

超音波センサを用いた 水車発電機固定子巻線の絶縁診断技術

An Insulation Diagnostic Technique of Stator Winding
on Water-Wheel Generator Using an Acoustic Emission Sensor

辻 利則, 湯地敏史, 金子正光, 山津謙一

近年、国民生活の高度・多様化に伴い電力需要の増大と顕著な日負荷変動から、水力発電における揚水発電とともに運用面の重要性が見直されている。また、水力発電は、自然クリーンエネルギーであるため、地球環境問題の観点からも重要である。しかし、水力発電の経済環境は厳しく、遠隔制御による無人化も急速に進み、安定して安全かつ廉価な電力エネルギーを供給するためには、水車発電機の効率的運用が重要な課題とされる。これまで、水力発電機の固定子巻線の検査は原則として10年に1回程度行なわれ、経年劣化が進む20年目以降は検査の頻度を増やして実施されている。そのため、検査の際には発電機の運転の停止、機器の分解など手間のかかる作業が必要となり、経済的な損失も見逃せない課題となっている。

そこで、本研究では水車発電機固定子巻線の絶縁状態を診断する手法として、超音波センサを用いたAE波絶縁診断技術を提案し、その評価技術の確立を目的としている。AE波絶縁診断技術の特徴としては、通常の発電機の運転状態で巻線の絶縁診断ができ、そのため運用面で固定子巻線の絶縁診断検査を計画的に実施できる点が挙げられる。本論文では、実際に稼動している水車発電機から発生されるAE波を計測し、AE波絶縁診断技術で課題とされるマシンノイズ除去技術の検討、絶縁診断試験で計測したAE信号強度の変化と長期に亘る水車発電機のAE波計測データの解析結果を得たのでここに述べる。

キーワード：絶縁診断技術, 超音波, 発電機, 部分放電, マシンノイズ

目次

- | | |
|-------------------|-------------------|
| I はじめに | IV 絶縁診断におけるAE波強度 |
| II 実験装置および実験方法 | V 長期計測によるAE波変動の検討 |
| III マシンノイズ除去技術の検討 | VI まとめ |
| 3.1 部分放電試験時のAE信号 | VII 謝辞 |
| 3.2 無励磁運転時のAE信号 | |
| 3.3 AE信号強度の評価 | |

I はじめに

近年、20年以上運転されているレジン絶縁方式の水車発電機が増加しており、各電力会社では発電設備の信頼性の維持・保守の合理化から巻線更新の要否判断が重要な課題となっている。巻線更新の要否の判断には、巻線の劣化状態を把握し、残存破壊電圧や絶縁寿命を高精度で推定する必要がある。巻線の劣化診断技術については、絶縁試験法の確立、劣化判定基準の制定など古くから関心が寄せられ、現在は電流増加率、 $\Delta \tan \delta$ 、最大放電電荷などの特性値を総合し、絶縁耐力を判定する方法が一般に用いられている。そのため、水車発電機固定子巻線の絶縁試験は停止中の発電機に別の電源から電圧を印加し、非破壊試験により絶縁を診断する非活線絶縁診断が主流となっている⁽¹⁾。そのため保守管理の迅速化、省力化、診断に要する費用の削減などの点から、この方法に代わる新しい絶縁試験法の確立が望まれている。そこで、発電機を運転しながら固定子巻線の絶縁状態を監視・診断する活線絶縁診断に関する研究が注目されている。活線絶縁診断に関する研究には、現在、水車発電機巻線スロット中にある測温センサを利用したもの⁽²⁾、部分放電からのGHz帯放射電磁波を測定するもの⁽³⁾などが研究されている。

本研究は、運転状態にある水車発電機の絶縁劣化した固定子巻線で発生する部分放電をA E波 (Acoustic Emission wave) を超音波センサ (以下、A Eセンサと略す) を用いて検知し、固定子巻線の絶縁劣化を診断する手法の確立を目的としている⁽⁴⁾。A Eセンサによる部分放電検出法はA Eセンサ自体が小型で、取り付けが容易であり、また複数個のA Eセンサを用いることで部分放電箇所の位置評定も可能となる特徴がある。A E波は、可聴周波数領域から超音波の周波数を含む弾性波であり、部分放電によって生じることは既に知られている。しかしながら、A E波計測による絶縁診断技術の確立には、複雑な構成となっている水車発電機での部分放電で生じたA E波の伝播特性、また発電機稼働時に測定されるA E波に含まれるローターの回転や電磁振動により生じたマシンノイズを除去し、部分放電によって発生したA E信号強度を抽出する手法の確立が重要な課題となる。

本論文では、実際に稼働している水車発電機で行った部分放電試験、励磁・無励磁試験で計測したA E波を用いてマシンノイズの除去技術について検討し、またA E波計測から得た結果を元に発電機の絶縁状態について考察した。長期に亘る水車発電機のA E波計測データからは、固定子巻線温度が絶縁劣化に大きく関与していることも確認できたので、以下に報告する。

II 実験装置及び実験方法

実験は、九州電力株式会社のI発電所1号機を用いて行った。発電機に4個のA Eセンサを設置し、A E波を計測した。図1にA E波計測装置と写真を示す。A Eセンサには、2種の周波数帯域が異なる特性のものType-900 (NF Electric Instruments, Model AE-900S-WB, 周波数帯域: 100kHz ~ 1MHz) と

超音波センサを用いた水車発電機固定子巻線の絶縁診断技術 (辻 利則)

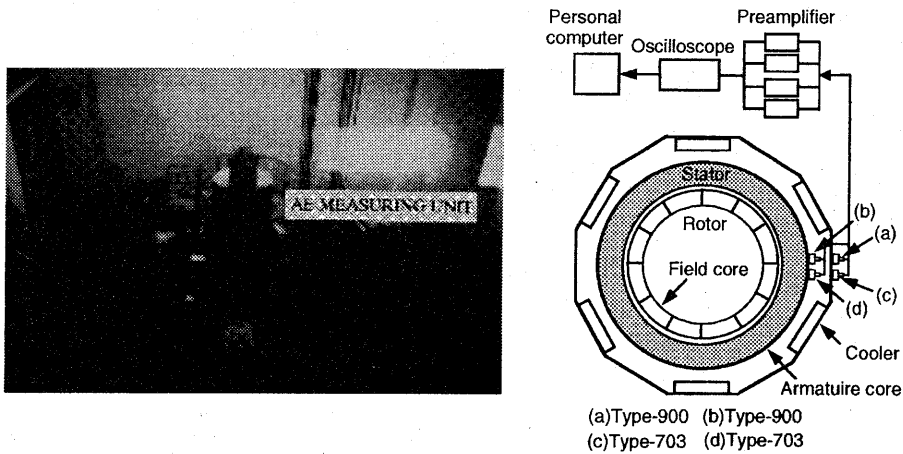


図1 AE波計測装置

Type-703 (NF Electric Instruments, Model AE-703S, 共振周波数: 70kHz) を用い、それらを発電機外壁と固定子鉄心に取り付けた。AE波の計測は、AEセンサで検出された微弱な信号をプリアンプ (NF Electric Instruments, Model 9917, 周波数帯域: 2kHz ~ 1.2MHz) で増幅し、A/Dコンバータ ((株)エルメック, 型名:EC-2360-1-1) を経由してパソコンにより記録した。また、長期のAE信号計測では、同時に発電機の運転・停止を判断するためにクランプメータ (横河IM&C株式会社, 形名 2345 03) を用いて発電機の負荷電流変化をモニターした。

発電機のマシンノイズを検討するため、発電機を起動し、回転子の回転数が定格回転に達しても界磁を行わない状態、つまり、発電機が機械的に通常通り動作し発電が行われていない状態の無励磁時のAE波の計測を行い、その後発電機が通常の稼働している状態つまり励磁時のAE波の計測を行った。

長期のAE波計測は、I 発電所で平成11年6月~平成11年10月の期間中に行ない、測定間隔は1時間ごととし、サンプリング周波数は100kHz (同時 4ch) , サンプリング時間は20msとした。発電機動作確認のクランプメータによる負荷電流の計測は、AE波測定の前に行なった。

III マシンノイズ除去技術の検討

AEセンサで観測される振動の主な要因としては、ローターの回転、電磁振動、部分放電によるものが考えられる。そのため、本実験で行った無励磁運転ではローターの回転による振動のみが観測され、励磁運転ではローターの回転、電磁振動、部分放電によるAE信号が重畳されて観測されると予測でき、また絶縁診断である部分放電試験では、固定子巻線で生じた部分放電によるAE信号が観測されていると考えられる。そこで、上記に挙げた各状態時のAE波を計測し、マシン

ノイズ除去技術について検討した。

3. 1 部分放電試験時のAE信号

固定子コイルでの部分放電をAEセンサを用いて診断する場合、AEセンサの設置箇所により、その信号は変化する。これは、伝播路が長くなるとともにAE源である部分放電の情報は減少し、観測されるAE波に伝播路の情報が増すためである。そこで、まずAEセンサを取り付け可能で最も伝播路が短くなる固定子鉄心とAEセンサの取り付け位置として容易な発電機壁面に各AEセンサを取り付け、それぞれのAE波を比較し、部分放電によるAE信号について検討した。

図2、3に各AEセンサで計測されるAE波の波形と周波数解析を行ったスペクトル強度分布を示す。それぞれの波形はU相の部分放電試験時の最大放電電荷量が15,000pCの場合である。図2より、固定子鉄心に取り付けたAEセンサのAE波は、これまでの室内実験の計測結果と同様に商用周波数(60Hz)の半サイクルで強く振動する波形として観測できる⁽⁵⁾。

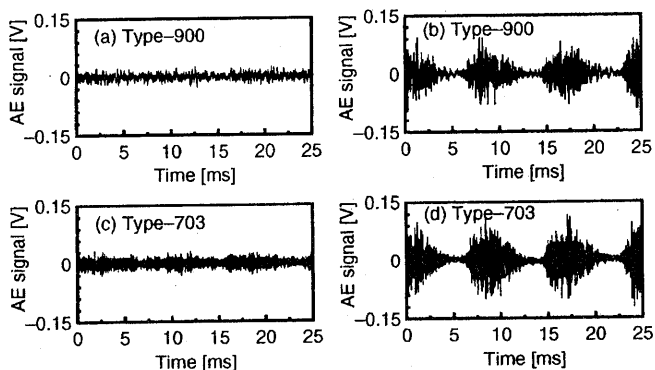


図2 AEセンサ信号波形例

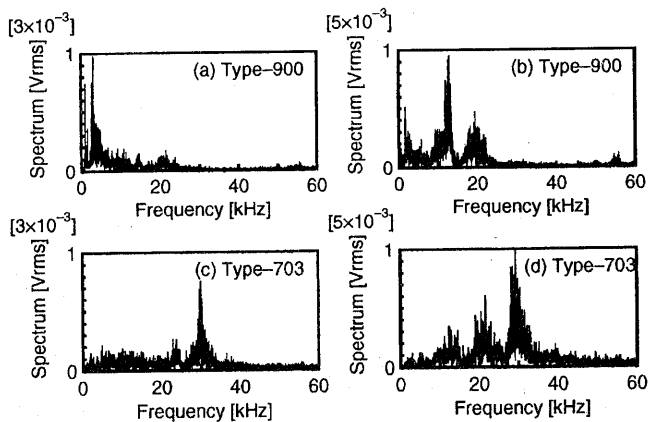


図3 スペクトル強度分布

しかし、発電機外壁に取り付けたAEセンサで観測される信号には部分放電によって生じると見られる波形は顕著に観測されなかった。発電機外壁にAEセンサを設置している場合、AE波の伝播経路が長く複雑であり、部分放電によって生じたAE信号は伝播途中で減衰したためと考えられる。ただし、どちらの設置位置においても最大放電電荷量の増加に伴うAE波の最大振幅の増加は見られた⁽⁶⁾。図3のスペクトル強度の分布からは、固定子鉄心にAEセンサを取り付けた場合、最大放電電荷量の増加に伴いセンサType-900では10kHz～25kHz、センサType-703では10kHz～35kHz付近でスペクトル強度が著しく増加していることがわかる。

図4には、センサType-703の周波数応答特性と固定子鉄心にに取り付けたセンサType-703のAE信号のスペクトル強度分布を示す。センサType-703の周波数応答は15kHz以下の低周波で40dB以下と周波数応答が低いことがわかり、そのため本実験のセンサType-703を用いたAE波計測では低周波で小さくなっていると思われる。

これらの結果から、計測されるAE波のスペクトル強度分布は、AE波の伝播経路による影響と各AEセンサの特性に左右され変化することがわかり、センサの設置位置については固定子鉄心でよくAE波を観測できることがわかった。また、部分放電によるAE信号は各センサの特性により異なりセンサType-900では10kHz～25kHz付近、センサType-703では10kHz～35kHz付近であることがわかった。

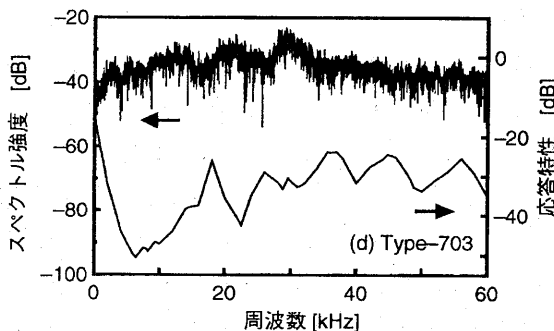


図4 AE信号スペクトル強度とAEセンサの応答特性 (Type-703)

3. 2 無励磁運転時のAE信号

図5にセンサType-900で計測した無励磁、励磁運転時のAE波の波形とスペクトル強度分布例を示す。励磁運転と無励磁運転時におけるAE波のスペクトル強度分布は、センサType-900では数kHz～30kHz付近、センサType703では数kHz～90kHz付近までの広い範囲に亘ってスペクトル強度の変化が見られた。無励磁運転時に観測されるAE波は、ローターの回転による振動によるものと考えられるが、両センサにおいて10kHz以下に顕著に生じた。励磁運転時には周波数1.2kHz程度の強い振動が観測されるが、これは電機子で発生する電磁振動によるものと思われる。

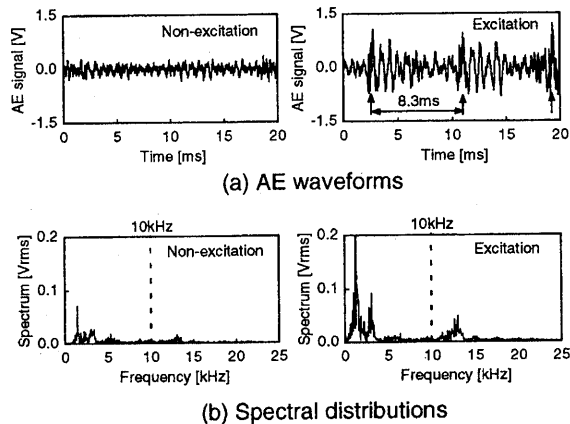


図5 無励磁・励磁運転時のAE波とスペクトル強度分布例

すなわち、無励磁運転時と励磁運転時のAE波の比較から発電機の稼働時において観測されるAE波からのマシンノイズの除去は、10kHz以下の低周波領域をカットすることで、ある程度マシンノイズの除去が可能であることがわかった。

3. 3 AE信号強度の評価

部分放電によるAE信号の周波数はAEセンサの特性、設置場所によって変化するが、部分放電試験より部分放電で発生するAE信号は10kHz以上の周波数帯域で観測され、無励磁運転時に計測されるマシンノイズは10kHz以下で特に大きいことがわかった。そこで、まず計測したAE波から10kHz以下の低周波帯域を取り除いた。図6 (a)に、図5 (a)の無励磁、励磁運転時のAE波の10kHz以下の低周波領域を削除し、逆フーリエ変換を行った波形を示す。図6 (a)の励磁運転時には、商用周波数の半サイクルで生じる振幅の大きい波形が見られ、これが部分放電により生じたAE信号と思われる。

そこで、本研究では、マシンノイズの高周波成分までを完全に除去できたわけではないが、AE信号の強度を図6 (a)の最大振幅とした。ただし、その際に電気的高周波ノイズを除去するためにエンベロープ処理を行った。エンベロープ処理は、分解能を高めるために図6 (a)の負の値を反転させてフーリエ変換を行い、次に1 kHz以上の高周波帯域を削除して逆フーリエ変換を行なった。図6 (b)にはエンベロープ処理を行った波形例を示す。図6 (b)より無励磁時の信号レベルはローターの回転によるマシンノイズ、すなわちノイズレベルに相当し、励磁時の波形の最大値からノイズレベルを差し引くことで部分放電によるAE波の強度を抽出できることがわかる。

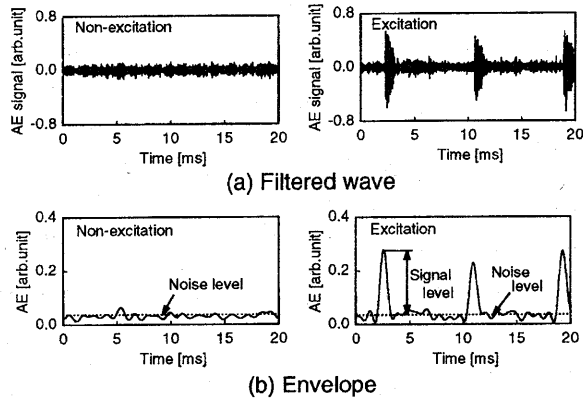


図6 低周波領域(10kHz以下)を削除した波形

IV 絶縁診断試験におけるAE波強度

図7には、部分放電試験における各印加電圧に対する最大放電電荷量、AE信号強度を示す。各センサは図1に示す位置に配置し、各AEセンサ信号強度は印加電圧3kVの値を0dBとして表示している。鉄心に取り付けたAE信号強度は、壁面に取り付けた場合に比べ、SN比がよくまた最大放電電荷量の変化とよく一致していることがわかる。これからもAEセンサにより部分放電を検知できていることが確認できる。図1(d)に設置したType-703のAE信号強度は、印加電圧が5kVから変化が現れ、7kVまで急激に上昇し、その後は徐々に上昇している。この傾向はAEセンサの型が異なるType-900

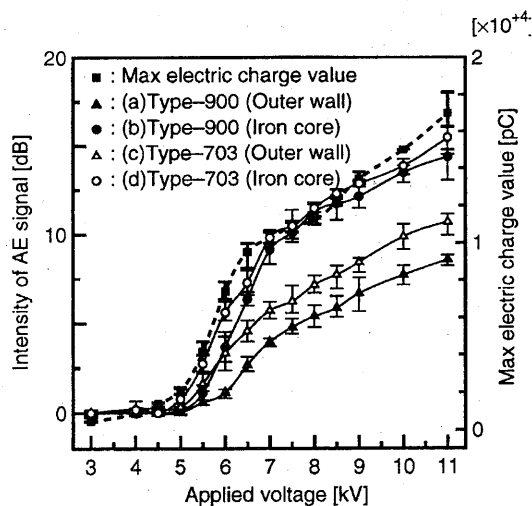


図7 印加電圧対AE信号強度

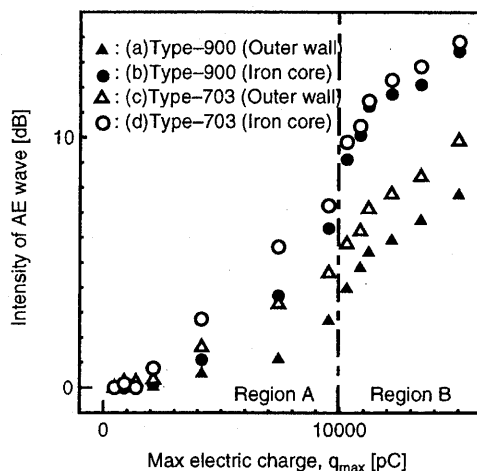


図8 最大放電電荷量対AE信号強度

でもType-703と同様の結果を示している。図8には最大放電電荷量とAE信号強度の関係を示す。図より最大放電電荷量が10,000pCを境にして最大放電電荷量とAE信号強度の関係が異なっていることがわかる。交流試験におけるU相の内部放電開始電圧は7.02kVであり、その時の最大放電電荷量は10,000pCである。この値は、最大放電電荷量とAE信号強度の関係が異なってくる最大放電電荷量の値とほぼ一致している。

すなわち、内部放電開始電圧以下では、微少な放電電荷量とAE信号の変化が見られ、これは固定子コイルの劣化した部分で生じた部分放電をAEセンサが検知し、内部放電開始電圧以上ではAEセンサ設置付近で生じる部分放電が重畳されて観測されているものと思われる。

V 長期計測によるAE波変動の検討

図9には1999年6月17日～6月30日までのAE波強度の変化を示す。AE波強度が-5dB以下の図に表示されていない時間帯は発電機が停止した状態を示す。図よりAE波強度が特に発電機起動時に著しい変化が見られ、長時間の運転では安定したAE波強度となっている。発電機起動からAE波強度が安定するまでには数時間を要している。通常運転時の巻線温度は80℃程度であり、そして停止後徐々に低下する。固定子巻線温度が80℃に達して安定するまでに3時間程度を要し、発電機起動からAE波強度が安定するまでの時間によく一致する。そこで、巻線温度変化を3つのパターン（A:73℃以下（急激な温度変化時）、B:73℃～81℃、C:81度（温度安定時））に分け、その際のAE信号の変化をまとめた。図10は巻線温度変化に対するAE波強度を示す。巻線温度が上昇すると共に

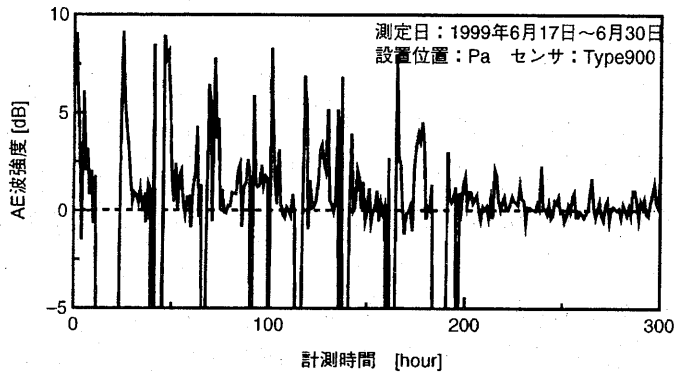


図9 各発電機運転状態におけるAE信号強度

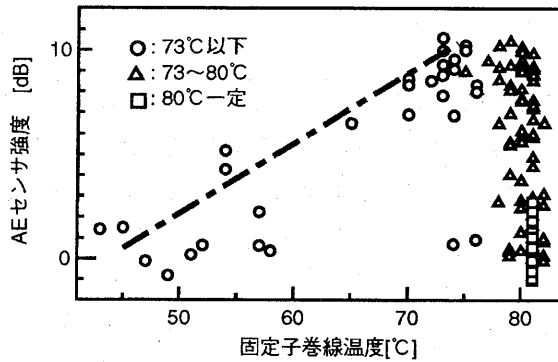


図10 各発電機運転状態におけるAE信号強度

AE波強度は増加し、巻線温度が80°C前後ではAE波強度が著しく変化している。また、巻線温度が安定するとAE信号レベルが減少し、安定することがわかる。

今回の現象は特に梅雨の時期に行われた実験で顕著に見られ、また固定子巻線の吸湿に関する報告では、最も吸湿の影響を受けやすいのは絶縁劣化の進行した絶縁層との報告がある⁽⁸⁾。発電機停止中に固定子巻線の絶縁劣化の進行した部分で吸湿が行われ、発電機起動により固定子巻線の温度上昇、それと共に吸湿された水分が蒸発し絶縁耐力の低下によって部分放電が生じ、巻線温度の上昇と共にAE波強度も上昇する。そして、巻線温度が高温のまま長時間稼動することで湿度は徐々に低下し、絶縁耐力は上昇して部分放電が生じにくくなる。

すなわち、発電機が長時間稼動するとAE波強度は低下する。そのため、本研究の発電機起動時に見られるAE波強度の変化は、絶縁劣化箇所が生じた部分放電の可能性が高いと推測される。

VI まとめ

部分放電試験，無励磁試験により得られたデータより，AE波スペクトル強度分布の10kHz以下を削除することで，ある程度のマシンノイズ除去が可能であることがわかった。また，吸湿の影響を受けやすい固定子巻線の劣化部分で生じる部分放電が発電機起動時に生じることをAEセンサを用いて検出できた。

今後は，これまで発電機固定子巻線の絶縁劣化をAE波計測のみによるトレンドから診断を試みていたが，発生する部分放電が発電機の運転状態，特に環境（温度，湿度，気圧等）によって変化するため，発電機の運転状態（固定子巻線の環境）に応じた劣化レベルを検討していく予定である。

VII 謝辞

本研究課題についてご鞭撻を頂いた宮崎大学工学部本田親久教授，大坪昌久助教授に謝意を表する。また，熱心にご協力頂いた宮崎大学工学部の大塚和寛君に深く謝意を表します。なお，本研究の実験の一部は本学の実験講義室を使用し，波形解析においては本学の大学共同研究情報機器を利用したことを記す。

参考文献

- (1) 小沢，八坂，後藤，臼井：「水力発電所の絶縁劣化診断技術」，日立評論，Vol. 75，No. 12，pp.65-68，1993.
- (2) 金神，林田，西尾，渡辺，坂田，松川，池田：「水車発電機コイル用測温センサからの放電パルス検出法の検討」，平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会，662，pp.1107-1118，1997.
- (3) 内河，角田，三上，吉田，阿戸：「水車発電機運転中部分放電測定の基本検討(5)ーサーチコイルと絶縁診断車の比較測定ー」，平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会，663，pp.1109-1110，1997.
- (4) 竹之内，大坪，本田，成，金子，辻，剣田，賛田，原田：「超音波センサを利用した水車発電機の部分放電観測」，電気設備学会誌，Vol. 20，No. 10，pp.820-827，2000.
- (5) T.Tsuji, T.Kaneko, M.Otsubo, C. Honda, T.Yuji, O.Takenouchi, K.Tsurugida, K.Tamatsu, K. Tanaka, "Characteristics of Insulation Diagnostic of Stator Winding on Water-Wheel Generator using Method of Analysing Acoustic Emission", Proceedings of the XIII International Conference on Gas Discharge and their Applications, Vol. 2, No. L8, pp.1013-1016, 2000.
- (6) 辻，金子，迫田，渡辺，大坪，本田，湯地，竹之内，山津，田中：「水車発電機固定子コイルのAE波計測による絶縁診断(3)」，電気学会放電研究会資料，ED-00-12，pp.67-72，2000.

超音波センサを用いた水車発電機固定子巻線の絶縁診断技術 (辻 利則)

- (7) (株)NF回路設計ブロック, AE講習会テキストD:508265
- (8) 水力発電機器の劣化評価調査専門委員会編, 電気学会技術報告(Ⅱ)部第308号

所属・職:

- 辻 利則 (宮崎公立大学・講師)
- 湯地敏史 (宮崎公立大学・研究生, 佐土原高校・実習教諭)
- 金子正光 (宮崎公立大学・教授)
- 山津謙一 (九州電力株式会社・宮崎支店 発電電課)

