

## 「電磁波を利用した水処理」

もくじ	ページ		ページ
1. はじめに	1	4. スケール除去付着防止の実例	8
2. 製品仕様	1	(ア) 冷却水循環系	8
3. 作用効果	2	(イ) 製紙工場石灰溶解水	11
(ア) 基本的作用	2	(ウ) 温泉水	12
(イ) スケール除去付着防止効果	3	5. 防錆の実例	13
(ウ) 防錆効果	4	(ア) ランドリー	13
		(イ) ボイラー	15
		6. おわりに	18

### 1. はじめに

水分子が振動し易い電磁波を照射してその摩擦熱を利用する電子レンジ、電磁波の一種である光を作用させて水を浄化する光触媒、電磁気エネルギーを直接授受する電磁流体作用など、最近電磁波あるいは電磁気と水の物理的作用を利用する例が散見されるようになった。一方、固定磁界を発生する永久磁石、あるいはコイルに電流を数百 Hz～数十 KHz の間をスイープさせて発生する電磁界によって配管スケールの防止や鉄管の防錆に効果があるとする多種類の商品が市場に出回っている。ここでは後者と目的を同じくするが、「スケールをイオン化して溶解する」という電磁波と水に関する新たな知見を利用する水処理装置「電磁化水発生装置、イーサーまたは ESR (Electron Spin Resonator)」について、その作用効果および実施例を紹介する。

### 2. 製品仕様<sup>1)</sup>

「イーサー」は、円筒状の配管の内壁に生成された複数種の異なるスケールを同時に除去することができるように構成され、同時に除去可能なスケール構成金属元素の数は、例えば 30 種類以上とすることも可能である。通常の仕様では国内の水質に多いカルシウムやマグネシウムなどスケール構成金属元素 8 種類までのスケールを除去できるものとしている。

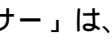
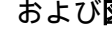
「イーサー」は、のように円筒状配管の外側にボルトで取り付けられる構造の磁界発生装置、およびの箱に収納された周波数信号発生装置とからなる。電磁界発生装置は、非磁性材のカバー内に複数個の磁界発生用コイルが取り付けられたものである。また、周波数信号発生装置はそれらの複数個の磁界発生用コイルに供給する周波数信号を発生するものである。信号は除去目的のスケールを狙い撃ちする所定の周波数に設定するとともに、さらに除去効果が最大となるように実験的に得られた電磁波の波形を用いている。



図1-1 「イーサー」の全体構成

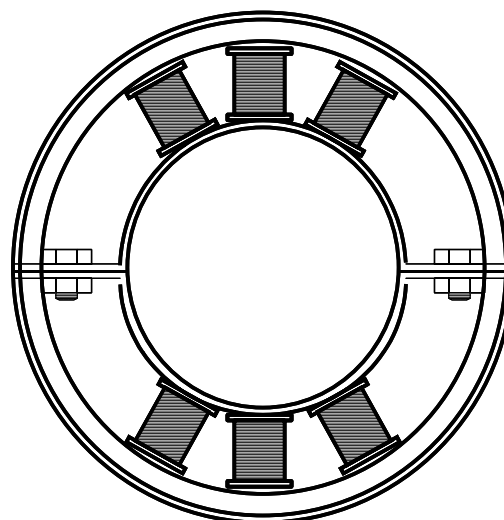


図1-2 電磁界発生装置の断面図

(左：電磁界発生装置、右：周波数信号発生装置)

### 3. 作用効果

#### (ア) 基本的作用

配管内のスケールは、ほとんどが金属元素の化合物から構成されている。電磁波と水に関する新規な知見では、スケールを構成する金属元素ごとにそれぞれが異なった電磁波(数ワットと微弱でよい)の周波数に反応して水中に微弱な電流(ナノアンペア程度)が流れる(図2)ということを実験的に確認したことにある。この微弱電流が発生する現象は、金属元素あるいはその化合物がイオン化ないしは再結晶するとき、その物質が付着する導体の配管または導体のスケール化合物内部を電子が移動すること、および水中で電荷を持つ物質が移動することによるものと考えられる。この現象は、スケールを構成する金属元素によって電磁波の周波数が異なることに特徴がある。流水があると、配管外部から流水に直交する電磁界を作用させることで発生するローレンツ力が電解質あるいはイオンに働き掛け、さらにイオン化と再結晶を複雑に生起させるものと考えられる。ちなみに、流水がある場合においても、イーサーの効果(スケール除去や黒錆化)は上流1m程度まで確認出来ている。また、イーサー取付位置からはるか下流2kmまで、その効果が持続することも実証されている。これは、イーサー取付位置で発生したスケール性イオンに水分子の籠が覆う「水和」<sup>2)</sup>という現象によるものと考えられる。もっともこの籠は水素結合で形成されるため、ピコ秒単位のスピードで着いたり離れたりしているので、下流中で出会う逆極性イオンと結合して微小な結晶となったり、導体の配管やスケールと電子を授受して管壁に付着したスケールをイオン化するなど、下流におけるイーサー効果の持続を理解することが出来る。

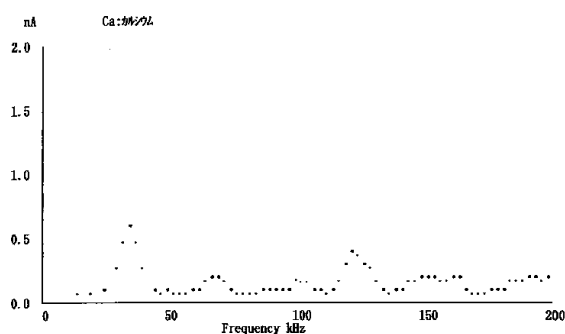


図2 - 1 カルシウムを主成分とするスケール除去対象物を水中に置いたとき、コイルに供給する周波数信号を変化させたときの水中の電流を測定したものである。周波数信号が約 35kHz の周波数の時に、電流が急激に流れることが確認できる。

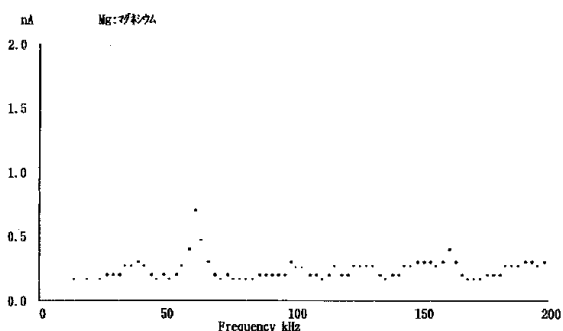


図2 - 2 マグネシウムを主成分とするスケール除去対象物を水中に置いたとき、コイルに供給する周波数信号が約 60kHz の周波数の時に、電流が急激に流れることが確認できる。

### (イ) スケール除去付着防止効果

冷却水系や溶解水系などの配管に発生するスケール除去付着防止に対しては、これまで主に薬注あるいは配管取替によって対処してきた。薬注では薬剤費用に加えて環境問題抑制に費用が掛かること、配管取替では大がかりな工事と多大な費用負担および住人の生活や企業活動に影響することなど、ユーザーにとって深刻な課題であった。

イーサーは、配管水に含まれる電解質あるいはスケール性イオンを構成する金属元素に対応した電磁波の周波数を設定すると、それに反応して水中に微弱電流が発生する。この現象から、水中の電解質が壁面に付着する導体と電子を授受するか、または配管が導体であればスケールが導体に電子を取られて、スケールがイオン化するなどが考えられる。もちろん、配管が導体でなくても、スケール自身が導体であればマイクロセルを構成してその中を電子が移動し、同時に水中にはプラス・イオンを放出する。こうして、水に接するスケールから順に溶解することも可能となる。

さらに、配管内の流水によってイーサーの効果が増強される。すなわち、流水中に含まれる電荷をもつ物質（電解質あるいはイオン）が電磁界発生装置の磁束を横切るとき、磁束の方向と電荷の速度  $V$  の向きとの角度が  $\theta$  [rad] であれば、点電

荷  $q$  が磁界から受ける力  $F$  は、磁束密度  $B$  の磁束の方向と速度  $V$  の電荷の移動方向とを含む面に垂直な向きであって、 $F = q V B \sin \theta$  [N] となる。この力  $F$  がローレンツ力であり、電荷を有する物質がスケールに衝突する確率を上げる力として作用するものと推定される。そのとき、特定元素に対してそのイオン化電圧以上のエネルギーが発生し、その元素（原子）あるいはその元素が構成する化合物がイオン化して水に溶け出すものと考えられる。

なお、イーサーはスケールを構成する金属の種類によって選択的な周波数の電磁波が作用するため、事前の水質検査によって特定された周波数のみ照射する（図3）。このことは、効果が得られない周波数の電磁波にエネルギーを割かれることが無いので、無駄がなく極めて効率的である。また、長期にわたる運用の際に水質の変化もあり得るとすれば、周波数の調整のみで容易に対応することが出来る。

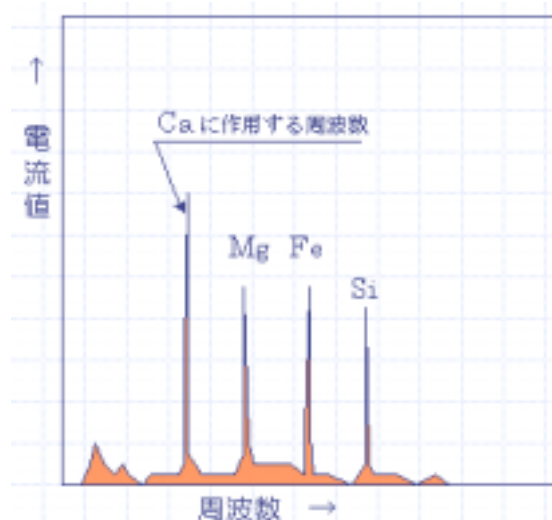


図3 イーサーの電磁波照射スペクトル。横軸が周波数、縦軸が電流値。本図は、国内の水質に多いスケール構成金属元素4種類：カルシウムやマグネシウム、鉄、珪素をセットした場合を示す。

### (ウ) 防錆効果

スケール生成し易い水では錆び難く、一方錆び易い水ではスケールが生成し難い、というのが水処理の常識である。イーサーが、スケール除去防止ばかりでなく、防錆にも効果があるのは矛盾に思えるかも知れない。しかし、鉄錆びもスケール性の結晶であることから、スケール除去防止の効果と同様な現象によって説明することが可能である。ただし、通常スケールがイオン化および再結晶する場合よりもっと複雑な現象となる。

#### (1) 鉄錆び生成とイーサー効果の実験

イーサーの効果を定量化するために、鉄錆びを生成してからイーサーを作用させる実験を行った。都の衛生基準を満たす水道水を用いたが、場所による水道水の違いによってそれぞれ異なる現象を見ることがあった。ここでは、一般的な実験

例を示し、鉄錆びの生成からイーサーによる黒錆び化の過程を追ってみる。

- ・ 500ccのビーカーに水を八分目ほど入れ、鉄片を水中にテフロン糸で吊す。
- ・ 鉄片には、JIS軟鉄試験片を用いる。
- ・ 赤錆が生成してから「イーサー」を掛ける。

(a) 鉄錆びの生成 (図4)

水中に吊した鉄片の表面に緑色の錆び(水酸化第一鉄)が生成する。

同時に水が白濁し、緑色の錆びは部分的に剥がれ落ちる。

剥がれ落ちて地金が顕れた部分の縁から赤錆(水酸化第二鉄)が生成する。

赤錆も数回剥がれ落ちるが、次第に地金を被いはじめる。

鉄片全体が赤錆に被われる。

- ・ ただし、別の地域の水道水では、～をスキップしていきなりとなるケースもある。これらの現象については、水道水に限らず、地下水などにおいても経験している。

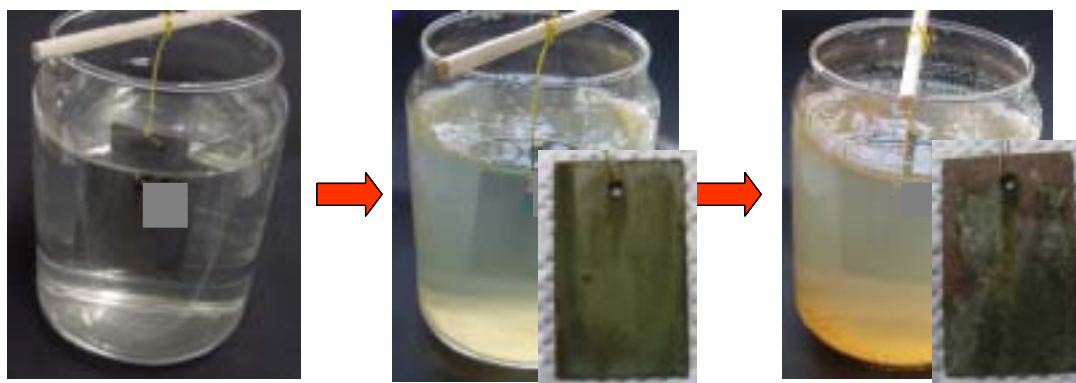


図4 JIS軟鉄試験片による錆びの生成実験

(左：初期状態、 中： の緑色の錆び、 右：赤錆)

(b) 「イーサー」による黒錆び化 (図5)

ビーカー外部から電磁界発生装置により特定周波数の電磁波を照射する。

1週間程度経過すると、赤錆がカサブタ状になって地金との間に黒色の錆びが生成している。

3週間程度経過すると、鉄片全体が黒色になる。黒色の錆びを剥がすと、灰色の薄くて堅い層が地金の表面に形成されている。

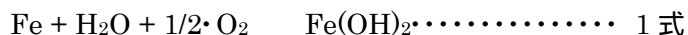


図5 黒錆び化

(2) 赤錆生成のメカニズム<sup>3) 4)</sup> (図6)

上記(a)のプロセスを化学反応としての説明を試みると、次の通りである。

錆の生成：鉄と水と酸素が共存すると鉄錆を生成する（図6左上）。

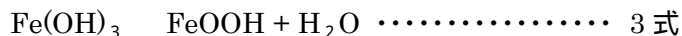


最初に緑色の水酸化第一鉄が鉄地金表面に付着して生成する。さらに、水酸化第一鉄は水溶性のため鉄地金表面に漂い白濁する。観察者によっては、緑色に濁ると表現される場合もあるが、実験を繰り返し行った結果、水中を流れる微弱電流の大きさによって水の色は透明・白色・緑色に変化することを確認した<sup>5)</sup>。

水酸化第一鉄は水中の酸素により酸化され、水酸化第二鉄 = 赤錆へ変わる（図6右）。



水酸化第二鉄は水分が取れてオキシ水酸化鉄  $\text{FeOOH}$ （水和酸化鉄  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）本来の赤錆となる（図6左下）。



腐食の基本反応 1 式は次の部分反応から成る。



4 式は、鉄が金属鉄原子の結晶格子から離脱して鉄イオンとなって水中に移行することを示す。

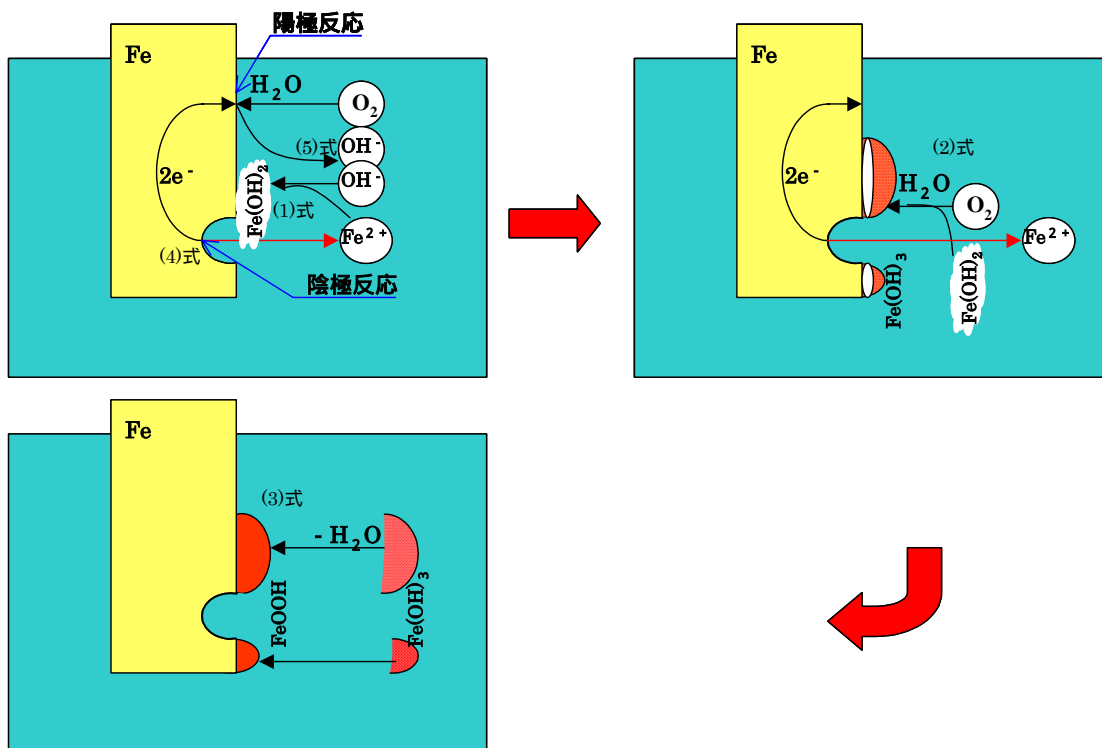


図6 水中の鉄片に赤錆が生成するメカニズム

(3) イーサー効果による黒錆び生成のメカニズム (図7)

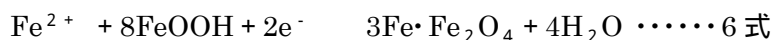
上記(b)のプロセスを電気化学反応としての説明を試みると、次の通りである。

赤錆から鉄イオンが放出されるとともに、電子が鉄片表面の傷や凹部に移動する (図7右)。

電子が増えて鉄片表面の一部がマイナスに帯電すると、鉄片表面の微小突起が陽極反応を示して鉄イオンを放出し、電子が微小突起へ移動する。

傷や凹部の周辺に堆積する鉄錆びのオキシ水酸化鉄と、水中からの鉄イオンおよび鉄片表面を移動してきた電子が反応してオキシ水酸化鉄側から鉄片表面に向かって順に酸化第一鉄 (図7右の黒い部分、イーサー効果の初期段階で赤錆のカサブタの中に生成する黒い粉状を呈する部分)、ヘマタイト類似層およびマグネタイト類似層を形成する。

鉄錆び、酸化第一鉄および鉄管内面の微小突起が無くなるまでマグネタイト類似層の生成が続き、傷や凹部はマグネタイト類似層で埋められる。



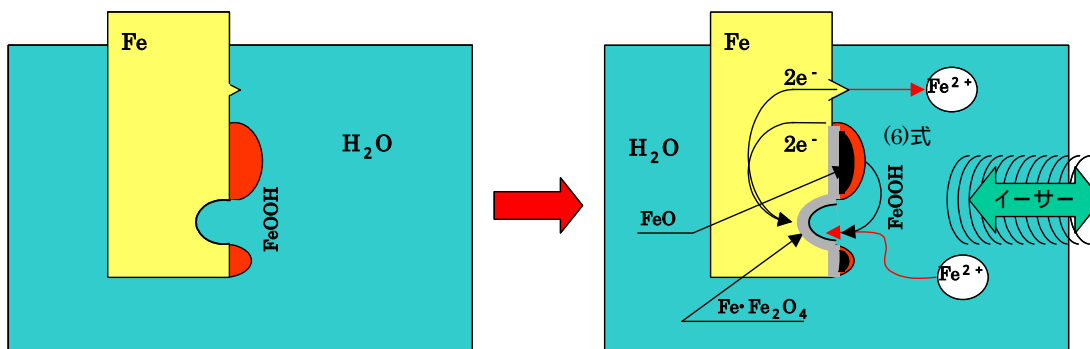


図7 イーサー効果による黒錆びが生成するメカニズム

#### 4. スケール除去付着防止の実例

##### (ア) 冷却水循環系

###### (1) 目的

空調冷却水循環系に関する薬注のランニングコスト削減、スケール・錆びの除去。

背景：対象施設は、延床面積十万㎡以上の商業施設であり、開業から3年が経過した平成14年に、水道水から地下水利用に切り替えて上水道料金が節約された。しかし、空調冷却水循環系への利用においては地下水に含まれる不純物、特にシリカが多く、水処理薬品メーカーの管理規準に照らすとスケール障害を起こし易いという内容であった。開業以来、熱源水の管理には薬剤を使用してきたが、これまでの管理方法ではスケール障害が起きるため薬液量の増加と新しい薬液追加が必要であった。

###### (2) 設置場所および点検箇所

冷却水循環系は2系統あり、図8左はイーサーのみの場合、右はイーサーと

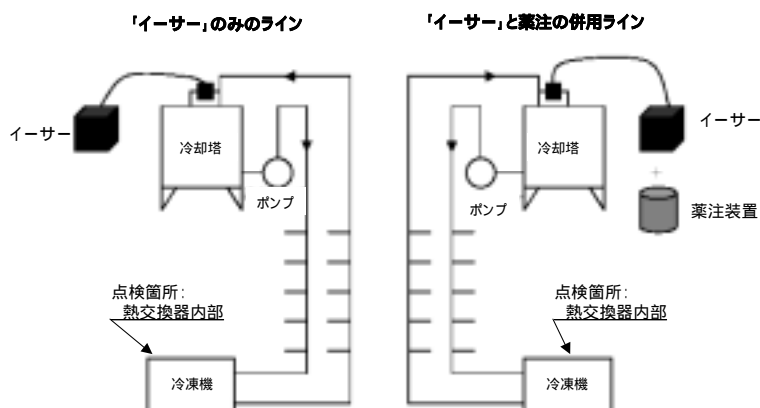


図8 設置場所および点検箇所



薬注装置を併用する場合である。イーサーは、それぞれ冷却塔への給水部に設置された。点検箇所は、冷凍機の熱交換器内部およびストレーナとし、年一回目視検査を実施した。

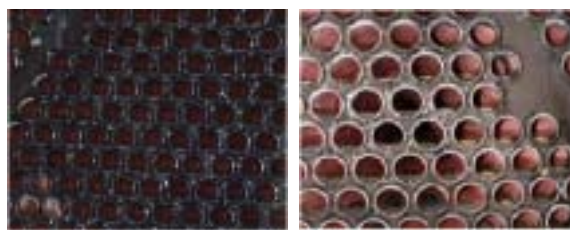
さらに、毎日の計測項目として PH、導電率、酸消費量、全硬度、カルシウム硬度、塩化物イオン、イオン状シリカ、鉄、銅、濁度、薬液濃度および LTD 値（凝縮機の冷媒凝縮温度と冷却水出口温度との温度差）につき、それぞれの管理基準値に基づいて検証した。

(3) 期間目的

平成15年4月～平成16年1月の約10ヶ月

(4) 検証結果

・熱交換器内部の目視点検  
「イーサー」設置10ヶ月間後、熱交換器内部にはスケールや錆びの痕跡は無かった(図9)。また、PH、導電率、シリカ、鉄などの計測項目について



イーサーのみ                      イーサーと薬注の併用

図9 熱交換器内部の目視点検

は、「イーサーのみ」と「イーサー+薬注」の併用ともほとんど同じように推移し、管理基準値を満足する結果であった。ここに計測項目の一例として、スケール付着の指標となる LTD 値の推移を紹介する。

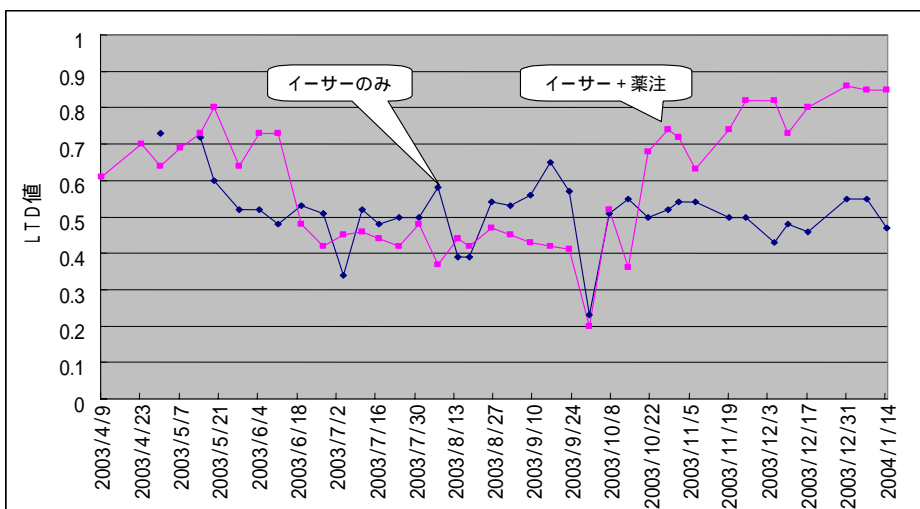


図10 冷凍機のLTD値

・LTD 値

冷凍機の凝縮器の伝熱管がスケール付着などで汚れてくると凝縮器における冷媒蒸気と冷却水との熱交換効率が劣化し、凝縮温度が上昇して LTD 値 [ ] が大きくなる。LTD 値の指標として運転負荷率の如何に関わらず、1 以内であれば汚れは軽微であるとして問題ない。図 10 は、「イーサーのみ」の場合においても冷却効率が良いことを示している。

図 10 において、「イーサー + 薬注」の場合の LTD 値が 2003/1022 以降、上昇傾向にある。この時期に計測項目のほとんどは「イーサーのみ」と「イーサー + 薬注」双方ともほぼ同じ値で推移しているにも拘わらず、図 11 に示すように同月中旬に双方とも鉄分が上昇し、「イーサー + 薬注」は濁度も上昇している。その後のデータから「イーサー + 薬注」の場合では銅が増加しており、これは鉄分上昇に対応して「イーサー + 薬注」の薬剤倍増に連動している動きであると言えよう。その間、「イーサーのみ」の場合、鉄分上昇も緩やかであり、濁度はゼロに近く変化無し。「イーサーのみ」の LTD 値も 0.5 でほぼ一定を示した。

ちなみに、LTD 値：1 ~ 3 では中程度の汚れ、3 以上ではかなり汚れが付着していると判定される。

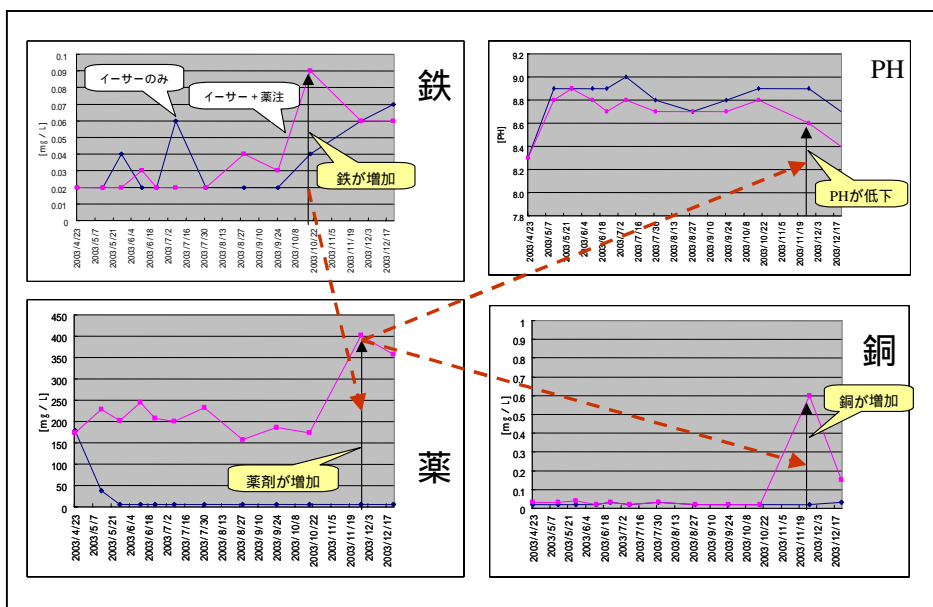


図 11 鉄分の増加に対応した薬剤増とその影響

なお、図 11 の計測項目に対する目標値はそれぞれ PH : 7.5 ~ 9.0、鉄 :

1.0mg/L 以下、銅：0.3mg/L 以下である。「イーサーのみ」の場合には全期間を通じてこれらの目標値をクリアした。「イーサー+薬剤」の場合では銅の2003/11/下旬データが一時的に目標値の2倍0.6mg/Lを示したとき以外は「イーサーのみ」の場合と同様であった。

・経済性

表1に示すとおり、「イーサー」のみの場合がもっとも経済的である。ここに、濃縮倍率については管理基準値に従った。

表1 年間ランニング・コスト

	濃縮倍率	フロー費	補給水費	薬液費	合計/年
水道水	8倍	¥140,000	¥4,500,000	¥900,000	¥5,540,000
井戸水(薬注)	3倍	¥300,000	¥0	¥2,230,000	¥2,530,000
井戸水(イーサー)	3倍	¥300,000	¥0	¥0	¥300,000

このようにイーサーは、シリカ対策に関する水処理薬剤メーカーの冷却水管理基準にも十分に対応する結果を得た。現在では薬注を廃止し、「イーサーのみ」で通算2年間の稼働期間を通じてお客様に満足いただいている。

(イ) 製紙工場石灰溶解水

(1) 目的

製紙工場の石灰溶解水配管系(350A)のスケール除去および防止。

(2) 設置場所と点検箇所

石灰溶解水配管系におけるポンプ下流にイーサーを設置した(図12)。

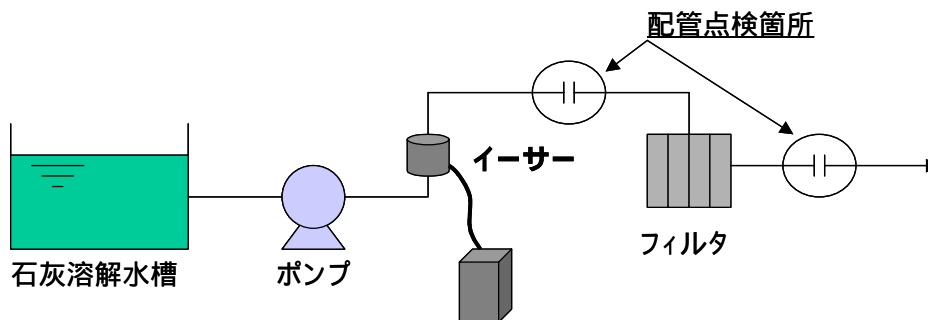


図12 製紙工場のイーサー設置場所と点検箇所

(3) 期間

平成15年4月初旬～5月末の2ヶ月間

#### (4) 検証結果

イーサー設置前の2月下旬に配管点検箇所において写真撮影(図13左)さらに、設置2ヶ月後の5月末に同じ箇所を写真撮影(図13右)して比較した。

設置前には、石灰が氷柱状に付着しているが、設置2ヶ月後においては付着が無くなり、清掃の必要も無くなった。

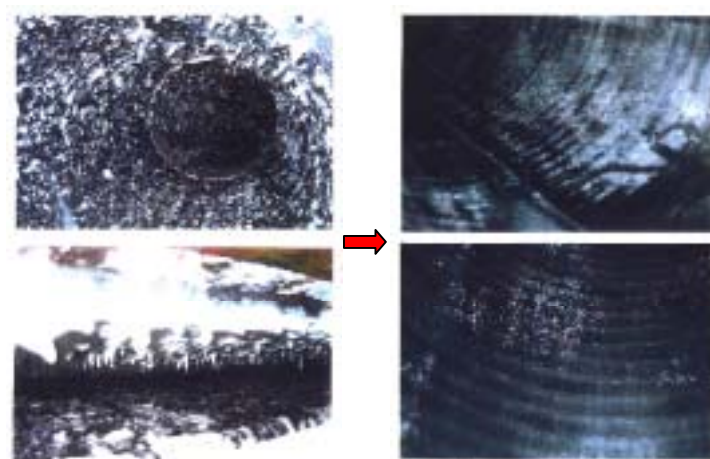


図13 左：設置前の2月下旬 右：2ヶ月後の5月末

その後、設置から現在まで通算1年9ヶ月の間に清掃は一度も実施していない。

#### (ウ) 温泉水

##### (1) 目的

温泉スケールの除去および防止。

##### (2) 設置場所および点検箇所

イーサーを温泉水用揚水ポンプ2次側に設置(図14)し、設置場所から約10メートル下流の配管継ぎ手部を取り外して、配管内部のスケール付着量を目視によって検証した。

##### (3) 期間

平成15年11月下旬～平成16年1月中旬の約2ヶ月間

##### (4) 検証結果(図15)

11月下旬の設置前：硬いゴツゴツしたスケールがしっかりと付着している。

12月中旬の設置一ヶ月後：スケールが軟化して、指でこすると簡単に地金がでてくる。

1月中旬の設置2ヶ月後：配管下部のスケールがとれて地金が出てきている。設置前に比べてスケールを90%以上除去することが出来た。



図14 イーサーの設置場所と点検箇所（温泉水）

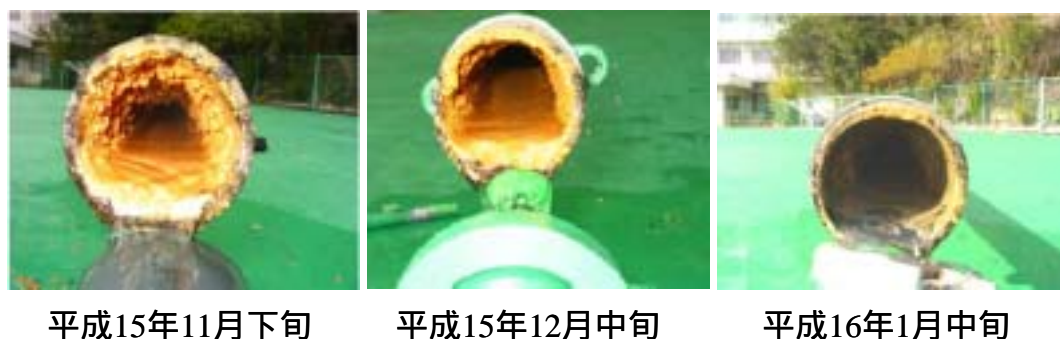


図15 検証結果

## 5. 防錆の実例

### (ア) ランドリー

#### (1) 目的

ランドリー施設において赤水により洗濯物が着色し、手洗い場の水も赤水で不衛生感があった。そのため、イーサーを用いて鉄分濃度の減少および赤錆を黒錆の酸化皮膜へ変えることの検証を行った。

(2) 設置場所および点検箇所

- ・ 設置場所は、給水のポンプ出口部とした(図16)。
- ・ 点検水の採取箇所は、手洗い場、ランドリー施設の2カ所とした。
- ・ 配管内面の黒錆化については、ランドリー施設において水中に浸した鉄片のテストピースを用いた。



図16 イーサー設置場所

(3) 期間

平成15年5月から平成16年1月までの8ヶ月間。

(4) 検証結果

- ・ 鉄分濃度は、5月の4ppmから1月の0.1ppmまで、8ヶ月間で約四十分の一まで低下した(図17)。その結果、水の濁りが取れて透明になってきた。
- ・ テストピース：イーサーの影響を受けるランドリー施設の大型洗濯機近傍の水中に浸したものは、赤錆化を抑制する効果を示した。一方、イーサーの影響を受けない水に浸したものは、8ヶ月すると赤錆化が進み、吊すための穴が抜けて落ちてしまった(図18)。

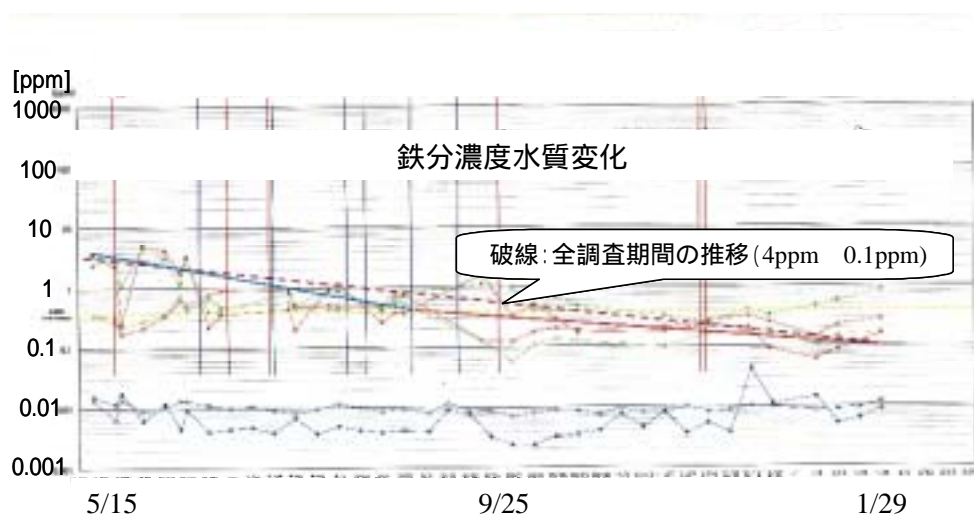


図17 ランドリー施設における鉄分濃度の推移

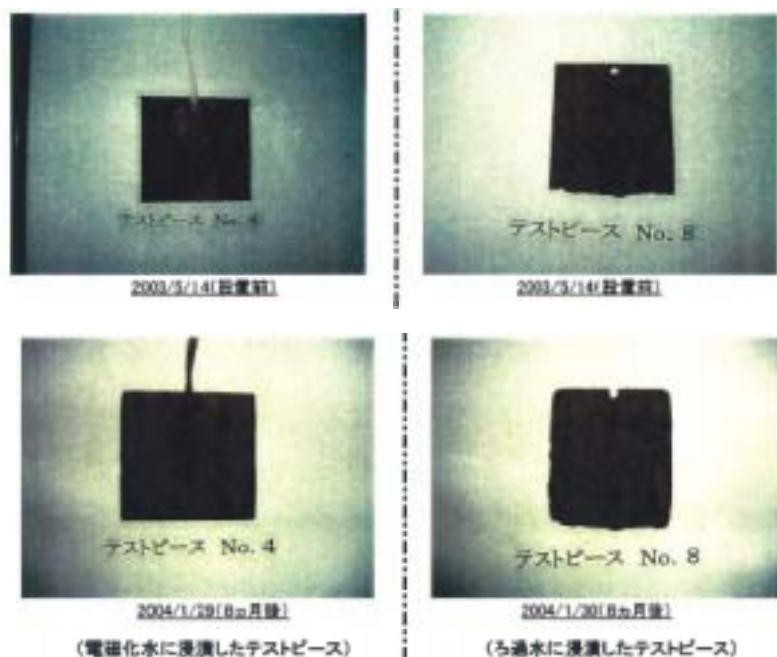


図18 テストピースの黒錆化  
(左：イーサーあり 右：イーサー無し)

その後、現在に至るまで鉄分濃度がさらに低下して、初期に設定した目標値に近づいている。

## (イ) ボイラー

### (1) 目的

清缶剤不要とするランニングコストの削減、および環境にやさしいスケールと錆びの除去防止。

背景：水質検査の結果、ボイラー3機の内、1, 2号機の缶内にはカルシウムスケールの成長が見られ、3号機は鉄イオン濃度が基準値を越えているためスケール成長は無く、赤錆が多く見られるものと推定された。

### (2) 設置場所および点検箇所

イーサーを軟水機直後の配管に設置した(図19)。

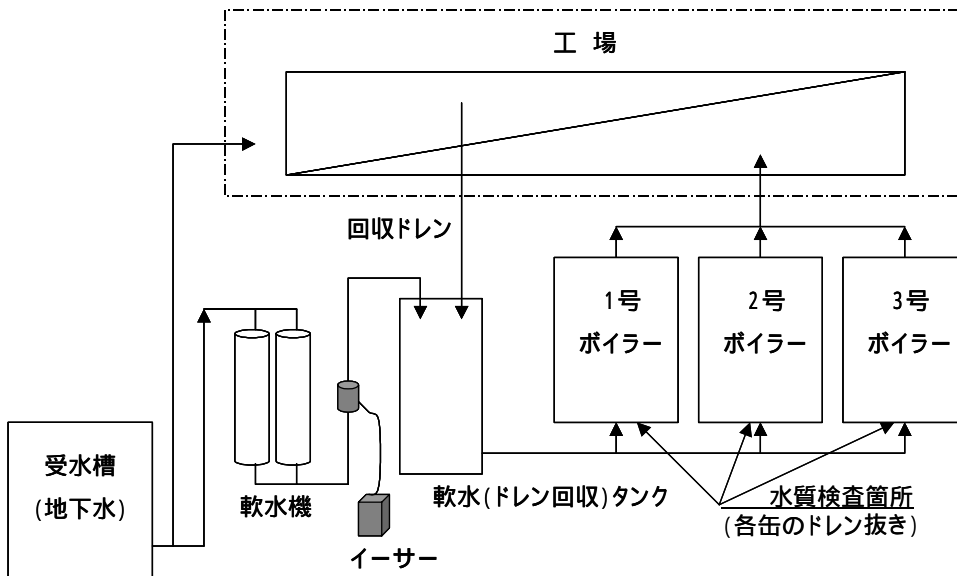


図19 イーサーの設置場所および検査箇所

水質検査については、一日一回各缶のドレン抜きから水を採取して行った。

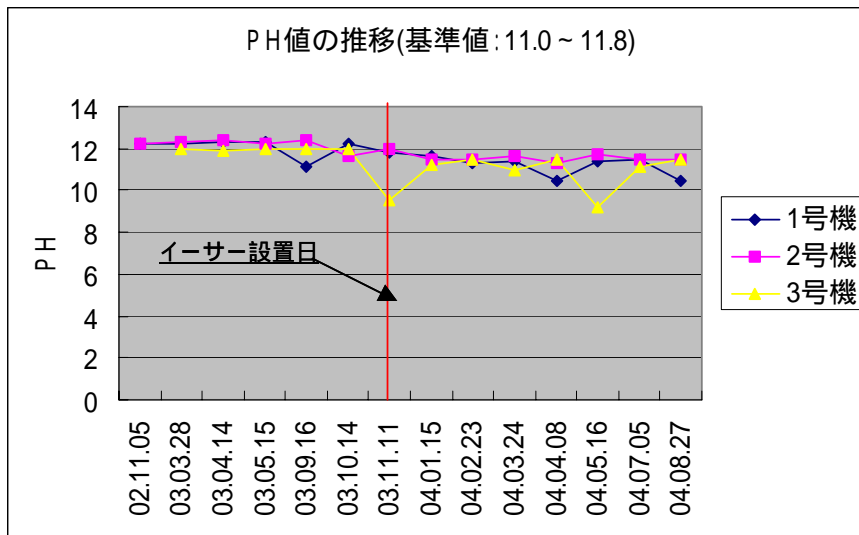


図20 PH値の推移

(3) 期間

平成15年9月～平成16年3月までの6ヶ月間。



(4) 検証結果

- ・ 清缶剤なしでもPH値が11.5付近を保持できるかが課題であったが、イーサー設置後においても1, 2, 3号機ともに課題をクリアしている(図20)。一部、数値が落ちている日は清掃日であったことを示す。
- ・ 導電率は、イーサー設置後1, 2, 3号機とも基準値を遙かに下回っている(図21)。
- ・ 鉄イオン濃度は、1, 2, 3号機とも水質管理の目安とする値よりも低位にある(図22)。

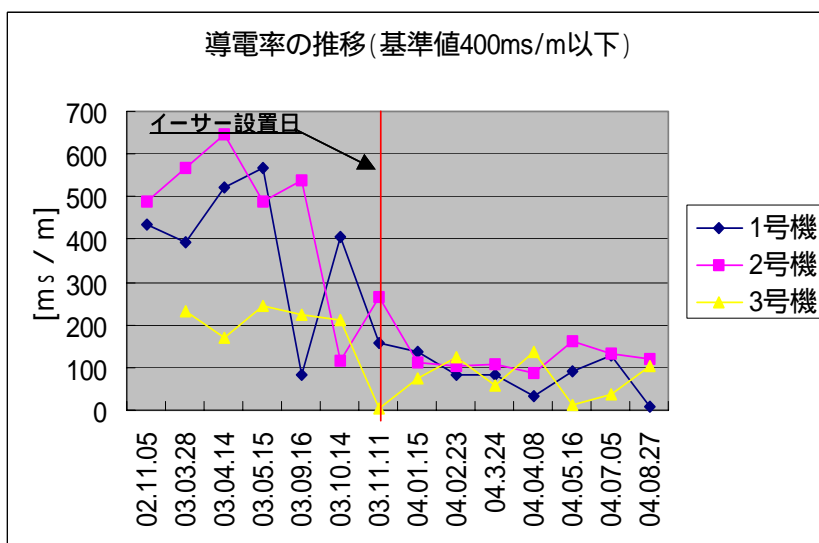


図21 導電率の推移

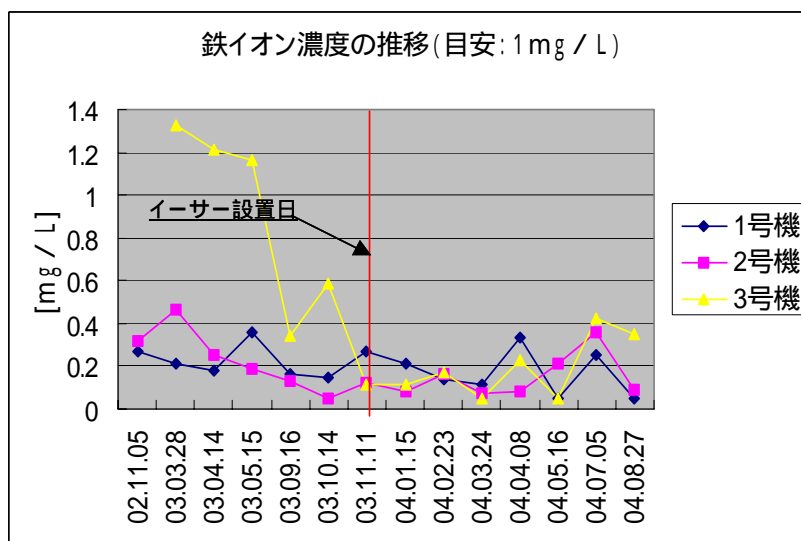


図22 鉄イオン濃度の推移

イーター設置と同時に清缶剤の使用を停止して以降、一ヶ月ごとの定期検査の際にドレン孔からの目視によって缶内で黒錆化も進行していることを確認されており、現在に至るまで正常に稼働している。

## 6. おわりに

平成13年11月にイーターの製品化に成功して以来3年間のうちに二百数十台の販売実績をあげると共に、実験室実験とフィールドにおける実績を着々と積み重ねてきた。爾来、水処理に関するさまざまな難問を抱えたお客様から大きな期待をもって迎えられ、首尾良く所定の効果を発揮するごとに至福のときを味わってきた。その間、地域や用途による水質に様々な特徴があること、現場の設置条件が各社各様であることなど、経験不足による戸惑いを感じたこともあった。幸い、イーターはこれらの状況に応じた調整が可能な装置である。このことは、お客様のそれぞれのご要求に対して容易に対応することが出来て、お客様からの信頼をさらに深くしつつある。今後も、電磁波が水とその溶解物質に及ぼす作用や現象をより正しく理解して、さらに優れた性能を持つ水処理装置を提供していく所存である。

## 参考資料

- (1) 「電磁化水発生装置イーター」、配管技術、2002年12月
- (2) 大瀧仁志、「イオンの水和」、共立出版、1995年2月
- (3) 藤井哲雄、「初歩から学ぶ防錆の科学」、工業調査会、2001年3月
- (4) 増子昇、「さびのおはなし」、日本規格協会、1997年3月
- (5) 「Chemical Handbook」、技報堂、1956年

お問い合わせ先：ロイヤル機器株式会社、tel:03-3378-7650、Email: [info@royalkiki.com](mailto:info@royalkiki.com)

URL: <http://www.royalkiki.com>