On-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings with Acoustic Emission Detection Techniques」, 2011年第9回電気設備学会国際ワークショップ, W-2, pp.613-617 (2011-9)

付録表2 本研究で使用了CTセンサの仕様

	CT sensor
Model	CTL-28-S90-05Z-1R1-CL1
Frequency response	2kHz～30MHz
Application current	10mArms～10Arms
Operating temperature limit	-10～+75 ℃
Output impedance	50Ω

付録表3 研究対象の水車発電機の仕様

発電所	N	M	I	O
所有	九州電力(株)	九州電力(株)	宮崎県企業局	九州電力(株)
号	1号機	1号機	1号機	1号機
形式	TAF-FACT	SUF525/34-12	VEFZ-RD	SPF710/47-40
絶縁材料	エポキシレジン	エポキシレジン	エポキシレジン	エポキシレジン
絶縁仕様	B種	B種	B種	B種
定格出力 [kW]	980	5,000	18,600	40,500
最大出力 [kVA]	1,250	6,250	20,700	45,000
電圧 [kV]	3.5	6.6	11.0	13.2
電流 [A]	207	547	1,087	1,970
周波数 [Hz]	60	60	60	60
回転数 [rpm]	360	600	300	180
極数	20	12	24	40
力率 [%]	80	80	90	90
製造年	1928	1940	1966	1960
	固定子巻線更新 1974	固定子巻線更新 1977	固定子巻線更新 なし	固定子巻線更新 なし
研究期間	2001/11- 2002/2	2000/12- 2001/12	2002/02- 絶縁試験日 :2003/12/16 :2006/02/03 :2007/01/23 :2007/12/12 :2009/01/23	2001/9- 2010/3 絶縁試験日 :2003/01/15 :2004/12/27

付録表4 平成14年度から平成21年度までの産学共同研究事業

年 度	企 業 名	研究題目名	交付金額(千円)
平成14年度 ～ 平成18年度	(株) 興電舎	コンピュータ自動計測による水車発電機絶縁診断システムの構築	900
平成15年度 ～ 平成17年度	九州電力 (株) 宮崎支店	超音波センサによる水車発電機固定子巻線の余寿命診断の研究	2, 100
平成18年度 ～ 平成21年度	宮崎県企業局	超音波センサを用いた水車発電機固定子巻線の余寿命診断の研究	2, 400
平成18年度 ～ 平成19年度	九州電力 (株) 宮崎支店	中性点電流分析による発電機劣化診断技術の開発の研究	1, 500
平成19年度 ～ 平成20年度	(株) 興電舎	音響・電気信号ハイブリッド方式による運転中高圧回転機の新絶縁劣化診断法の開発	300
平成20年度 ～ 平成21年度	九州電力 (株) 宮崎支店	音・電気ハイブリッド計測による発電機絶縁劣化診断技術の開発	2, 800

謝辞

本研究課題に研究分担者として参加した宮崎大学工学部名誉教授本田親久、宮崎大学工学部教授大坪昌久、宮崎大学工学部教授林則行、宮崎大学工学部准教授迫田達也及び宮崎公立大学人文学部辻利則教授に厚く御礼を申し上げます。また、本研究は、著者（研究代表者：金子正光）が宮崎公立大学と九州電力(株)宮崎支店、宮崎公立大学と宮崎県企業局並びに宮崎公立大学と興電社(株)との産学共同研究費によって行われたことを記し、関係者各位に謝意を表する。また、本原稿執筆は、平成23年度宮崎公立大学理事長・学長特別配当枠研究事業（研究課題名：運転中水車発電機絶縁診断への音響・電気ハイブリッド部分放電計測の応用）の支援によって行われたことも併記する。

最後に、修士論文として本実験の遂行に協力した宮崎大学工学部電気電子工学科大学院生の竹村明人（現九州電力(株)）、上田隆司（現東芝(株)）、藤井太志（現王子製紙(株)）、平谷龍一（現九州電力(株)）、前田育也（現三菱重工(株)）、日高 徹（現産研設計(株)）並びに卒業論文として参加した宮崎大学工学部電気電子工学科の学部生らに感謝する。

竹之内 修（航空大学校・教授）

