

部分放電による高圧電動機の絶縁劣化評価手法の検討

Evaluation of Deterioration of Insulators in High-Voltage Motors by Partial Discharge

三上 雅生 (Masao Mikami) *

要約 原子力発電所で数多く用いられている高圧電動機の絶縁劣化を早期に検出するため、運転中に絶縁物中の部分放電を測定するオンラインモニターを使用し、実際の原子力発電所で稼働中の約150台の高圧電動機について部分放電測定を試みた。この測定結果から、経年的な絶縁劣化の傾向が把握出来ることがわかった。しかし、運転中の測定結果と停止中の部分放電試験との相関は得られず、コイル温度等の環境条件の影響で測定値に変動が見られることがわかった。また、本オンラインモニターを用いた位相特性に注目した診断により、固定子コイルエンドの異相間放電が診断できることを示した。

キーワード 高圧電動機, 絶縁劣化, 部分放電, オンラインモニター

Abstract For the purpose of early detection of deterioration of insulators in high-voltage motors which are widely utilized in nuclear power stations, a new type on-line partial discharge monitor developed at INSS was applied to test the deterioration of about 150 sets of high-voltage motors running in nuclear power stations practically. From the results, it is shown that (1) tendency of the deterioration can be obtained by this method in general, (2) the magnitude of the on-line partial discharge hardly correlates with that of off-line measurement, but depends on temperature and other environmental conditions, and (3) by observing phase characteristics of partial discharge, it is possible to make a diagnosis of phase-to-phase tracking in end-winding coils of a stator.

Keywords high-voltage motor, deterioration of insulators, partial discharge, on-line monitor

1. はじめに

原子力発電所では他のプラントと同様に、回転機器の駆動源として電動機を多く用いており、特に大型機器には高出力の高圧電動機 (3.3~6.6kV) を使用している。関西電力(株)の原子力発電所の場合、その出力の大小により1ユニット当たり13台から46台の高圧電動機が使用されている。その中で1次冷却材ポンプをはじめ、いくつかのものは運転中に故障すると発電所の運転に支障を来すのはもちろん、安全上も問題を起こす恐れがあるため、高圧電動機の寿命の予測が重要であり通常はその予防保全策がとられている。

高圧電動機の寿命は、主に固定子コイル絶縁の劣化といわれる。ただ電動機の故障分析を実施すると、絶縁劣化トラブルに比較して、軸受、端子部のトラブルの方が多い⁽¹⁾が、これらは部品の交換や局部的補修で簡単に対応できる。一方絶縁劣化トラブルの場合には、電動機一式の取替えとなる場合が多いの

で、固定子コイルの絶縁寿命管理が重要である。

電動機固定子コイルの劣化要因として、(1) 絶縁層に電圧が印加されることで進展する部分放電、高電界下のトリッキングなどの電氣的劣化、(2) 絶縁層はマイカなどを樹脂(エポキシレジン)にて接着し、これを積層したもので構成されており、運転中の発熱によって絶縁層内に剥離やクラックが進展する熱劣化、(3) 機器の運転によって生じる熱応力等に伴う引張、圧縮、曲げ応力の繰返しによる絶縁層の剥離、割れが生じる機械的劣化、(4) 絶縁部が湿潤状態や汚損物質との接触または浸漬による環境劣化などが考えられる。実際の電動機では、これらの要因が相乗的に作用して複合劣化となり加速度的に劣化が進展する⁽²⁾。通常、電動機固定子コイルの絶縁劣化診断は、主に直流吸収試験、誘電正接試験、交流電流試験および部分放電試験などの電氣的試験があり、これらの総合評価で判定が行なわれている。

絶縁層中に空隙が存在すると交流電圧の印加により空隙部で部分放電が生じる。誘電正接試験や交流

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

電流試験が絶縁層内部のボイド放電を放電電流としてとらえてボイドの量を示す指標とするのに対して、部分放電試験は一つ一つのボイド放電を放電パルスとして捉えるもので、最大放電電荷量（以下 Q_{max} と記す）が最大ボイドの大きさを示す指標となる。

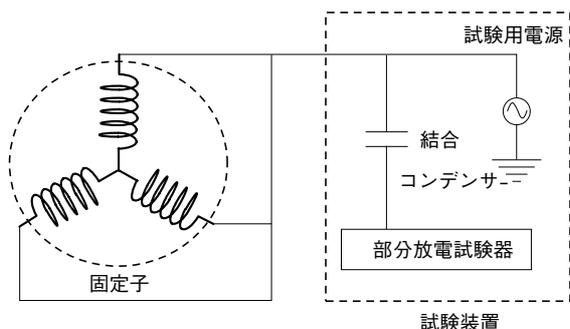


図1 従来の部分放電測定回路

従来から固定子コイルの絶縁診断として前記の電氣的試験と、回転子を抜いて固定子コイル各部を点検する外観目視点検が行なわれているが、回転子を抜く手間と高電圧を印加するための大掛かりな装置が必要で、通常の点検周期も4年から6年で、より頻繁な点検は困難であった。これらの点を改善するため運転中（オンライン）の部分放電による診断法の技術開発が期待されて、国内外で数多くの研究がなされている。発電機については早くから、カナダやアメリカにおいて、水車発電機コイルの電磁振動に起因するスロット放電を検知・診断するモニタリングシステムの開発と実用化が行なわれており⁽³⁾、放電信号の検出方法だけとりあげても以下のようなものがある。

- (1) カップリングコンデンサーを用いて電源ラインから検出する方法
- (2) 高周波変流器を電源ラインに取り付け検出する方法⁽⁴⁾
- (3) 専用のアンテナにより放射波を検出する方法⁽⁵⁾
- (4) 測温抵抗体をアンテナの代用をする方法⁽⁷⁾
- (5) 固定子に超音波検出器を取り付け衝撃波を検出する方法⁽⁶⁾

われわれは以前に、高圧電動機に内蔵されている測温抵抗体（Resistance Temperature Detector, 以下RTDと記す）を用いたオンライン部分放電モニターを開発している⁽⁷⁾ので、実際に原子力発電所で使用されている多数の高圧電動機にこれを適用し、使用期間（等価年数）や使用温度などにも着目して測定をおこなった。ここではその測定結果と考察を報

告する。

2. オンライン部分放電モニターの概要

2000（平12）年に開発した携帯型部分放電モニターは、巡回点検で部分放電データの計測が可能なように①小型・軽量化、および②採取時間の短縮化を図った携帯型システムである⁽⁷⁾。



図2 オンライン部分放電モニター写真

図1、図3は部分放電測定回路を示すが、従来の停止時 Q_{max} 測定は、3相一括に試験電圧を供給し徐々に電圧を上昇させながら、規定電圧（3.8kV）での放電パルス波高値を計測している。各コイルに印加される対地電圧は規定電圧であり、相間電圧、ターン間に電位差はない。一方、運転中の部分放電測定には、電動機に設置されているRTDを放電パルス検出器として使い、各コイルにはそれぞれ分担した対地電圧があり、相間、ターン間にもそれぞれ電位差がある。

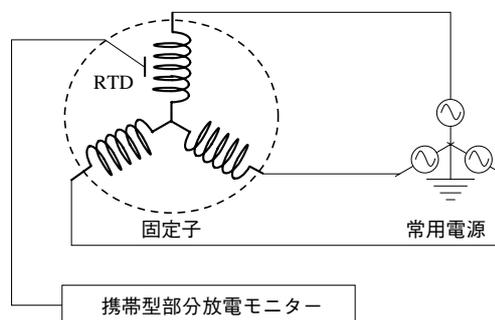


図3 オンライン部分放電測定回路

電動機のRTD端子台上蓋の開放・閉止を含め1台当たり20分程度で測定は終了する。

3. 実機での測定の方法とその結果

3.1 対象とした高圧電動機

関西電力(株)の原子力発電所(美浜, 高浜, 大飯発電所)では, 高圧電動機はいずれも予防保全の観点から固定子コイルの巻替えを実施中であり, 巻替え前の電動機とその同型機, 停止時 Q_{max} 測定値が高い電動機とその同型機, 高経年機, 巻替え直後の電動機を抽出した. 対象機は全て三菱電機(株)製の6.6kV三相誘導電動機である.

表1 対象とした高圧電動機台数

	台数	出力[kW]
美浜発電所	36	350~3760
高浜発電所	44	580~4300
大飯発電所	36	360~6000

3.2 測定方法

平成13年8月から季節毎に測定を実施した. ただし, 停止中の電動機について測定は実施していない. 測定値として60Hzの1サイクル毎に1回安定的に放電パルスが発生しているレベルである60pps (pulse per second)を採用し, これをPDレベル(測定電圧値)としている. これは, 部分放電試験における Q_{max} に相当する. 電動機固定子には通常円周上に3等分される位置にRTDが取り付けられておりRTD毎に自動計測し, 切り替えはケーブルの接続替えによって行ない最大値を測定結果としている. また, 一部の電動機はRTDがないのでその評価には接地線に高周波変流器を介して放電信号を測定した. なお測定に際しては, 気温, 湿度およびRTDの抵抗測定を行なうと共に, 部分放電パルスをデジタルオシロスコープで観測し, PDレベルの高い電動機については周波数分析を行なうことにした.

3.3 測定結果の例

部分放電モニターでの測定結果の例(パソコン表示画面の一部)を図6に示す. 上は1秒間の測定結果を電源電圧(60Hz)の位相に対してどのタイミングで放電しているかを表している位相-強度特性($\phi-q$)であり, 下はPDレベル[mV]を横軸に1秒間の累積個数を縦軸にした強度-累積特性($q-n$)で

ある. この場合, 1秒間に電源電圧に同期した正極負極とも均等に1000個以上の放電パルスが発生していたことがわかる.

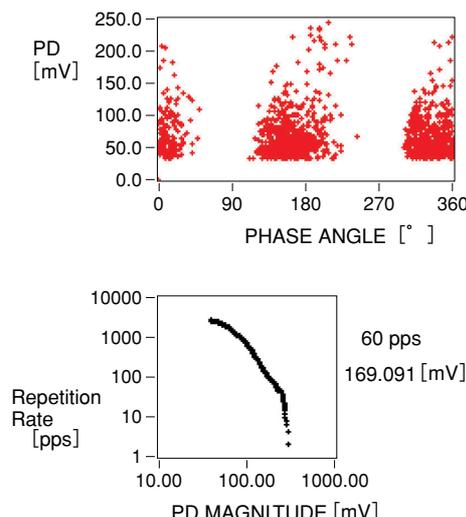


図6 放電位相-強度特性(上)と累積特性(下)の例

絶縁層内ボイドでの部分放電は電源電圧位相に対して正負同等に発生するが, コイルとの境界または鉄心との境界部の放電は, 電子の供給から正または負の放電となることが知られており(図7, 図8), 放電位相の評価は重要となっている.⁽⁸⁾

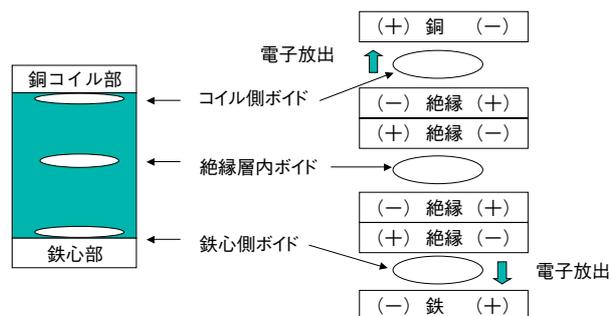


図7 絶縁層内ボイドでの部分放電モデル

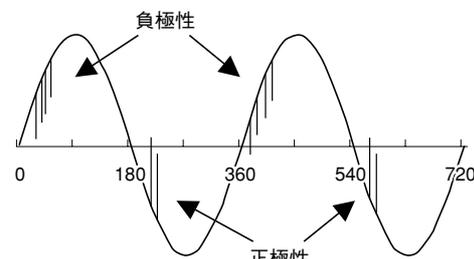


図8 放電パルスの正負極

3.4 等価運転年数と部分放電レベル

電動機メーカーから提案されている等価運転年数で評価したものを図9に示す。この等価運転年数は運転時間と停止時間の1/3を加算したものである。

等価運転年数で15年を過ぎても低いPDレベル(10[mV]以下)のものも散見できるが、10年前後から100[mV]を超えるものもかなりあり、一般にPDレベルは劣化傾向を示すものといえる。

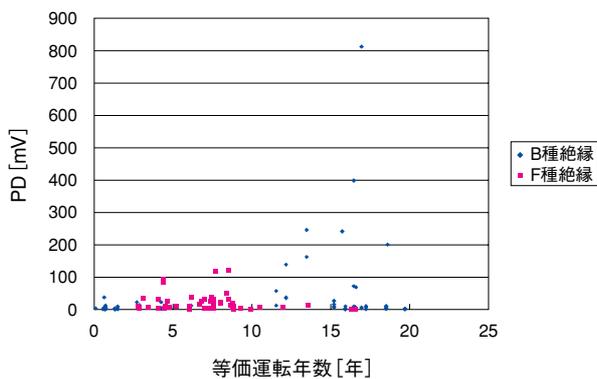


図9 等価運転年数とPDレベル

関西電力(株)では等価運転年数で16年から21.5年の間に計画的絶縁更新を行っており、20年近い等価運転年数でもPDレベルが1[mV]と低いものは、固定子巻替え前においても絶縁破壊電圧(BDV)が62.5, 64, 65.6および67[%], Q_{max} は8,200, 5,400, 1,400および7,200[pC]と劣化の少ない電動機であった。これら年数経過はしているがPDレベルの低い電動機は設計負荷に対して実負荷が少ない電動機で、表2に絶縁破壊試験の結果を示す。また、図9においてPDレベルが811[mV]の電動機E機については別項に記すが異間放電を起こしていた。

表2 絶縁破壊試験を実施した電動機の例

	運転年数 [年]	PDレベル [mV]	BDV [%]	Q_{max} [pC]	製造年
A	18.5	3.25	62.5	5,400	1974
B	18.5	1.25	64	8,200	1974
C	18.5	6.61	67	7,200	1970
D	19.7	0.82	65.6	1,400	1972

3.5 停止中の Q_{max} との関係

停止中の Q_{max} との相関関係が得られれば、停止中の測定で確立されてきた良否判定基準が使用出来、相

互補完できると考えられるが、今回の測定結果からはそのような相関は認められていない。その理由として停止中の Q_{max} は前述の測定回路にあるが3相一括で電圧を印加しており、各相各コイルとも対地電圧は規定値となっている。しかし運転中の測定では各コイルは接続位置で対地間電圧を分担しており中性点では対地電圧0[kV]となっている。またコイル温度も停止中は運転中と比べ低温となっており、信号の取り出し位置も停止中は電源端であるのに対してRTD挿入位置であり、放電パルス伝搬中の減衰も異なるからである。図10は同型式同出力(3800kw)18台の電動機のPDレベルと停止中の Q_{max} の関係を図示した。採取データ全て、同一機種毎等検討したが、停止中の Q_{max} との相関は得られなかった。

本モニターは測定の容易さもあり、従来より測定頻度を増やした傾向管理にて、絶縁劣化の兆候を検知することに適しているといえる。

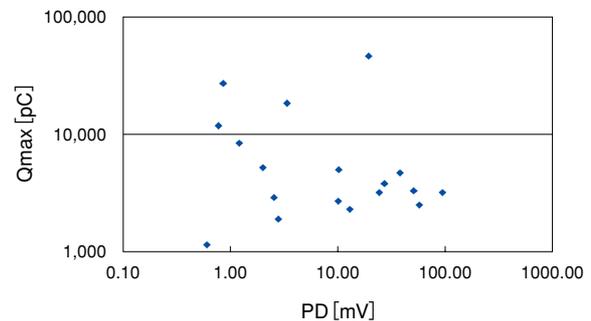


図10 同一型電動機のPDレベルと停止時の Q_{max}

3.6 PDレベルの経時的変動

本モニター開発中の試験において、PDレベルが時間的に変動している電動機が認められたため、外気温の変動を考慮して3ヶ月毎に測定した。また、一部の電動機は2ヶ月にわたり日2回の測定を実施した。さらにPDレベルの比較的高い電動機については、週2回の測定を2ヶ月間行なった。停止中の Q_{max} 測定でPDレベルの値はモーターコイル温度、外気温、湿度の影響で変動していたが、運転中でも一部電動機においてPDレベルの変動が確認された。F機の例を図11に示すが電動機には通常固定子全周を3等分した位置にRDTが設置されており、この図はそれぞれの測定値とコイル温度を示している。上の図は3ヵ月毎の測定値であり、下の図は週2回の測定値である。温度と共にPDレベルが変動しており、特に

RTD-1については図12のとおりコイル温度と相関関係にある。

類似の事象で負荷の変動により放電強度が変動する場合は固定子コイルの楔（くさび）のゆるみによるスロット放電があるが、この場合は位相一強度特性は正負同等であり、その可能性は否定できる。

また、コイル温度ばかりでなく表面汚損や雨天後の湿度上昇による影響が認められる電動機の例もあり、傾向管理上、ある程度の変動は許容する必要がある。

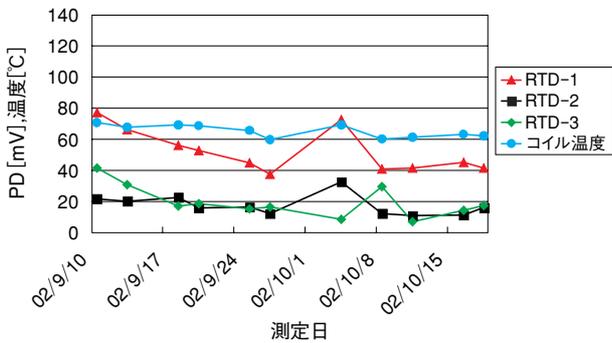
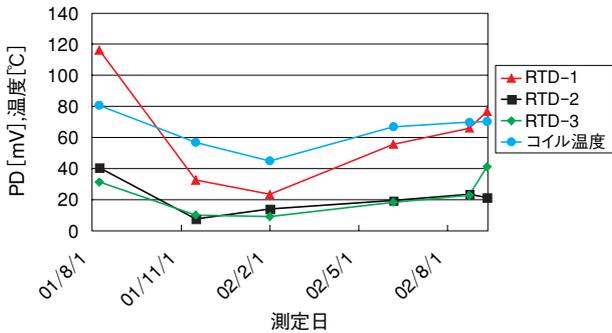


図11 PDレベルの経時変化例

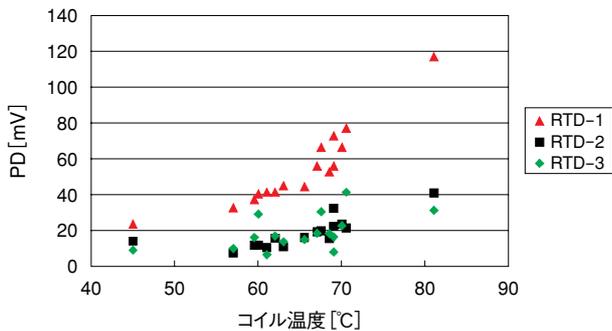


図12 コイル温度とPDレベルの関係例

3.7 高PDレベル電動機の点検結果

図9にてPDレベルが811[mV]であったE電動機は点検したところ、絶縁破壊の前兆である異相間放電によるトラッキング（放電痕）を認めた。E機の位相

特性、累積特性は、図13に示すとおり正負極性は同等ではなく、どちらか一方の信号が高い非対称性で、絶縁層内部放電でないことを示唆している。トラッキングがあったU1-1とW2-1コイルは両方とも口出し線に近く、相関電位は定格電圧の90%と高い部位で、付着粉塵の影響で放電を起こしていたものと推定される。コイルエンドの拡大写真を図14に示すが、付着粉塵で写真では認識できない小さなトラッキングであった。このトラッキングは、放置すればいずれはパス（放電路）となり絶縁破壊へと進展するところであった。トラッキングの経路を図15に示す。また、従来の電気試験結果を表3に示す。

表3 E機の電気試験結果

・製造年／等価運転年数	1971/ 19.7年
・出力	1000 [kW]
・絶縁抵抗 (40°C)	1457 [MΩ]
・成極指数	6.02
・誘電正接	9.66
・ Q_{max}	25,500 [pC]

誘電正接は少し高いものの、 Q_{max} 等は管理値を下回っており、従来診断では付着粉塵量から洗浄が推奨される程度である。これは従来診断法の対地間に規定電圧を印加する試験では検出不可能な異相間放電を運転中測定にて診断可能にした事例である。

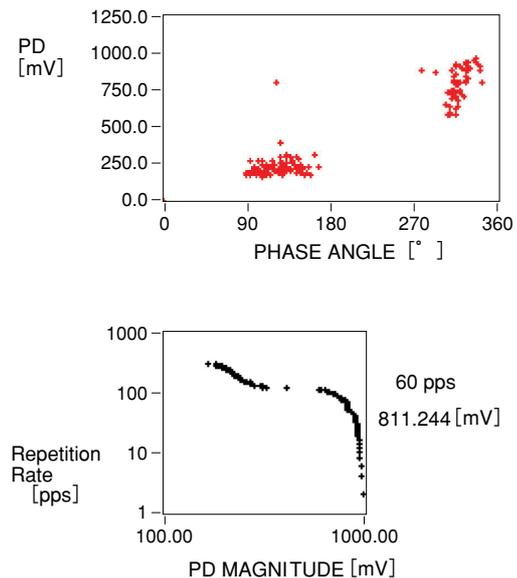


図13 E機の位相-強度特性と累積特性

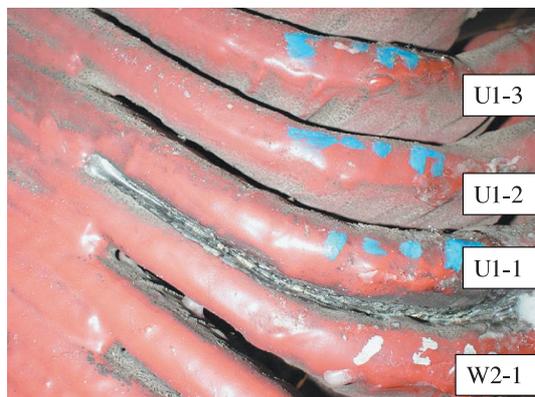


図14 E機のコイルエンド部写真

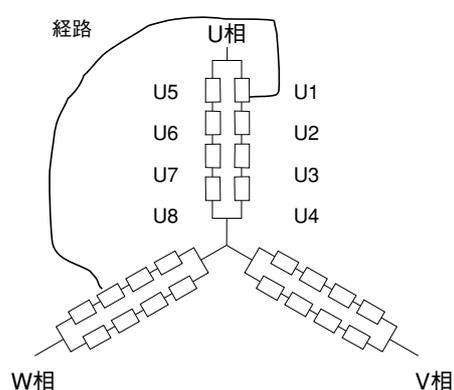


図15 E機のトラッキング経路

4. まとめ

原子力発電所で稼働中の高圧電動機について運転中の部分放電信号を電動機のRTDから取り出す方法にて、長期にわたる測定をして絶縁劣化を評価することを試みた。

- (1) 経年的な劣化傾向を等価運転年数評価から把握することが可能なことを示した。
- (2) 停止中の Q_{max} と相関関係は得られないが、測定頻度を増やした傾向管理をすれば、絶縁劣化を検知することに適している。
- (3) 傾向管理する上でコイル温度等の影響を受けるため、変動を許容した運用が必要となる。
- (4) 放電の位相特性を観察することにより停止時の測定では診断し得なかった異相間放電の検知が可能であることを示した。

運転中の部分放電信号測定は測定の操作性、安全性において従来手法に比べて優位であり、更なるデータ蓄積を行なって発電所での本格運用につなげたい。

文献

- (1) 電気学会, “絶縁寿命限界と推定”, 電気学会技術報告第882号, 2002-4.
- (2) 電気学会, “絶縁材料の劣化と機器・ケーブルの絶縁劣化判定の実態”, 電気学会技術報告第752号, 2001-1.
- (3) 電気学会, “電力設備の運転中絶縁診断技術”, 電気学会技術報告(Ⅱ部)第402号, 1992-1.
- (4) 森田 登, 鈴木 武, 高木 建明, 松元 敦夫, “高圧電動機絶縁劣化傾向管理を支援するオンライン部分放電監視装置の開発”, 電気学会論文誌D, 120巻 第1号, pp148-155, 2000.
- (5) 川田 昌武, 河崎 善一郎, 松浦 慶士, 武蔵谷 敏男, 黒木 悟, 大沢 輝也, 田中 宏, “GHz帯電磁波空間位相差法を用いた火力タービン発電機の運転中における部分放電検出”, 電気学会論文誌B, 118巻 11号, pp1243-1248, 1998.
- (6) 辻 利則, 金子 正光, 成 烈文, 大坪 昌久, 本田親久, 竹之内 修, 山津 謙一, 田中 和洋, “AEセンサを用いた水車発電機運転中部分放電測定”, 電気学会論文誌B, 122巻 4号, 2002.
- (7) 栃尾 篤, 兼田 吉治, 浦川 伸夫, “高圧電動機の絶縁劣化兆候検知手法の開発(2) —オンライン部分放電モニターによる実機試験の結果—”, INSS JOURNAL, Vol.7, pp.231-238, 2000-9.
- (8) Gabriel J.Paoletti, Alexander Golubev, “Partial Discharge Theory and Technologies Related to Medium-Voltage Electrical Equipment”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.37, No.1, pp90-103, 2001.