

## LaserNet200シリーズ

# ダイレクト画像認識型使用済みオイル用 油中パーティクルカウンターを用いた作動油測定システムのご紹介

輸入代理店：**株エスティーエム**

## 紹介

機器から採取した作動油の中に異常な摩耗粒子が含まれていないかを分析する手法として、以前よりフェログラフィー分析法や分光法、電磁気による分析や画像分析等の個々の分析が行われています。分析フェログラフィーではオイル中に生成された鉄粉粒子や摩擦摩耗粒子を分析しますが、ICP原子発光分光法では比較的大きめの鉄粉粒子等を把握するには限界があります。また長年の経験やスキルが必要とされる分析フェログラフィーでは、分析を出来るエキスパートが限られる事と分析にとても時間が掛かる事がネガティブポイントとなります。ご紹介する自動画像認識型パーティクルカウンター統合システムではパーティクルカウント機能の他に、2種類の試験機に搭載された電磁コイルセンサーによりオイル中に含まれる $25\text{ }\mu\text{m}$ 以上の大きさの比較的大きめの鉄粉摩耗粒子の数をカウントすると共に、鉄粉粒子の総量をカウントします。つまり大きめの鉄粉粒子(個数/ml)は、トータルでの鉄粉粒子総量(ppm)を数え上げる際にそれぞれ独立してカウントを行っている為、大きな粒子と小さな粒子の摩耗粉の混入割合やその濃度を把握することで機器の中で発生している異常摩耗の様子がより明らかになります。そのような結果は、ご紹介するデュアル式磁気センサー及び画像認識型パーティクルカウンターを備えた統合システムによりより早く・簡単に・正確に診断が可能となります。

## 油圧作動システム

油圧作動システムは、輸送用機器、建設機器、鉱山用重機、農業用機器等で幅広く使われています。油圧作動システムが使われている理由と致しまして、油圧により緻密なコントロールにて、とても力強い仕事をこなすことが可能となるからです。パーティクル分析の最たる例として、油圧作動油のオイル状態管理が必要とされる理由は、摩耗粉の増大がその効率及び油圧システムの信頼性を損なうことになるからです。もし、適切な状態管理がなされなければ、機器へ重大な故障を引き起こし兼ねません。パーティクルのコンタミは、油圧作動システムにとって最も深刻な故障を引き起こすと考えられています。油圧作動システム内で異常摩耗が発生するとき、比較的大きなパーティクルが生成されます。それらのパーティクルはポンプのポートプレートへ研磨剤的に摩耗を引き起こしたり、シリンダー内部へ引っかき傷を生んだり、また油圧バルブへダメージを発生させます。参照1は、風力発電におけるピッチコントロールシステムのスプールバルブにダメージを引き起こした事例です。油圧作動油中に発生したハイレベルのコンタミがスプール及びメータリングバルブの溝を変形させるまでとなり、風車にオーバースピードとなる制御不具合の事態を引き起こし兼ねません。

Figure 1: Damaged surfaces of hydraulic spool valves from the pitch control system of a wind turbine exhibiting  
a) fatigue cracking,  
b) displaced metal in metering groove,  
c) surface abrasion and wear debris in metering groove



## バックグラウンド ▶パーティクルカウント分析

油圧作動システムにとって特に粒子のコンタミは、非常に深刻となります。何故なら油自体が伝送媒体となるからです。力の伝達効率を最大限とするために油圧が機器の力の源となり、効率的に油圧による力を伝達する為に、作動油は油圧ポンプ、コントロールバルブ、モーター、シリンダー等を高圧力で流れ、これは、ポンプのサイドプレートやローターインテフェイス又はコントロールバルブのスプールバルブの間の様に相対運動が行われる隙間を極力狭くすることで成し遂げられます。典型的な油圧作動システムにおけるポンプやバルブに使用されている構成部品の隙間を表1に表しました。隙間の長さはマイクロメートル

構成部品	隙間, μm
Vane pump	
Side plate/rotor	5 - 13
Vane tip/cam	0.5 - 1
Gear pump	
Side Plate/rotor	0.5 - 5
Housing/gear tip	0.5 - 5
Piston pump	
Piston/bore	5 - 40
Valve plate/cylinder	0.5 - 5
Servo valve	
Spool to sleeve	1 - 4
Flapper wall	18 - 63
Directional control valve	
Control piston	2.5 - 23
Cone valve	13 - 40

Table 1: Typical gap heights in hydraulic pumps and valves (ISO 12669)

(μm)で表されます。 ちなみに人間が肉眼で可視出来る長さはおおよそ40 μmと言われており、当然、作動油システム内の構成部品のギャップを肉眼で確認出来るものではありません。 また言い換えますと、油圧作動機内のクリティカルなギャップにて異常摩耗の発生を回避する為には、油圧作動油中のパーティクルのコンタミ量を極力少なくする様務める必要があります。

自動パーティクルカウンターは、作動油中のコンタミレベルを把握する為に広く流通され、その中で油圧作動油の洗浄度を示す為の指標として洗浄度の規格が用いられています。 その指標は、特定の粒子サイズ毎にどのくらいの数量のコンタミ粒子が存在するかを示します。 その中でよく使われている規格は、ISO 4406汚染度コードが作動油中のコンタミレベルを把握する為の指標として用いられています。 ISO 4406汚染度コードは 1ml 中に含まれるコンタミ粒子径(4 μm, 6 μm, 14 μm)の量をコード番号で示し 汚染度レベルを数値化します。 それは例えば油圧システムにとって影響が大きいとされるギャップと相關性があると考えられているからです。 例)油中に4 μm以上の大きさの粒子が3000粒、6 μm以上の大きさの粒子が1000粒、14 μm以上の大きさの粒子が200粒測定されると、ISOコードは19/17/5と表されます。 油圧作動機にて要求される洗浄度(RCL)は、作動条件下での油圧や構成機器内のセンシティビティーや、想定されるシステムの使用期間、また要求されるアプリケーションに依存します。 低圧での運転条件で手動もしくは電磁操作切換弁でコントロールされるバルブ等ではコンタミの許容も厳格なレベルまで要求されない場合がありますが、高圧での運転条件で使用されるサーボー機構のコントロールバルブ等が組み込まれたシステムにおいては、より厳格なオイル洗浄度の管理が必要とされます。 油圧作動油のRCL指標として、ISO 12669油圧作動機における洗浄度要求(RCL)の決め方を定め、以下の要素から考察されます。

- 使用圧力と運転状況
- コンポーネントへのコンタミ影響
- 機器の想定使用期間
- メンテナンスコスト
- 機器不動期間に与えるロス
- その他想定されるリスク

ISO 12669の基準に基づき試算されたRCLにより、例えばRCLが ISO 15/13/9にて定義された非常にタフな仕事が要求される現場で使用される大型油圧作動掘削機において、この数値からコンポーネントへのコンタミはシビアで、機器が不動となってしまう事態を厳格に避けなければならない状況であることが伺えます。 ISO 15/13/9での厳格な汚染度管理が要求されるとなると、このRCLから考えられることは、28 ppmのISOミディアムテストダストが含まれた油はミニマムISOコードが19/18/16となり、それは通常実施されているオイル分析においては、下限の感知レベルを超える精度となります。

Number of particles per milliliter		Scale # Code
More than	Up to and including	
80,000	160,000	24
40,000	80,000	23
20,000	40,000	22
10,000	20,000	21
5,000	10,000	20
2,500	5,000	19
1,300	2,500	18
640	1,300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2.5	5	9

Table 2: Allocation  
of ISO 4406  
scale numbers  
(particles/ml) [3]

一方で、15/13/9のコードは0.2ppm以下のコンタミに相当する汚染度であり、ISO 15/13/9は4  $\mu\text{m}$ 以下の大きさのパーティクルが160個以上、6  $\mu\text{m}$ 以下の大きさのパーティクルが80個以上、そして4  $\mu\text{m}$ 以下のパーティクルが2, 5個以上存在すが、左の表から分かります。ISO4406の2017年版によると、ISOコード分類される最低限のパーティクル数は、20個とされており、実際のデータにおいてパーティクルのサイズにおいてパーティクル数が20個以下の場合には、(2)のマークを用いる必要があります。

### ▶原子分光法

原子分光法はもっとも良く使用済みオイルの分析には用いられています。

原子分光法の利点としては摩耗金属がオイルサンプルに含有されている潤滑剤の分量がppm単位にて把握出来る点です。

回転ディスク電極法発光分光法(RDE-AES)においては、電極棒とオイルサンプルの付いた回転式電極ディスクとの間に適切なギャップを保ちつつ高電圧を放電し、高温の電気アーキを生み出し、プラズマを形成サンプルを加熱します。

高周波誘導結合プラズマ(ICP-AES)においてもオイルサンプルは高温で霧化された状態でプラズマ内へ導入されます。それぞれの方法において、分析試料へプラズマの高温エネルギーを与えることにより、含有されているそれぞれの元素が励起されスペクトラムを放ちます。元素にはそれぞれ固有のスペクトラムを持っている為、その波長の違いから元素を特定します。また、波長の強さに比例してサンプルに含まれる元素の濃度も特定が出来ます。

### ▶分析フェログラフィー

フェログラフィー分析は、使用済みオイル中に含まれる摩耗粉を分析する為のもう一つの方法です。フェログラフィーは、少量のオイルサンプルを溶剤にて流し、シスル漏斗よりサンプルは少し傾けられたスライドへ水平に流れ顕微鏡により測定されます。磁気により配列された摩耗粒子で、大きめのフェロス粒子は、磁気の影響を受けやすいため、フローラインの入り口近くに堆積しやすく、一方で、小さめのフェロス粒子は、磁気の影響を受けにくいため、出口の方まで移動し堆積しやすくなります。サンプルが磁気の勾配を通過した後、スライドは溶剤で洗浄され、顕微鏡による観察を行い、粒子のサイズ・色・形や磁化率を摩耗粒子分の定期的な評価や、摩耗粒子の発生する原因を掴む為に確認をします。このように分析フェログラフィーは、自動化が難しく技術者の熟練度が要求され、とても長い分析時間を要する手法ですが、大型摩耗粒子を特定出来、また潤滑油システム内での根本的な摩耗粒子発生に対するメカニズムを明らかにする事が出来ます。

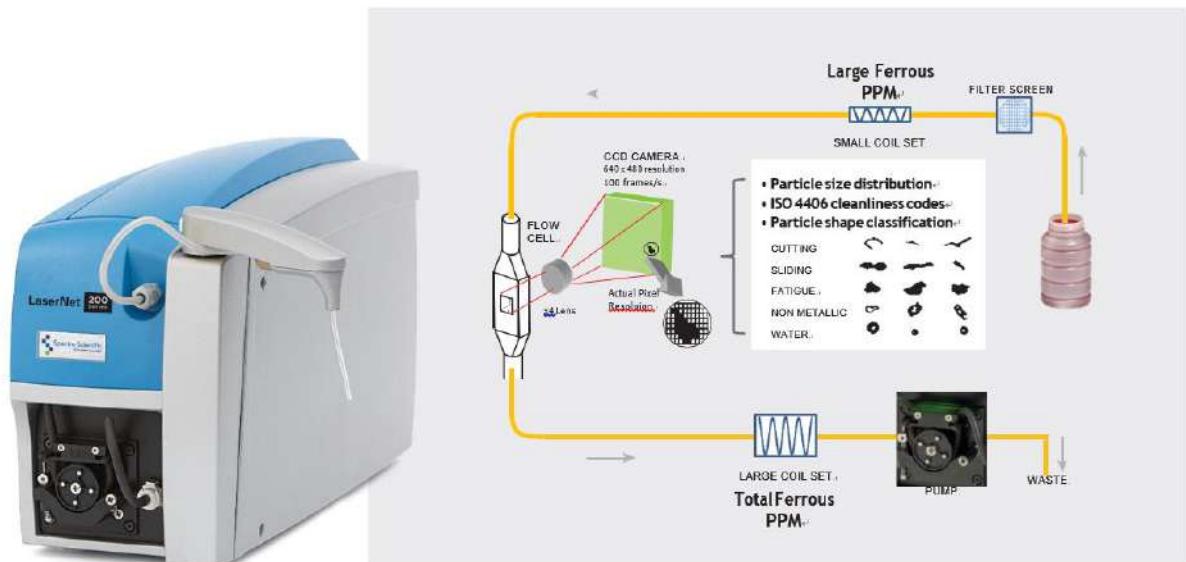
## SpectroScientific社製測定器について

### ▶ LaseeNet200シリーズの特徴

Spectro Scientific社製LaserNet 230型ダイレクト画像認識型パーティクルカウンターを用いたパーティクルカウント分析及び摩耗粒子分類分析では、ダイレクトイメージングシステムをハイスピードCCDカメラチップと赤外レーザー光・フローセルを用いて構成し、摩耗粒子を分析します。具体的には、摩耗粒子がフローセルを通過する際、赤外レーザー光をフローセルへ照射させ、粒子の影をCCDチップへ投げます。 $4\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ のサイズの粒子はピクセル画素にてCCDへ撮影され、ISOコンタミネーションコードを用いて、 $\geq 4\mu\text{m}$ ,  $\geq 6\mu\text{m}$ , そして $\geq 14\mu\text{m}$ サイズ等級へ分類されます。

また、このシステムでは、 $20\mu\text{m}$ 以上の大型摩耗粒子に対して、捉えた画像をバイオロジカルネットワークに基づいたアルゴリズムを用いて摩耗粒子の形状を、カッティング粒子・疲労摩耗粒子・スライディング粒子・水滴・気泡・纖維類・非金属のコンタミ形状へ人工知能を用いて自動分類を行います。試験法の詳細はASTMD7596-“ダイレクト画像によるパーティクルカウンター及びパーティクル形状識別による統合分析法”をご参照願います。

そして、このLaserNet 230パーティクルカウンターには、2種類の磁気コイルを搭載し、フェロー粒子の数をカウントします。これらのコイルは、磁性体摩耗粒子が磁気測定路を通じる際、コイルのインダクタンスの変化を読み取る測定を行います。2種類の内、1種類目は、小型コイルが $25\mu\text{m}$ 以上のフェロー粒子の数を表し、もう1種類は、大型コイルがトータルのフェロー粒子総量、濃度をppmにて表します。そこで重要なのは、“2種類の電磁コイルによって測定された結果は相関するという事では無い”という事です。何故ならば、2種類の数値は、フェロス摩耗粒子測定において、それぞれ異なる局面を持っているからです。それは、大型磁気コイルが、正常（ノーマル）摩耗の鉄摩耗粒子の濃度を測定する一方で、小型磁気コイルは、異常（アブノーマル）摩耗の鉄摩耗粒子の数を測定しています。ASTM D7684によると、ノーマル摩耗粒子は、なめらかな表面の金属片で、およそ $0.5$  to  $15\mu\text{m}$ の大きさとされています。また、その主要寸法と薄さの比は、比の大きなもので $10:1$ 、小さなものは $3:1$ とされています。フェロスパーティクルの中で大きさが $15\mu\text{m}$ 以上のものは、主に表層面に大きな摩擦がかかり発生し、シビア摩耗を発生させる兆候であることが伺えます。ASTMD7684によると、シビア摩耗は $15\mu\text{m}$ 以上の大きさで、その主要寸法と薄さの比は $5:1$ から $30:1$ となり、現実的な視線からいうと機器の中で滑り、回転し、または研磨されたりして発生したトライボ要素から生成されたアブノーマル摩耗粒子に該当しない小さな摩耗粉は、このコイルでの測定から除外されています。このコイルでの測定器では、円相当径が $25\mu\text{m}$ 以下のアブノーマル粒子はカットオフされ、 $25\mu\text{m}$ 以上の大きさのフェロス粒子は小型磁気コイルにてカウントされ、そして画像イメージングシステムによって形状分類されます。



### ▶ 校正用標準油について

LaserNet230光学撮像型イメージングシステムは、NISTトレセラビリティー付き校正油 SRM2806を用いて工場出荷時に校正をされています。それは、MIL-PRF-5606油田塵曲をベースとしたISO12103-1,A3 ミディアムテストダストが含まれた懸濁液となり、クリーンボトルへMIL-PRF-5606油田塵油にミディアムダストが重量分離されたものとなり付加的希釈も重量により追加され、サブリケーションされています。

同様に、磁性コイル測定器は専用の鉄粒子混合液を使って工場出荷時校正を行っています。

その磁性コイル測定器の校正では、カルボニ鉄を用いた懸濁液を使用します。カルボニ鉄は、精製された鉄ペントカルボニルの科学的分解から譲り受けた高純度の鉄(6μm, 12μm, 24μm)の大きさの粒子が用いられています。MIL-PRF-5606校正液が、クリーンボトルへそのカルボニ鉄と共に重量分配され、パーティクル用校正液と同様に付加的な希釈も重量により追加され、均質化されています。また、評価につきましては、下記に示します通り、光学撮像型イメージングシステムおよび磁性コイル測定システムはISOミディアムダストとカルボニ鉄の濃度にリニアに相関をしていることが分かります。テスト1ml中の4μm粒子のカウントとISOミディアムテストダスト(mg/l)との回帰分析となります。ISOミディアムダスト中の4ミクロンのカウントは理論上ISOコード分類での一つの指標となります。一方で、磁気コイルによる校正液でのトータルフェロス鉄粉粒子の濃度測定数値(ppm)は、校正液に含まれているカルボニ鉄(mg/L)のおおよそ2倍の濃度という結果となりました。これは、カルボニ鉄はフェロス鉄粒子に比べより高い磁気感受性を持っている為、磁気コイルセンサーを校正する為にカルボニ鉄が含まれた校正が使われているという理由です。逆説的に言うと、工業製品に使われている磁性体金属に対してより高い磁気反応を示すことが伺えます。

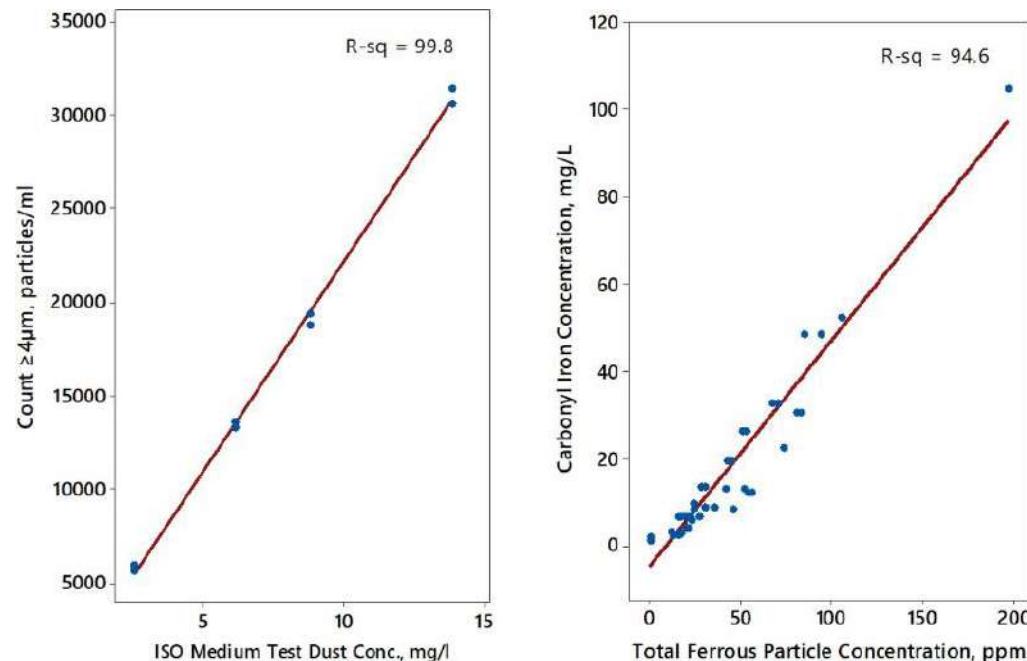


Figure 2: Verification of linear response in particle counter and magnetometer systems

### ▶ ダイレクト画像認識

光学イメージングシステムによりフローセルを通過した粒子の数をカウントし、円相当系 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以上の大さで投影された大型粒子の影は、自動的に形状を画像記録し、形状分類を行います。ある使用油より採取された粒子（パーティクル）のLNFにて記録されたシルエットの例をFigure5に示しました。

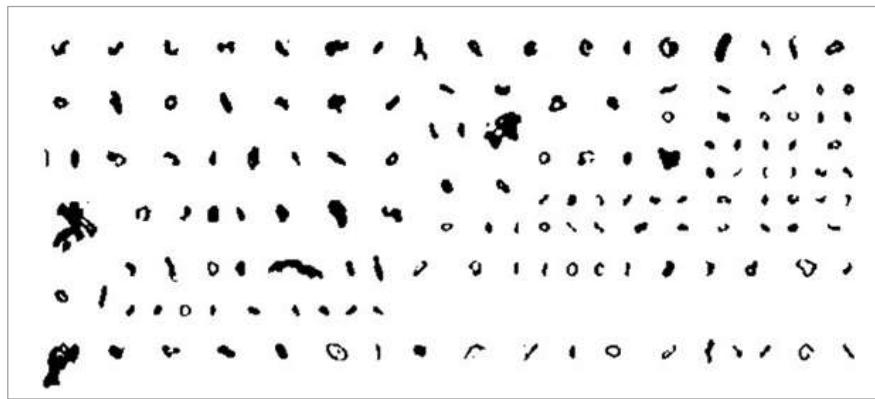


Figure 5: Silhouettes of particles from field samples produced by laser imaging system

金属の摩耗粒子の大半は、スライディング摩耗粒子であり、その他、カッティング摩耗粒子・疲労摩耗粒子等が挙げられます。スライディング摩耗粒子は、互いの金属接触面において、相対運動にずれが生じた際に発生します。大きさは $15\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ 以上のものとなり、幅広な形状で、表面に筋があります。一般的な長さと厚みの比率は10:1で、平均的な異常摩耗大きさは、約 $40\text{ }\mu\text{m}$ となります。

### ▶ トータルフェロス濃度分析

トータルフェロス（鉄粉）濃度分析をLaserNet230, Ferrocheck 2000, and Optima 5300 ICPにてそれぞれ測定を行い、6aに示します様に、フェロス濃度はICPの結果より、LNF 230やFerrocheckマグネットメーター（磁気コイル）システムの方が高濃度を示しました。6bに示します濃度の平均値は、LNF230, Ferrocheck, と ICP とで、それぞれ25, 18.5, 2.6 ppmとなり、95%の信頼区間における磁気コイル型同士でのフェロス測定結果には、大きな差は無いと捉えることができます。

注目すべきポイントとしまして、いくつかのパーティクルの画像には、映り込みが不透明で、形状が欠けている箇所が見受けられます。この様に、光が透過する粒子は、自動分類アルゴリズムにて、非金属類と分類されます。非金属のパーティクルは、非晶質または結晶性のもので、物質の例で挙げますと、ガラス・砂・プラスチックや有機ゲル等となります。しかし、それらは厳密に監視する必要は無く、統計的に使用油の中の大型粒子の25%は非金属で、一方で75%は金属摩耗粒子とされ、

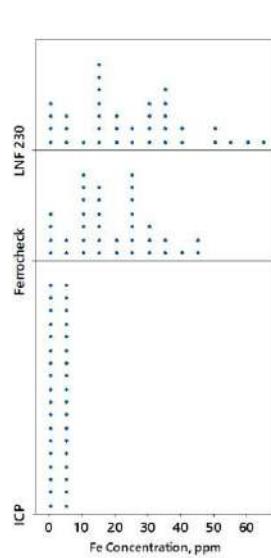
Figure 6:  
a) Comparison of the iron concentrations detected by ICP and magnetometer methods b) 95% confidence intervals of the mean iron concentrations, c) correlation between

LaserNet 230がFerrocheck 2000より少し高めではありますか、6cに示します様にその相関性は91%となりました。90%以上での相関関係を持つ2種類の機器は、互いに高い相関性があることが分かります。

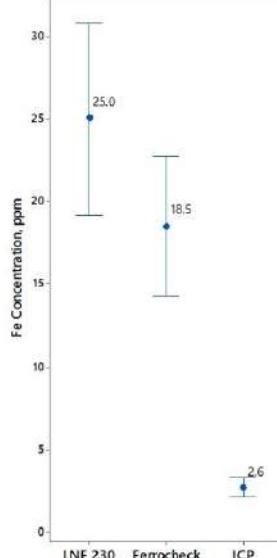
ICPの結果は、磁気コイル測定システムに比べ、5倍程低い濃度結果となりました。

その原因として、ICP发光分光分析では、プラズマ発光エミッションソースへ大型フェロス粒子が上手く運ばれず、測定に不向きな事が挙げられます。

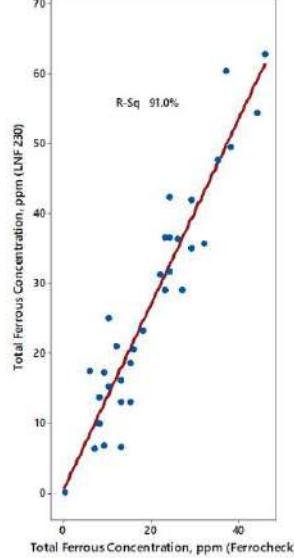
このことから、機器保全の為のトレンド状態監視を目的とした、フェロー測定において、危機に最も深刻な影響を与える、大型摩耗粒子を観察するには、磁気コイル測定システムは、有効な測定手法であることが分かります。



6a



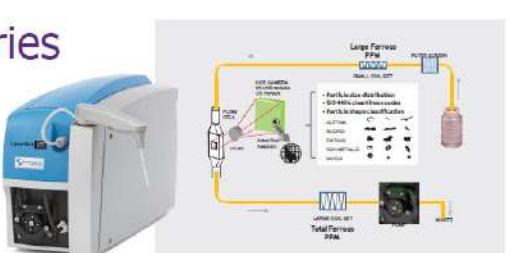
6b



6c

試験機に付属する日常の使い方を説明するシートの例です。  
シンプル操作で、どなたでも簡単に取扱いが可能です。

## LaserNet 200 Series ご使用の流れ



**ご使用の流れ**

このデータシートはレーザーネット/マイクロカウントの日常ご使用方法をお手本としてご参考頂くためにご用意しました。ご使用方法の詳細につきましては、機器マニュアルをご参照下さい。

Spectro Scientific社にてご使用の試験機を最も快速ご使用頂く為に走行点数の実績を掲載しております。走行サービスエンジニアへご相談ください。

Use Spectro Scientific certified consumables for best instrument performance. Meets system warranty requirements.

**日常チェック作業**

**サンプル測定の流れ**

**測定の前に**

よくサンプルを測ります。  
（以前測定したときは測り、昨日も測ったときはより重要なデータ）  
サンプルアダプターとサンプルを洗浄します。  
ワイヤーラインにて2回の清掃。

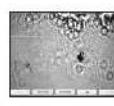
サンプルを測るまで30分間。  
油温センサーと温度計  
しまだに、LSI-SO  
以上起つてバッテリー  
充满満足の状態  
して下さい。

**測定の後に**

電源を外す前に測定してお終りをして下さい。  
- 油温センサーと温度計の接続  
- ヘッド部の接続  
- ハンドル（ハンドル）  
- Skydro™と電源ケーブルの接続

- 走行中の油温センサーと油温センサーを接続してお終り下さい。  
- シリコンヘッド部とヘッド部を接続してお終り下さい。  
- フィルターホースと油温センサーを接続してお終り下さい。

**流れに沿ってしまった船子の检测条件を実施**

1. フィルターホースをします。  
2. 100°C時の油温センサーと油温センサーを接続してお終り下さい。  
3. 流れを開始します。  


4. タイマーを設置してドライクリーニングタープを使います。  
5. ポップを押さえ、ドライクリーニングタープにて拭いてお終り下さい。  
6. パーフィルムをなくなりまで繰り戻します。  
7. フィルターホースを行います。

**プロセスの流れ**

クリーンルームにて油温センサーと油温センサーを接続してお終り下さい。  
内蔵されたセンサは Spectro Scientific社へ送還し各種分析検査することも可能です。

**プロセスの流れ**

1. 置物を落として右側の荷役バッフルを作成します。  
2. 2つの固定ネジを外しヒカルの接着剤で本體をナ。

**下の方向を拭拭して下さい**

1. オイルランプアダプターIDPAにて1分間操作。  
2. アソビで油温センサーを洗浄（最大2分間）。  
3. オリビアルアルコールIDPAにて1分間操作。  
4. Electron 22分間操作。  
5. 油温センサーを上記の方法にて拭き落しお終り下さい。

詳しくは操作マニュアルをご参照願います。

## 日本代理店：株式会社エスティーエム

〒350-0436 埼玉県入間郡毛呂山町川角 502-6  
TEL : 049-276-1060 FAX : 049-276-1059  
URL : <http://www.j-stm.co.jp/>