

# 高压電動機の絶縁劣化兆候検知手法の開発 ( 1 )

## - オンライン部分放電計測手法の比較検討 -

Development of Method for Detecting Signs of Deterioration in Insulator of High-Voltage Motors (1)  
— Comparative Study of Methods for Online Measurement of Partial Discharge —

栃尾 篤 (Atsushi Tochio)\*

**要約** 原子力発電所で数多く用いられている高压電動機の絶縁劣化を早期に検出するため、絶縁物の部分放電をオンラインのまま測定するいくつかの方法について比較試験を行った。供試体として、固定子巻線更新直前のもの、新規に製作されたものおよび実際の原子力発電所で使用中のもの(2台)を選び、3方式8種類の部分放電モニタによって試験した結果、結合コンデンサ法が最も検出感度が高く、測温センサ(RTD)をアンテナとして用いる放射電磁界法がそれに次ぎ、接地線電流法が最も低いことが分かった。ただし、実機制約の点から見ると、接地線電流法が最も容易であり、上記RTDを用いる方法がそれに次ぐ。

**キーワード** 高压電動機、絶縁劣化、部分放電、部分放電モニタ

**Abstract** In order to develop a diagnostic method for the early detection of deterioration in insulators of high-voltage motors which are widely utilized in nuclear power plant, a comparative test of eight methods for partial discharge measurement was conducted using (1) a motor of which stator coils were aged, (2) a new motor and (3) two motors which were practically operated in a PWR plant. From the results, it was found that (1) the capacitive coupler method shows the highest sensitivity for partial discharge detection, (2) followed by the method in which a resistant temperature detector (RTD) in a motor is used as an antenna, and (3) the sensitivity of the earth current method is lower than those of other methods. However, the last is the easiest one for actual applications to partial discharge measurements, and the next is the method in which RTD is used.

**Keywords** high-voltage motor, insulator diagnosis, partial discharge, partial discharge monitor

## 1. はじめに

加圧水型原子炉(PWR)には、1次冷却材ポンプモータをはじめ主要な回転機用として数十台の高压電動機が用いられている。従って、これらの高压電動機が故障すると、PWRの運転に支障を来すのみならず、安全上も好ましくないので、故障の発生を極力低くする必要がある。

高压電動機の故障の主要因は固定子巻線の絶縁劣化なので、その経年変化と残存寿命を正確に求めることが必要である。PWRでは、定期点検時に高压電動機の絶縁抵抗測定が行われているが、運転中に

絶縁の劣化度を非破壊的に診断できる技術の開発が要請されている。

高压電動機の固定子巻線に絶縁劣化が生じた場合に最も多く発生する現象は、マイカ/エポキシ絶縁体が熱的、機械的、電氣的またはそれらの複合要因によって起こる部分放電(PD: Partial Discharge)である。部分放電を検知するためには、振動、超音波、分解ガスなどを利用することも考えられているが、最も一般的なものとして、放電パルス電流を測定する方法が主流である。この部分放電電流の測定法として、(1)結合コンデンサ法、(2)接地線電流法、および(3)放射電磁界法の3種類が提案さ

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

れている。<sup>(1)(2)</sup> こうした部分放電検出器は部分放電モニタとも呼ばれ、既に商品化されているが、実際の高圧電動機において異なったメーカーの各種部分放電モニタの性能を比較検討した試験はほとんど試みられていない。<sup>(3)(4)(5)</sup>

本研究は、PWRの安全性と信頼性を向上するための研究の一環として、上記3方式8種類の部分放電モニタにより高圧電動機の部分放電を測定し、得られた結果を比較検討した。ここで、対象とする高圧電動機として、(1)相当期間運転し、固定子巻線更新直前のもの(更新)、(2)新規に製作されたもの(新製)、および(3)実際のPWRで使用(実機)の3種類のものを選定して、供試品とした。ただし、(実機)としては、さらに主給水ポンプ(FWP)および主給水プースタポンプ(FWBP)用の高圧電動機の2台(製造後29年)である。

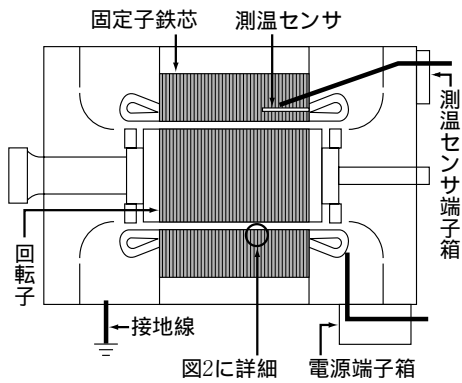


図1：高圧電動機の断面の概要

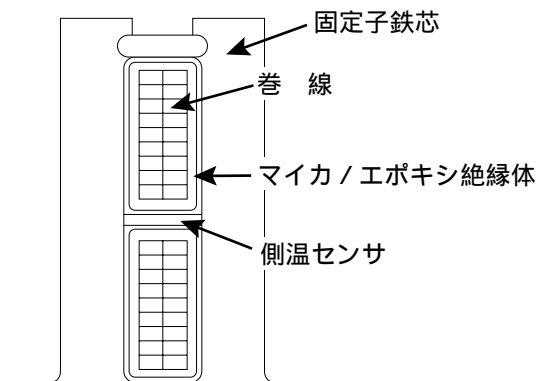


図2：固定子鉄芯，巻線，マイカ/エポキシ絶縁体および測温センサの配置

## 2. 試験の方法

### 2.1 試験の方法とその原理

高圧電動機の断面の概要を図1に示す。また、固定子鉄心，巻線，マイカ/エポキシ絶縁体および側温センサの配置を図2に示す。

結合コンデンサ法は、図3のようにコンデンサを介して、高圧電動機の電源部に伝搬する部分放電信号を取り出すものである。A社およびC社の結合コンデンサ法による部分放電モニタを使用し、結果を比較した。

次に接地線電流法では、図4のように接地線に流れる部分放電信号を非接触センサで検出する。これはB社およびC社のものを使用して、結果を比較した。

最後の放射電磁界法として、さらにいくつかの方法が提案されている。B社とC社は高圧電動機の固定子と回転子間の空隙部にロッドアンテナを挿入する方法を提案し、市販している部分放電モニタを使用して計測を試みた。ここでは後述の新製高圧電動機の場合についてのみ実施した。一方、高圧電動機内の温度測定のために設けられた測温センサ

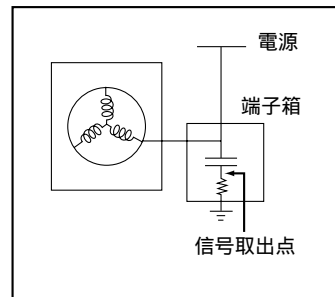


図3：結合コンデンサ法

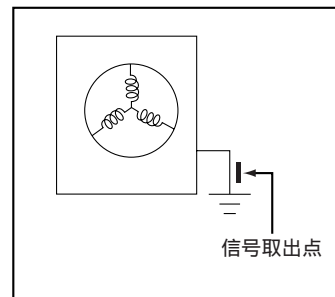


図4：接地線電流法

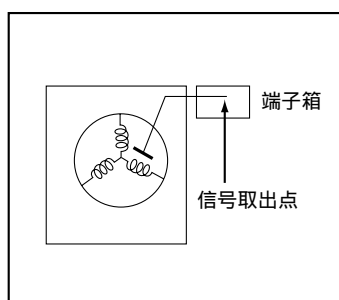


図5：RTD法・直接およびRFCT

(RTD：Resistance Temperature Detector) を高周波アンテナとして利用する方法も採用することとした。その概念図を図5に示す。

さらに、この測温センサの信号を直接取り出して分析するRTD直接検出法およびその信号を高周波変流器 (RFCT：Radio Frequency Current Transformer) を介して取り出すRTD, RFCT検出法がある。本研究ではこれら2つの方法を採用して測定し、得られた結果を比較した。

## 2.2 採用した部分放電モニタ

今回の試験に採用した部分放電モニタは表1に示す3方式8種類のものとした。ただ、全ての供試体の高圧電動機について、全ての部分放電モニタによる測定はできなかったため、実施したものを表の中に示す。

このうち、A社結合コンデンサ法は高圧電動機の改造を伴うので、更新のみ実施した。同様に実機の

2台はC社結合コンデンサ法も実施できなかった。また、実機の内FWBPは測温センサを保有していなかったため、これを用いた測定を行っていない。また、同様に、更新、実機FWPおよび実機FWBPともアンテナを挿入する穴が固定子と回転子の間にないため、放射電磁界法は不可能であった。

## 2.3 比較したデータ

高圧電動機の絶縁物における部分放電は、印加されている商用周波数 (ここでは60Hz) の上にパルス状に発現する。従って、発生するそれらのパルスの発生時刻と波高は、商用周波数の正弦波の位相に相関を有している。この位相とパルス波高に対する発生パルス数を縦軸に取った3次元分布の例を図6に示す。

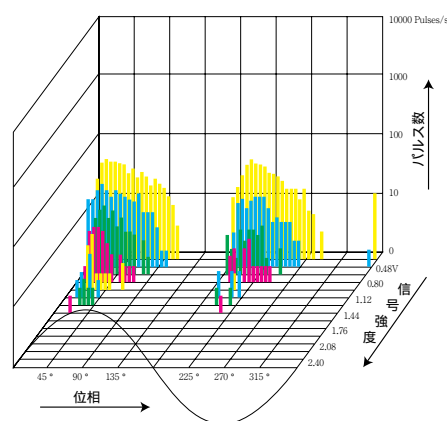


図6：A社結合コンデンサ法による部分放電特性 (更新高圧電動機無負荷運転中)

表1 試験に用いた部分放電モニタ (印は実施したもの)

番号	方式	メーカー	対象とした高圧電動機			
			更新	新製	実機FWP	実機FWBP
1	結合コンデンサ法	A				
2	接地線電流法	B				
3	放射電磁界法 (RTD直接)	C				
4	放射電磁界法 (RTD, RFCT)	C				
5	放射電磁界法	B				
6	結合コンデンサ法	C				
7	接地線電流法	C				
8	放射電磁界法	C				

この図から見て、部分放電は商用周波数で印加される正弦波の電圧波形に沿って発生しているが電圧が最高のところではなく、むしろ電圧の極性が変化するところから多発していることが分かる。いずれにしても、商用周波数に沿って部分放電が発生しているため、測定データの定量化は、1サイクル内に準安定的に部分放電が発生している信号強度を60PPS (Pulses Per Second) として求めて、この値を比較することにした。これはオフライン部分放電測定での評価に用いられている最大放電電荷量 $Q_{max}$ に相当する。しかし、部分放電モニタのメーカーによって回路が異なるため、以下に示す60PPSの電圧値の絶対値にはあまり意味がない。同じメーカーの異なった方法の部分放電モニタの60PPS値間の比較は感度の比較として重要である。

なお、一部のものについては、部分放電パルスをデジタルオシロスコープで観測し、周波数特性についても分析を行った。これは単発パルス20個を平均して高速フーリエ変換したものである。

### 3. 試験の結果と考察

#### 3.1 更新高圧電動機の結果と考察

更新高圧電動機の試験結果を表2にまとめて示す。また、部分放電パルスの周波数特性を図12に示す。

この結果から以下のことが分かる。

- (1) 更新高圧電動機では、全ての部分放電モニタで部分放電検出が可能である。
- (2) C社のものについて、4つの方法の結果を比較すると、感度の高い順に、結合コンデンサ法、放射電磁界法 (RTD直接)、同 (RTD, RFCT)、接地線電流法となる。

#### 3.2 新製高圧電動機の結果と考察

新製高圧電動機の試験結果を表3にまとめて示す。また、この場合の部分放電パルスの周波数特性を図13に示す。

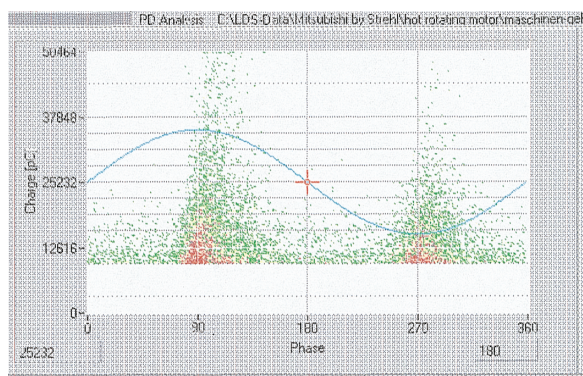
表2 更新高圧電動機の試験結果 (番号は表1と同じ)

番号	方式	メーカー	部分放電検出	60PPS [mV]	測定データ
1	結合コンデンサ法	A	可	800	図6
2	接地線電流法	B	可	算出できなかった	図7
3	放射電磁界法 (RTD直接)	C	可	30	図8
4	放射電磁界法 (RTD, RFCT)	C	可	3.9	図9
6	結合コンデンサ法	C	可	159	図10
7	接地線電流法	C	可	1.2	図11

表3 新製高圧電動機の試験結果 (番号は表1と同じ)

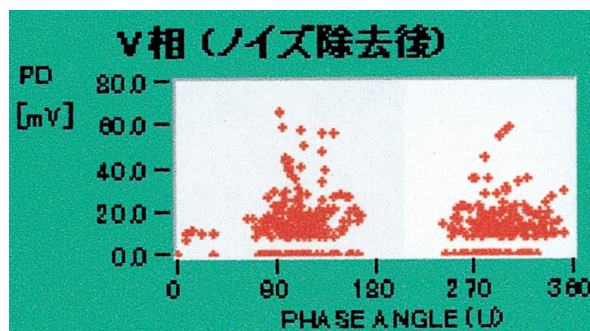
番号	方式	メーカー	部分放電検出	60PPS [mV]
2	接地線電流法	B	否	-
3	放射電磁界法 (RTD直接)	C	可	4.3
4	放射電磁界法 (RTD, RFCT)	C	可	0.36
5	放射電磁界法	B	否	-
6	結合コンデンサ法	C	可	7.1
7	接地線電流法	C	否	(0.1)
8	放射電磁界法	C	否	-

このように部分放電レベルの低い新製高圧電動機でも、C社の3つの方法により検出が可能であり、感度の高い順として、結合コンデンサ法、放射電磁界法（RTD直接）、同（RTD、RFCT）となった。この順序は更新高圧電動機と同じである。



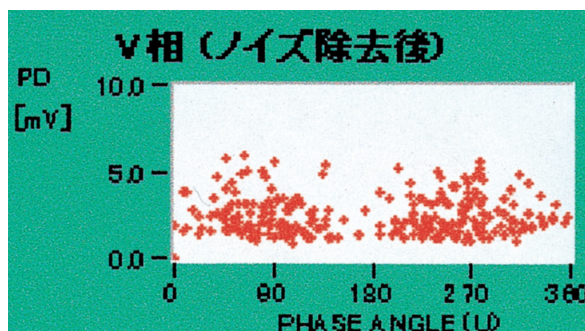
X軸：位相，Y軸：パルス数および信号強度

図7：B社接地線電流法による部分放電特性  
（更新高圧電動機無負荷運転中）



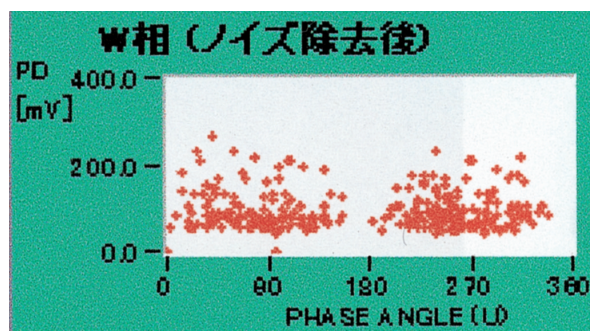
X軸：位相，Y軸：パルス数および信号強度

図8：C社RTD法直接検出による部分放電特性  
（更新高圧電動機無負荷運転中）



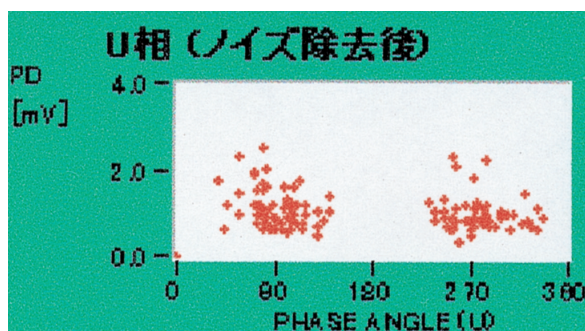
X軸：位相，Y軸：パルス数および信号強度

図9：C社RTD法RFCT検出による部分放電特性  
（更新高圧電動機無負荷運転中）



X軸：位相，Y軸：パルス数および信号強度

図10：C社結合コンデンサ法による部分放電特性  
（更新高圧電動機無負荷運転中）



X軸：位相，Y軸：パルス数および信号強度

図11：C社接地電流法による部分放電特性  
（更新高圧電動機無負荷運転中）

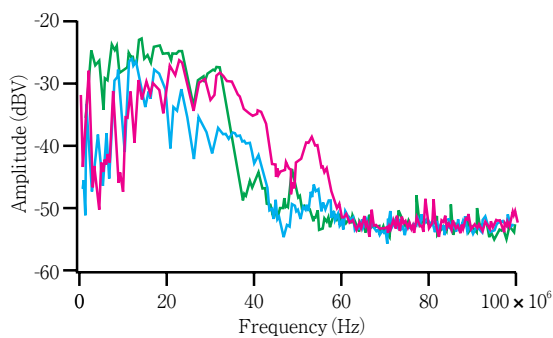


図12：C社結合コンデンサ法（100pF）による周波数特性  
更新高圧電動機運転中（無負荷）  
（検出場所：U相 --- V相 --- W相 ---）

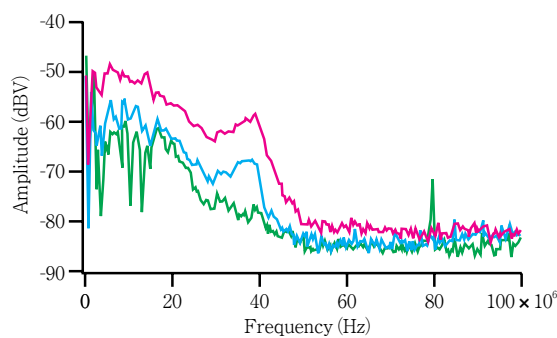


図13：C社結合コンデンサ法（100pF）による周波数特性  
新製高圧電動機運転中（無負荷）  
（検出場所：U相 --- V相 --- W相 ---）

### 3.3 実機の高圧電動機の結果と考察

実機で用いられている主給水ポンプ（FWP）と主給水ブースタポンプ（FWBP）のそれぞれについて部分放電モニタによって測定した結果をそれぞれ表4，表5に示す。

これら2台の高圧電動機を比べると，FWPよりもFWBPの方が部分放電信号が大きく，この場合は接地線電流法は2メーカーのものとも検出可能であった。しかしながら，部分放電信号の小さなFWPの方は，放射電磁界法（RTD直接）のみ部分放電検出が可能であることが分かった。もちろん結合コンデ

ンサ法が可能であれば，この場合でも検出可能であったであろう。

### 3.4 比較検討

絶縁物の劣化が進んでいる更新高圧電動機と劣化のない新製高圧電動機を比較すると，前者の60PPS値が後者の10～20倍にも達している。これは，両者の部分放電パルスの周波数特性でも顕著であり，前者は後者に比べて高周波信号において10倍（20dB）以上の強度差が認められる。これは60PPSの強度差の値とも合致する。

各種の方法の中では，結合コンデンサ法が，最も

表4 FWP高圧電動機の試験結果（番号は表1と同じ）

番号	方式	メーカー	部分放電検出	60PPS〔mV〕	測定データ
2	接地線電流法	B	否	-	-
3	放射電磁界法（RTD直接）	C	可	0.4	図14
4	放射電磁界法（RTD，RFCT）	C	否	0	-
7	接地線電流法	C	否	(0.1)	-

表5 FWBP高圧電動機の試験結果（番号は表1と同じ）

番号	方式	メーカー	部分放電検出	60PPS〔mV〕	測定データ
2	接地線電流法	B	可	算出できなかった	-
7	接地線電流法	C	可	4.9	図15

高い検出感度を有していることが分かった。ただし、この方法を実際に用いるためには、電源端子箱を改造し、結合コンデンサをつなぎ込む必要がある。

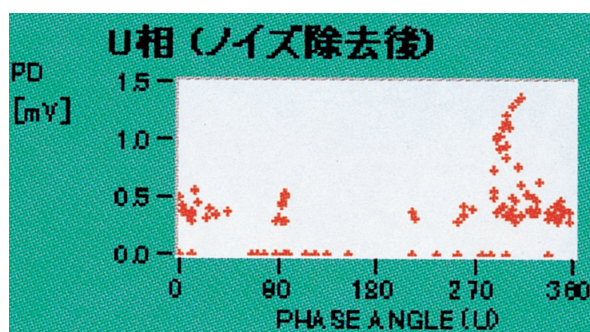
接地線電流法は、検出感度がやや低く、部分放電信号が小さい場合にはその検出は困難であるが、実際に問題となる程度のレベルでは検出が可能となる。実際の高圧電動機の約半数は測温センサを内蔵していないし、また、結合コンデンサのつなぎ込みをしない場合には、この方法しか使えない。

放射電磁界法のうち、測温センサ (RTD) が使える場合は、改造することなくこれを部分放電モニタとして使用することは有利である。検出感度からみると結合コンデンサ法の方が大きいですが、RTDは外部の電磁波雑音の影響を受けにくく、機内で発生する部分放電に対する弁別性は良好であると考えられ

る。ただ、RTDを本来の目的すなわち温度測定に使用している時には、検出感度はやや低下するが、高周波変流器RFCTを介した測定をせざるを得ない。一方、固定子と回転子間の隙間の穴にロッドアンテナを挿入する方法も試みたが、部分放電検出感度はあまり高くない。また、こうしたアンテナを実際に挿入すると、高圧電動機に損傷を与える恐れがある。

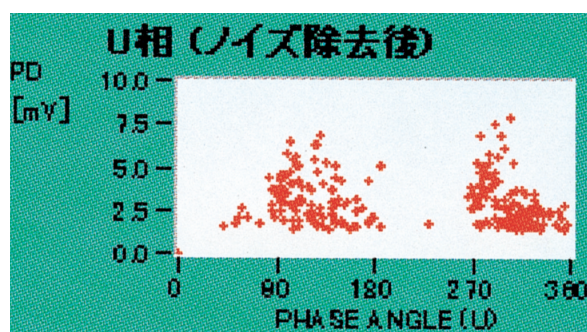
#### 4. おわりに

PWRで用いられている高圧電動機の絶縁劣化を運転中に診断する方法の開発を目指し、その中で発生する部分放電を測定する方法について試験し、結果を比較検討した。メーカ3社の部分放電モニタを用い、供試体として3種類(4台)の高圧電動機に



X軸：位相，Y軸：パルス数および信号強度

図14：C社RTD法直接検出による部分放電特性 (FWP高圧電動機運転中)



X軸：位相，Y軸：パルス数および信号強度

図15：C社接地線電流法による部分放電特性 (FWBP高圧電動機運転中)

表6 部分放電モニタの評価 (番号は表1と同じ)

番号	方式	メーカ	検出感度 (最高10点)	実機制約 (最高5点)	総合点 (順位)
1	結合コンデンサ法	A	10	2	12 (2)
2	接地線電流法	B	2	5	7 (5)
3	放射電磁界法 (RTD直接)	C	8	5	13 (1)
4	放射電磁界法 (RTD, RFCT)	C	6	5	11 (4)
5	放射電磁界法	B	0	3	3 (7)
6	結合コンデンサ法	C	10	2	12 (2)
7	接地線電流法	C	2	5	7 (5)
8	放射電磁界法	C	0	3	3 (7)

ついて試験を行い，部分放電検出感度の順位を求めることができた．一方，実際の高圧電動機と実機制約の難易度についても順位を付すことが可能であり，その上で総合評価を試みた．その結果を表6に示す．この総合評価は必ずしも絶対的なものではなく，実際上はPWRにおける当該高圧電動機の重要度や多重性なども考察に入れた判断が必要であろう．

## 5. 謝辞

本研究の遂行に当たり，助言と発電所での試験に多大な御協力を頂きました関西電力株式会社原子力・火力本部の関係者の方々に深く謝意を表します．また，本研究の試験に御協力頂きました三菱電機株式会社の関係者の方々に感謝致します．

## 文献

- (1) 電気学会技術報告 部第402号「電力設備の運転中絶縁診断技術」運転中における電力設備の絶縁劣化診断調査専門委員会 電気学会編 1992
- (2) 電気学会技術報告第502号「電力設備の絶縁余寿命推定法」電力設備の絶縁余寿命推定法調査専門委員会 電気学会編1994
- (3) H. Zhu, V. Green, M. Sasic, Capacitive Couplers with Increased Sensitivity for On-line PD Measurement in Stator Windings, Conf. Record 1998 IEEE International Symp. on Electrical Insulation, pp.261-265(1998)
- (4) K. Itoh, Y. Kaneda, S. Kitamura, K. Kimura, A. Nishimura, T. Tanaka, H. Tokura, I. Okada, New Noise Rejection Techniques on Pulse-by-pulse Basis for On-line Partial Discharge Measurement of Turbine Generators, IEEE Transactions on Energy Conversions, Vol. 11, No. 3, pp. 585-592, 1996.
- (5) 兼田吉治，伊藤恵一，北村重雄：「タービン発電機部分放電モニタの開発」，平成10年電気学会全国大会256