

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

竹村 明人¹⁾・上田 隆司²⁾・金子 正光³⁾・竹之内 修⁴⁾・成 烈汝⁵⁾
大坪 昌久⁶⁾・本田 親久⁶⁾・福良 敦司⁷⁾・田邊 泰典⁷⁾・田中 和洋⁷⁾

Development of Insulation Diagnosis System of On-line Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques

Akito TAKEMURA, Takashi UEDA, Tadamitsu KANEKO, Osamu TAKENOUCI, Youl-Moon SUNG, Masahisa OTSUBO, Chikahisa HONDA, Atsushi FUKURA, Yasunori TANABE, Kazuhiro TANAKA

Abstract

Establishment of Condition Based Maintenance (CBM) for hydrogenerator is very important for monitoring the insulation of stator windings. The partial discharge (PD) testing is a promising method of stator winding insulation of hydrogenerator conditions monitoring. Therefore, the on-line PD testing has been used to provide useful information to diagnose and monitor the integrity of stator winding insulation of many hydrogenerators. In this paper, we have developed insulation diagnosis system of on-line hydrogenerator stator windings using acoustic emission (AE) sensors. Using this developed system, we estimated maximum PD position on stator windings that were the weakest point of insulation of hydrogenerator. Additionally, we investigated that this system was very useful for insulation diagnosis of hydrogenerator by comparing off-line test with AE measurement.

Key Words:

On-line insulation diagnosis, CBM, Hydrogenerator, Location of maximum PD, AE detection techniques

1. はじめに

水車発電機は現代社会を支える重要なインフラであり、各電力会社は、電力供給の信頼性を確保しつつ、水車発電機の効率的運用を追求している。1950年代から水車発電機巻線の絶縁方式としてエポキシレジン絶縁系が採用され、近年、巻き替え・更新実施の時期を

迎えるプラントが増加してきている。そのため、老朽化したエポキシレジン絶縁方式の水車発電機において、事故の未然防止、機器の効率的かつ経済的な運用などの観点から巻線の余寿命診断技術が要求されている。発電機の保全方式としては、これまで時間計画保全が主流であったが、近年は機器の状態監視に基づく保守管理を行う状態監視保全に移行しつつある。運転中の水車発電機巻線の絶縁最弱点部の検出技術の確立は状態監視保全を行う上で、最重要な研究課題の一つである。

水車発電機は負荷調整運転を行っており、起動・停止や負荷変動が頻繁である。そのため、水車発電機固定子巻線は、ヒートサイクルに伴う熱応力などの機械的ストレスと電氣的・熱的ストレスの複合作用により、絶縁耐力が経年的に急速に低下していくことが知られ

- 1) 宮崎大学電気電子工学専攻大学院生
- 2) 宮崎大学電気電子工学科学部生
- 3) 宮崎公立大学人文学部教授
- 4) 航空大学校助教授
- 5) 宮崎大学電気電子工学科助教授
- 6) 宮崎大学電気電子工学科教授
- 7) 九州電力株式会社宮崎支店

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 ⁽⁵⁾
Transformer	Arrival time interval of AE signal ⁽⁶⁾⁽⁷⁾
GIS	Arrival time interval of AE signal ⁽⁸⁾

ている⁽¹⁾。このため、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水車発電機固定子巻線の絶縁診断法の確立が重要である。

水車発電機固定子巻線の内部で部分放電(PD)が発生した場合には、電気的なパルスと同時に微小音響が発生する。一般にこれらの音響の周波数領域はかなり広いが、その超音波成分を検出するのが超音波(AE)法である。著者らのこれまでの研究成果から、運転中の発電機に生じる磁気振動や回転子の回転による機械的なノイズの除去方法を提案し、その有効性を実証した⁽²⁾⁽³⁾。さらに、水車発電機起動直後のPDレベルは大きく変化し、定常運転時のPDレベルは平均して一定であることなどの知見を得た⁽⁴⁾。

2. 水車発電機固定子巻線の部分放電発生位置評定

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かを調べるには、巻線の取替計画を考えるうえで重要となる⁽⁶⁾。

表1はAE法による電力機器の位置評定の方法を示す。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。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で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

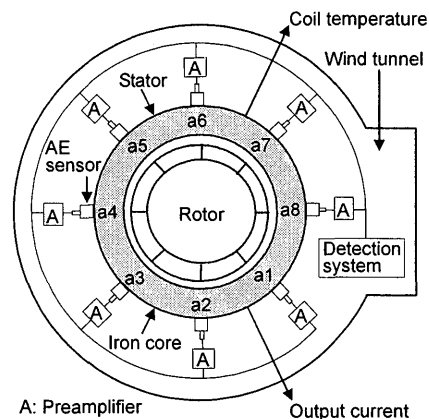


図1 AEセンサ測定技術を用いたフィールド試験における実験装置の概略図

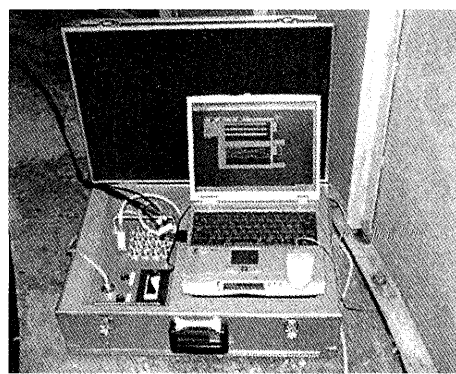


図2 AE信号検出によるPD位置評定システム

と考えられる。

本論文では、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ができるコンパクトで可搬性に優れた絶縁診断システムを開発した。そして、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ので報告する。

3. 絶縁診断システムとPD発生位置評定の実験方法

定格電圧及び定格容量がそれぞれ11.0kV/20700kVAのI-発電所の運転中水車発電機を対象に、エポキシレジン絶縁系の固定子巻線のPD発生位置を複数のAEセンサを用いて調べた。また、I-発電所の水車発電機は1968年に製造された発電機で、図1は実機における実験装置の概略図を示す。本実験は、超音波法の利点であるAEセンサの取り付け取り外しが容易であること

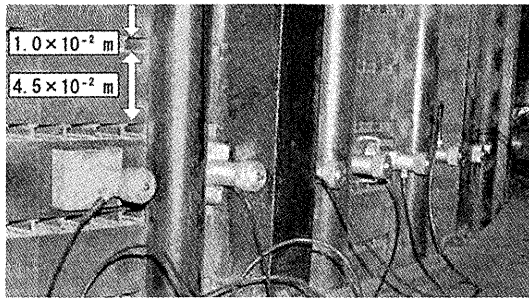


図3 固定子鉄心外枠へのAEセンサ取り付け写真

を利用している。まず、図1に示すように、複数のAEセンサにグリスを塗布し、マグネットホルダーにより固定子鉄心外枠全体に取り付けた。そして、PDによるAE信号を最も大きく検出した位置を中心にAEセンサ間距離を短くして取り付けした。続けて、さらにPDによるAE信号を顕著に検出する位置を探し、AEセンサ間距離をさらに狭めていき、PD発生位置の推定を試みた。このように、AEセンサの移動は複数回行い、センサ間の距離は2m、0.5m、0.2m、0.1mとしていった。図3に固定子鉄心の水平方向の外枠に複数個のAEセンサを取り付けたときの写真を示す。使用したAEセンサはtype-703(703型、NF Electric Instruments, Model: AE 703S, 共振周波数: 70kHz)を用いた。AEセンサで検出した微弱なAE信号はプリアンプ(NF Instruments, Model 9917, Band width of frequency: 2kHz-1.2MHz)を用いて増幅し、本研究で開発した絶縁診断システム(Detection system: 図2に示す)によりデータ取り込みを行った。この装置はサンプリング周波数250kHzでデータ取りこみ可能なA/Dコンバータを内蔵しており、リアルタイムで各センサの取り付け位置におけるPDによるAE信号強度を調べることができる。まず、AE信号データを取りこむとすぐに、LabVIEWを用いた計測解析プログラムによりフィルター処理(マシンノイズである10kHz以下をカット)を行い、続いて、エ

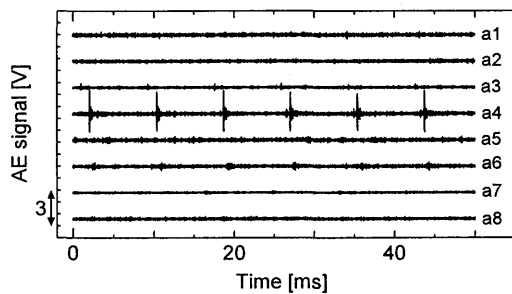


図4 PDによるAE信号のフィルター処理波形例(10kHz以下カット、センサ間隔: 2m)

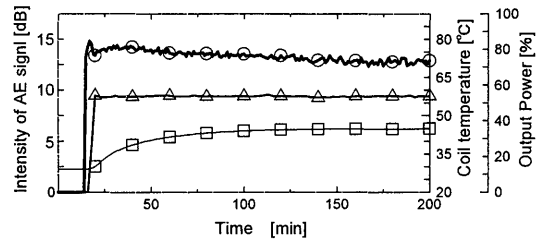


図5 AE信号強度及び巻線温度、出力の時系列特性

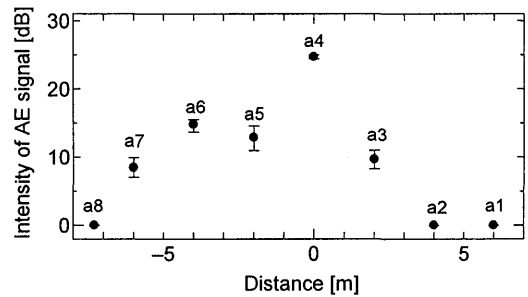


図6 センサ間隔2mにおけるAE信号強度の水平位置特性

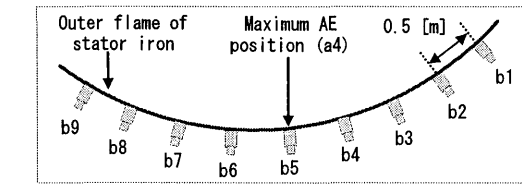
ンバーロープ処理を行い、ローパスフィルター処理(1kHz以上をカット)して、最大値のAE信号強度を表示できるようにしてある。

4. 実験結果と考察

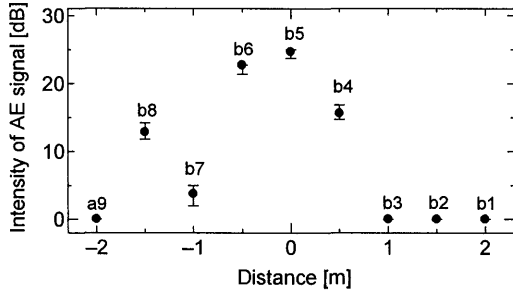
4.1 固定子巻線の部分放電位置特性

図4は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の特徴が最も顕著に現れていることがわかる。図5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6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

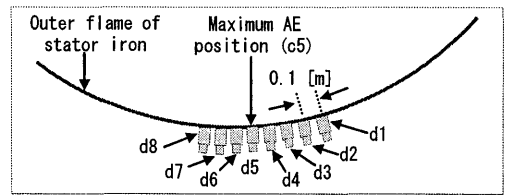


(a) Setting position of AE sensor

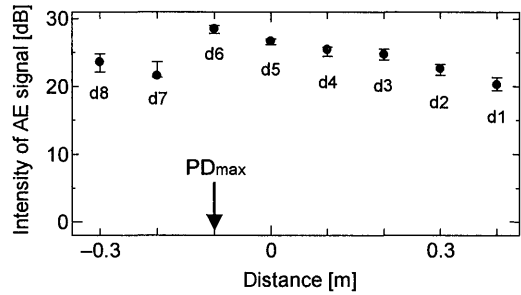


(b) Intensity of AE sensor at each position

図7 センサ間隔 0.5m における AE 信号強度の水平位置特性

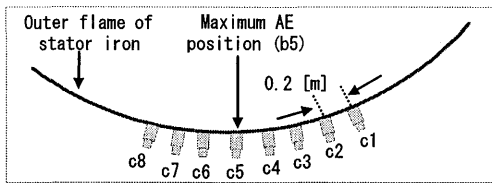


(a) Setting position of AE sensor

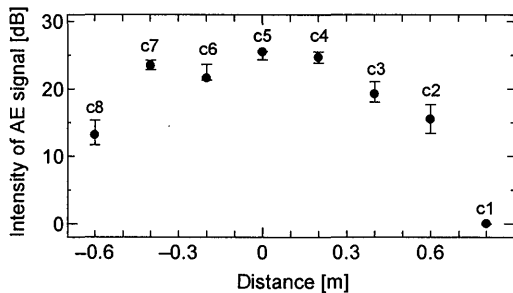


(b) Intensity of AE sensor at each position

図9 センサ間隔 0.1m 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8 センサ間隔 2m における AE 信号強度の水平位置特性

が最も高い AE 信号強度を示しており、位置 a4 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 6 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 6 の位置 a4 を中心に 0.5m 間隔で AE センサを配置した。図 7(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 7(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に最も近いことが推測できる。

図 7(b)から位置 b5 が部分放電発生位置に最も近いと推測できるので、さらに、図 7 の位置 b5 を中心に 0.2m 間隔で AE センサを配置した。図 8(a)に b5 (ここでは c5 とした) を中心に 0.2m 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。図 8(b)に 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 8(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 9(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 9(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

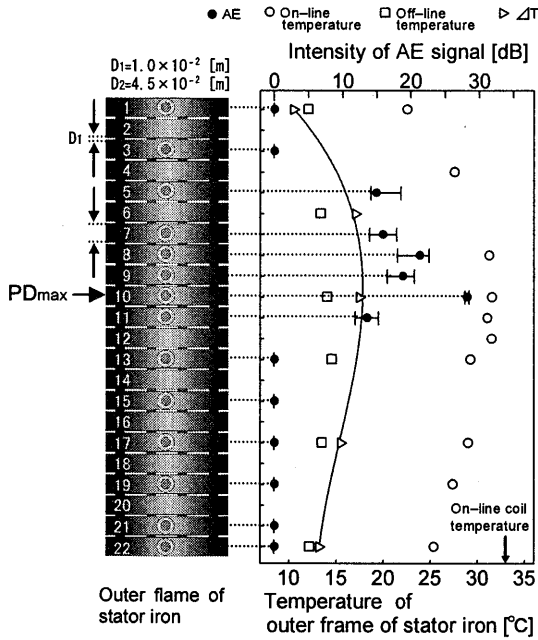


図 10 各センサにおける AE 信号強度の垂直方向特性と固定子鉄心外枠の温度分布

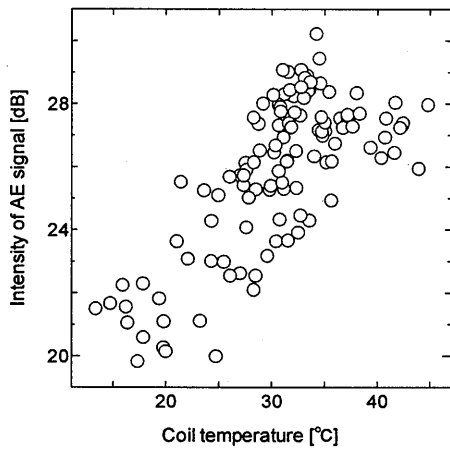
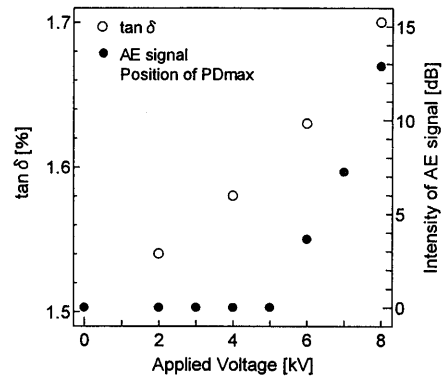


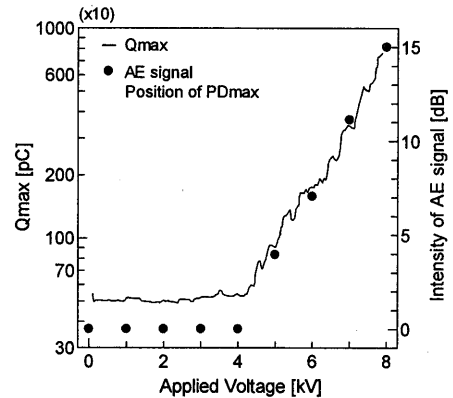
図 11 定常運転時における平均 AE 信号強度対巻線温度特性

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 10 に水平位置 d6 (図 10 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 (図中●プロット) を調べた結果と固定子鉄心外枠における発電機運転中の温度分布 (図中○プロット) と発電機停止中の温度分布 (図中□プロット)、発電機運転中と停止中の温度差 (図中▷プロット) を示す。



(a) 誘電正接試験



(b) 部分放電試験

図 12 オフライン試験における AE 波同時測定

ロット) 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は図 10 の左図に示してある。図 10 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 10 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。鉄心外枠の中間位置付近では最も固定子鉄心外枠の温度が高くなっており、鉄心外枠 10 番目の位置で PD による AE 信号強度も最大となっている。

図 11 は取り付け位置 a3 (図 1 中) における約 4 ヶ月間の運転データを整理して、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 番目の中間位置で最も大きい 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、図 10 の固定子鉄心外枠の温度分布に示されるように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、さらに、発電機運転中と停止中の温度差が大きいのでヒートサイクルに伴う劣化も進展したと考えられる。⁽⁹⁾

4.2 オフライン試験時における AE 波同時測定

最大 PD 発生位置へ AE センサを設置して水車発電機停止中における誘電正接試験、部分放電試験において本研究で開発した絶縁診断システムを用いて AE 波の同時測定を行った。その結果を図 12 に示す。

誘電正接試験結果を示す図 12(a)において $\tan \delta$ 値は印加電圧と共に上昇し、AE 信号も 5kV 付近を境にして増加し始めている。

また、部分放電試験結果を示す図 12(b)において最大放電電荷量 Q_{max} は印加電圧 5kV 付近で、PD が発生し始めたと考えられ、 Q_{max} の上昇と共に AE 信号も同様に増加し、高い相関が見られる。部分放電試験では放電パルスとして直接に計測するので、詳しいデータが得られることと、局所的な放電も適確に測定できることが特徴として挙げられ、 Q_{max} と AE 信号の相関が高いことから絶縁診断に対する本装置の有効性が確かめられた。

5. まとめ

本実験では、著者らの開発による絶縁診断システムを用いることにより、リアルタイムで各センサの取り付け位置における PD による AE 信号強度を調べて、水車発電機固定子巻線の PD 発生位置を推定した。その結果、複数回取り付けを行うことで、水車発電機固定子巻線における最大 PD 発生位置を推定できた。また、オフライン試験と最大 PD 発生位置における AE 波同時測定を行った結果、本システムは水車発電機固定子巻線の PD を検出しその特性を調べる上で非常に有効であることがわかった。

実験対象とした I-発電所の水車発電機においては、

垂直方向では中間の高さにおける部分放電による AE 信号が最も大きく、この原因として、固定子の中間位置では最も温度が高くなっているため、熱的な劣化が顕著に進展し、固定子中間位置での PD による AE 信号が最も大きくなったと考えられる。

最後に、本研究は、宮崎大学と九州電力(株)宮崎支店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。

参考文献

- (1) IEEE Trial-Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery, IEEE Std 1434-2000
- (2) 竹之内・他：「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、20、10、pp. 820-827(2000-10)
- (3) 辻・他：「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、122、4、pp.513-517(2002-4)
- (4) T.Kaneko, et al.,: On-line Partial Discharge Measurement of Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques, T.IEE of Japan, Vol.124-B, No.2, pp.274-281
- (5) T.Kaneko, et al.,: Estimation of Position of On-line Partial Discharge on Hydrogenerator Stator Windings using Acoustic Emission Detection Techniques, T.IEE of Japan, Vol.124-A, No.7 (掲載予定)
- (6) 中村・他：「音響法による油入変圧器の放電点評定に関する実験的検討」、電学論 B、116、10、pp.1285-1291 (1996-10)
- (7) K.Arii, et al.,: "Position Determination of Partial Discharge by Sound Signals In a Model Transformer", 2002 Korea-Japan Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp.1-4, Seoul, Korea (2002-11).
- (8) 小迫・他：「GIS 中の超音波伝搬特性とそれに基づく新しい部分放電発生位置評定」、電学論 B、121-B、5、pp.677-682(2001-5)
- (9) 金神・他：「温度センサを用いた水車発電機コイル用部分放電監視システム」、誘電・絶縁材料研究会、DEI-01-50、pp.57-61(2001-2)