

## 溶融亜鉛めっき業における釜溶損の動力学：データに基づくアプローチ

M Bicknell, E Ghisi, M Polotti, M Ubiali and P Ubiali (Zinco Global Network, Italy)

### 緒論

2006 年 6 月に Zinco Service 社は溶融亜鉛めっき釜の操業の妨げとならないような診断方法として、K I D (Kettle Inspection Device：釜検査装置) 技術を導入した。この浸漬型超音波探触子を使用するシステムは、鋼製めっき釜を網目状にスキャンしてその厚さを平均 0.7mm の誤差で測定することが可能である。

K I D 技術導入後、Zinco の欧州とアメリカのネットワークで、各種のサイズ、年数、累積生産量及び炉の配置等にわたる 180 以上の釜の検査を行った。このように広い範囲で異なった状況にある釜では完全かつ広がりのある統計的データとはなり難い。しかしこの釜溶損に関するデータベースは、恐らく現在世の中で入手できるデータベースとしては最も価値があるといってもよいであろう。

この報告で提供する情報は、溶融亜鉛めっき工場の操業担当部門の人々と共有することにより、プロセスと技術の今後の発展に必要な改良を行なうことにつながる。このデータはめっき工場での予期せぬ突発事故を防ぐための根拠となるはずである。データは日常ビジネスの中で、KID による検査を要望したユーザーへのサービス活動として収集したものであり、特に計画を立てて収集したものではない。従ってアプローチは“実験”のような研究的見地からではなく、実地測定データを基本としたものとなった。本報告は完璧な統計に基づいた報告ではなく、すでに判明している情報、特に釜表面の溶損部分の分布に関する報告である。

### 予備的情報

入手したデータを分析すると、関連する多くの初期疑問点が生じる。第一の疑問は検査した個々の釜または炉に関する一般的な情報についての疑問である。

ほとんどの場合、Zinco Global はごく一部の情報しか持たず、顧客から提供された図やデータが確実なものであるかどうかを直接確認する手段がなかった。データのあるものについては特定の顧客に固有のものであるため、Zinco Global は釜の寿命に関する履歴その他の情報を要求しなかった。これにより企業内情報の外部漏洩問題になることを恐れたためである。一般に釜の年数、寸法及び炉の形式に関しては信頼のおける情報が得られる。一方、生産能率や釜の重大な問題の履歴などは入手できない。最近 2 年でおそらく浴組成、即ち高濃度の錫とビスマスに関係があると思われる釜の事故が議論を呼んだことはあるが、浴組成についての情報が得られることも少ない。

第二の初期疑問点は、何に基づいて二つ以上の釜の溶損パターンの比較をするのか、という問題である。本報告では、異なる釜の溶損パターンの比較の鍵となるとと思われるパラメーターを明らかに出来た。それは釜寸法、釜の年齢、炉形式及び生産能率である。先に述べたとおり、はじめの三つのパラメーターに関するデータは知ることができる。一方、生産能率に関しては信頼のあ

るデータを手に入れるのは難しい。しかしはじめの三つ情報が得られれば、意味のある比較を行うことは可能と思われる。

実際、これらのデータは、釜があとどれ位使用できるのか、また釜溶損に関連して推奨できる炉形式は何か、という溶融亜鉛めっき業者にとって根本的な二つの疑問点に対する大まかな答えの見通しをつけるのに役立つであろう。

繰返して言うがこの調査は初めてのものではあるが、データの数に限られている。したがって重要な疑問は、入手可能なデータをもとに比較したり結論を出したりすることがどこまで出来るだろうか、ということである。

比較するのにどのデータを使用すべきか、ということを検討するにあたって、KID 検査により二つの基本的に関連するデータのセットができることに注目する必要がある。それは厚み測定の数値と溶損部の分布である。前者はどんな比較においても最も正確な資料であり、一方溶損が進み過ぎた部分のマップも非常に有用である。何故ならば、それはその強力な目に訴える価値とホット・スポットその他の興味ある溶損現象に直接注目を引きつける力を持っているからである。さらに比較に用いる数値データの選択の問題がある。例えば、ほぼ同じ大きさと使用年数の二つの釜について、どのように比較すればよいか、という問題である。測定データの平均値で比較すべきか最小厚さで比較すべきか？もし最小厚さが通常の溶損パターンとは直接関係がなく、実際には局部的な問題によるものであったとしたらどうすべきか？

この調査では、釜の比較は平均厚さと最小厚さの双方を用いた。平均厚さの計算では、釜の測定値の最低と最高を除外した。同様に溶損分布をどのように比較するか、という問題が生じた。これに関してはこの調査により見出され、またこの調査の目的の一部である釜溶損分布に関して見出した一般的な法則に基づいて行うほかはない。この調査における統計的分析は膨大なものであるが、かといって全てではないので、結果は数値で表されているがグラフィックなマップとして表示するのが科学的に適切な比較の仕方であろうと言う事は強調してよいと思う。

### 基本的統計値

表 1 ~ 表 4 は調査で得られた平均厚さと最小厚さである。表 1 は各種のサイズと年数のフラット・フレームの釜の平均厚さ、表 2 は各種サイズ、年数のエンド・ファイアーの釜の平均厚さである。表 3 はフラット・フレームの各種サイズ、年数の釜の最低厚さ、表 4 は各種サイズ、年数のエンド・ファイアーの釜の最低厚さである。

これらの表は寸法と使用年数で整理したが、これはデータの比較と均一性の点で適切という理由からである。電気炉やその他の余り一般的でない炉についてはデータが少ないので表示していない。

これらの数値データの分析と比較から得られる主な結果を以下に述べる。

あるカテゴリーに含まれる寸法または使用年数の釜は、このデータベースの中にはない。非常に

新しい（2 年）釜及び古い（10 年）釜に関するデータが欠けている。一方 4 年から 8 年のクリティカルな年数の釜については良質かつ意味のあるデータが得られている。

全ての表と要因について釜寸法のみでは釜溶損との関係は見られない。事実、使用年数で整理したデータでは釜寸法による明らかな影響は見られない。釜寸法により、わずかに良好な状況を示すデータもあるがその傾向は明らかではなく、明らかな関連はなかった。さらにそのような僅かな差異は、釜寸法自体よりも小サイズの釜に通常見られる生産能率の小ささが隠れた要因となっている可能性がある。

勿論、個別データのいくつかはデータ数が少ないための影響を受けているが、明らかに確認できる傾向はある。先ず気がつくことはフラット・フレーム系の平均釜厚さである。平均厚さは全てのサイズ区分で使用年数が進むにしたがって確実に減少している。5 年目に小さなピークがあるように見える（恐らく統計的原因だろう）が、9 年か 10 年で約 34mm になるという傾向はまず間違いないところであろう。

エンド・ファイアー系の釜の平均厚さも使用年数が進むにつれ、はっきりとした傾向を示している。この傾向はエンド・ファイアー系の方がフラット・フレーム系よりも規則的である。つまり不規則なピークが見られない。

エンド・ファイアー系の釜厚みの経年減少量はフラット・フレーム系の経年減少量ほどではないようである。いくつかの理由があると思われるが、ここで結論を出すことには慎重を期す必要がある。しかしこのエンド・ファイアー系とフラット・フレーム系の相対的な 溶損効率 に関する傾向には注目して更に研究する必要がある。6 年あるいは 7 年目での平均厚さ( 44 から 42mm ) は両系とも同じように見えるが、それ以降はフラット・フレーム系では平均厚さの減少がエンド・ファイアー系より早いように見られる（36 - 33mm に対し 42 - 41mm）。

これらの事実を考慮した場合、最小厚さについて解析してみることも意味がある。事実このような比較により二つの加熱システムの相違がより明らかになると思われる。フラット・フレーム系の最小厚さは変動が大きい。しかし 7 年経過以降は約 40mm 乃至 30mm 以下から溶損が始まる事が明らかで、顕著な減少は 6 年目から 8 年目の間から現れはじめる。それは多分釜の溶損には別の基本原理、すなわち厚さが減少するにつれて溶損速度が上昇するという原理があることは確かである。一度 35mm 以下という最小厚さが発生すると熱交換速度が上昇し、釜のホット・スポットにおける溶損速度が加速される。またこのことは最小厚さの値が 5 年目と 6 年目の 40mm 及び 37mm から、7 年目と 8 年目の平均 31mm 及び 30mm にそれぞれ減少する、ということからも示される。

エンド・ファイアー系での最小厚さについては、フラット・フレーム系の場合ほど顕著には差が現れない。平均厚さの比較ではエンド・ファイアー系の方が良好のように見えるのに、最小厚さの比較ではその良さが確認できなかったのはなぜか、という疑問が生じる。答えは溶損（値）のばらつきにあるのではないと思われる。データを見ると最小厚さデータではなく、溶損分布に

よりエンド・ファイアー系の 溶損効率 が上昇していることを示している。エンド・ファイアー系ではバーナーの取付け位置、熱遮蔽物の存在や熱交換のパターンなどの釜表面への影響がフラット・フレーム系よりも少ない。それゆえエンド・ファイアー系では熱遮蔽の端部に顕著な溶損が発生するが、それは釜表面の限定された面積であり、その結果、計算上は平均厚さが大きくなる。しかし最小厚さのデータはフラット・フレーム系の炉に非常に近い。

エンド・ファイアー系の釜の平均厚さは古い釜ではやや良好のようであるが、最小厚さでは二つの燃焼系の間に差がない、ということを前提にするとどちらのバーナー配列が 溶損効率 がよいのか、という疑問への回答は非常に複雑である。ここに示したデータは適切に得られたものではあるが完璧ではないため、吾々は早急な結論は避けたい。しかしこの溶損効率の比較の問題に対する回答は、非常にシンプルな操業上の疑問、即ちどちらのパラメーターがめっき工場が釜を更新する際のガイドとなるのか、という疑問 - 最小厚さなのか平均厚さなのか？への答えとなるだろう。

公式データがないため、データを生産能率で区分して示すことはできなかったが、この不足した情報量でもデータそのものの質と意義にはそれ程大きい影響はないと思われる。個別のデータの中にははぐれ者もあり、それが生産能率の推定に影響を与えた可能性はあるが、全体としては認識可能なパターンを見つけることが出来た。このことから生産負荷が釜の溶損に影響を与えるということは事実としても、いま議論されている釜の閾値を念頭において再考してみることも必要であることを示している。言いかえれば生産能率はひとつの部分的要因に過ぎないとも言える。実際、釜の溶損の限界に関して議論すべきは、生産サイクル中のバーナーの加熱能力及び炉の全体としての加熱能力の何パーセントを使用しているかということである。大きい釜、したがって大きい炉は、通常は能力の 50% 以下で高い生産量を達成出来るよう設計されており、それゆえ生産能力は釜の溶損には軽度の影響しか与えていない、ということに容易に気がつく。

## 溶損分布マップ

これまで述べたように、釜の厚さデータの示すものは物理的測定値を基本としている。ほとんどのめっき業者は釜の交換時期の決定を KID による最小釜厚さ検査によっている。しかし吾々は溶損の分布も考慮にいれるべきと考えている。そうすれば全ての溶損の分布地図が通常の報告の中に添付され、考察されることとなる。溶損の分布地図は通常長さ方向だけの釜厚さを二次元的に表示したものである。この地図は測定した範囲の厚さを色で表している。厚さの分布状態は個々の測定値の間を補完した状態で示される。

この溶損分布地図は多くの顧客に釜の平均的な溶損分布を視覚化して見てもらうことが出来るので、それぞれの釜の加熱の負荷解析を行うのに非常に有効な手段である事がわかった。

後段に述べるのは、実際に調べた釜の溶損地図を比較しての観察報告である。これら全ては釜溶損への影響が大きい要因を求めると行ったものである。

すべての調査期間を通じて、得られたデータは壁の溶損と局部加熱温度の平均値との間に直接的な関連があることを示している。溶損地図は常に設置されている炉の形式と関連がある。大きい

溶損は熱源すなわちバーナーの位置と関係がある。図 1 及び 2 は溶損地図の例であるが、フラット・フレイムバーナーの位置に明らかに釜の溶損マークが見られる。図 3 及び 4 は電気加熱炉のような非常に均一な熱源を持つ炉の溶損分布を示している。このような場合の溶損は良好な分布を示す。

これまでの経験で壁の局部温度はバーナーの物理的位置のみでなく、他の要素にも影響されることがわかっている。その中のひとつが排気速度である。釜のいろいろな部分が渦流や加速などによる乱流に曝され、その部分は他の箇所より余分に溶損する。この現象は文献では速度と熱移動との直接的関係で説明されている。これはフラット・フレイム炉上部の燃焼室囲い部分などで見られる典型的な乱流または高速領域でのケースである。典型的な場合、燃焼室上部の断熱材と釜との角度によっては、フラット・フレイム燃焼炉のガスの流れが乱流となり、大きい溶損を示す原因となる。

高速燃焼炉の境界領域にある断熱材の周辺でも同様の影響が見られる。この場合、高速燃焼バーナーで発生して炉に吹き込まれた燃焼ガスは、断熱材が端部で僅かに段差がつくところで少し偏流する。ここで熱移動量が増加し、釜の壁に明瞭な溶損痕が現れる。

多くの場合、燃焼ガスの流れる位置は乱流の形状と排ガスの速度が増加する位置と関係があり、それにより大きい溶損部分が発生する。通常、炉の一方の端部、通常は燃焼室の反対側の端部が平均的に溶損量が少ないことが知られている。これは多分その位置での燃焼ガスの流速が遅いためであろう。ある場合には、釜のコーナーのような限られた部分での釜の形状変更が激しい溶損の原因となることがある。またある場合には形状の変更により燃焼室の幅をやむを得ず狭くしたり、ガスの流速が速くなったため溶損部分の増大を招くこともある。

### 釜の稼働可能年数

上述のデータ分析で説明した通り、稼働年数と釜の溶損量とを簡単に結びつけることは出来ない。数値データが稼働可能年数と強い関連があるとは言えず、むしろ炉の最大燃焼能力に対する平均的な稼働状態との関連がより強い、ということが言えるならば溶損地図はこの課題を今後更に検討するために役立であろう。

図 5 及び 6 は 5 年間稼働したフラット・フレイム系の釜でこれまでに 25,000 トン以上生産している釜の溶損地図である。図 7 及び 8 は同じ釜でこれまでに 12,000 トン生産している。これらの釜は寸法も稼働年数も同じであるが、溶損速度は異なっている。これは生産能率が異なることと、全般的に炉の加熱能力の利用効率が異なるためである。図 9、10、11 及び 12 は使用年数がさらに進んでいる釜のものである。これらの溶損地図は時間とともに溶損が進むことを示している。

使用年数だけが絶対的な指標ではない、ということを強調するのは重要である。逆に設置されている釜の寸法と炉の公称能力との関連で考察すべきである。言い換えれば決定的な要因は本文の冒頭で述べたように、炉の加熱能力の平均酷使度である。

## 釜の中で動く物体と乱流

パイプ、ワイヤーあるいは亜鉛を遠心分離する品物のような特殊なめっき釜の調査により、中でめっき物を動かす装置がある釜では溶損に直接影響があることがわかった。このような現象は釜の中の熔融亜鉛の乱流が連続して釜内面の鉄-亜鉛合金を剥離させることにより生じると考えるのが合理的である。合金層は不安定で絶えず生成し、そのため釜の溶損速度は早くなる。その例は図13及び14に示されている。同じような不安定な力学作用が釜の浴面付近に働いたのが、早い溶損の原因と考えることが出来る。それは操業中の亜鉛浴面の変動に触れる釜の壁面部分である。

## 結論

釜の溶損というテーマは今日でもまだ未解明の部分が多い。この論文では、その中でも共有されているいくつかの意見について検討し、場合によっては測定データで裏付けすることができた。しかし熔融亜鉛めっき釜の溶損について完全に理解するには、まだなすべき多くのことが残されている。ここに示したデータからいくつかの一般的結論を導きだすことができたが、これが今後の議論の基礎となれば幸いである。

先ず第一に測定値は釜の溶損が均一ではなく、ある種の基本法則によって分布していることを示している。それは熱源の位置、燃焼ガスの出口の位置及び恐らくは熔融亜鉛の流れの動力学である。また解析にあたっては多くの相違点を考慮に入れなければならないので、熔融亜鉛めっき釜内部の溶損の状態を広い範囲で予測したりすることは出来ないことをデータは示している。

第二に炉形式の違いと溶損への影響について比較し、実際にどちらのシステムが釜の寿命にとって望ましいかと言う検討を行った。吾々の見解としては、通常はフラット・フレーム系と高速燃焼系は最小釜厚さに関しては同程度の影響ということであるが、全体としての溶損面積はフラット・フレーム系の方が有意に大きかった。

最後に釜溶損量は、どちらも時間当たりのめっきトン数で表現できるが、明らかに炉の稼働状況の関数であり炉の公称能力との関数関係はない。このことから、どの炉も永久に使用することはできないが、生産能率を下げれば長い寿命が期待できる。これは誰も望まない方法ではあるが、状況が厳しくなった時の救済策とすることは出来る。

前述したいくつかのアイデアは亜鉛めっき業界にとっては別に驚くようなものではないだろう。この報告は全く新しい洞察を提供するものではなく、むしろ測定データをもとにこれまで一般的に信じられていた事を最終的に支持するものである。意見と科学との差ということになる。なおまたデータから溶損パターンを定義付けることは困難であり、強力な論理により単一の燃焼系を指向することも難しい。このような状況は多様性の大きい業界の特性に由来するものであり、かつ通常ではプラントのパフォーマンスがほぼ一定化するような、業界の共有技術（shared technical best practice）的なものが少ないためと思われる。

本報告のような、データをもとにしたアプローチから実証的なアプローチが生まれることを期待する。多分、溶融亜鉛めっき業界が釜の溶損に及ぼす浴組成の影響について広範で完全な科学的調査をサポートする時機がきている。さらに炉の構造とバーナー・サイクルについて複雑な数値シミュレーションをし、現在大部分を経験に頼っているめっき炉の設計と製作を最適化されることが望まれる。

## 謝辞

新しい技術について世界中の顧客から支持と関心を頂いたことを感謝する。またカナダ国立研究所工業物質研究室の C. K. Jen 教授のチームに科学的知見と継続的な支持を頂いたことに感謝する。技術的検討にあたっては貴重なアイデアの源であり、パートナーとして欠かせぬ存在であった Massio Bani に深甚よりの謝意を表する。

表 1 フラット・フレイム燃焼系 平均厚さと釜厚さ、使用年数

|        | 釜 年 令 ( 使 用 年 数 ) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 釜長さ(m) | 2                 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 4-8    | -                 | 46   | 42.3 | 46.4 | 42.2 | 42.5 | 36.5 | -    | -    |
| 9-12   | -                 | 44.1 | -    | -    | -    | 34.5 | 32.9 | -    | -    |
| 13 以上  | -                 | 45.7 | 41.8 | 45.1 | -    | 41.7 | 39.4 | 34.6 | 34.5 |

表 2 一方燃焼系 平均厚さと釜長さ、使用年数

|        | 釜 年 令 ( 使 用 年 数 ) |      |      |      |      |      |      |      |    |
|--------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 釜長さ(m) | 2                 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10 |
| 4-8    | 46                | -    | 45.4 | 44.2 | 44.1 | 43.2 | 43.1 | -    | -  |
| 9-12   | -                 | 42.6 | 46.3 | 45.5 | 43.9 | -    | -    | -    | -  |
| 13 以上  | -                 | -    | -    | 45.2 | 44.5 | -    | 42.5 | 41.4 | -  |

表 3 フラット・フレイム燃焼系 最小厚さと釜長さ、使用年数

|        | 釜 年 令 ( 使 用 年 数 ) |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 釜長さ(m) | 2                 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| 4-8    |                   | 40.9 | 38.7 | 42.3 | 37.9 | 32.2 | 30.0 | -    | -    |
| 9-12   | -                 | 39.9 | -    | -    | -    | 30.6 | 28.9 | -    | -    |
| 13 以上  | -                 | 42.2 | 36.5 | 41.4 | -    | 31.2 | 30.2 | 30.0 | 26.2 |

表 4 一方燃焼系 最小厚さと釜長さ、使用年数

|        | 釜 年 令 ( 使 用 年 数 ) |      |      |      |      |      |      |      |    |
|--------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| 釜長さ(m) | 2                 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10 |
| 4-8    | 41.1              | -    | 26.2 | 37.8 | 40.1 | 41.7 | 38.8 | -    | -  |
| 9-12   | -                 | 39.9 | 41.1 | 41.9 | 36.7 | -    | -    | -    | -  |
| 13 以上  | -                 | -    | -    | 41.9 | 35.7 | -    | 31.5 | 24.5 | -  |

図 1 ～ 14 の溶損分布図の手引(数値は mm)

|         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ■ 25-26 | ■ 26-27 | ■ 27-28 | ■ 28-29 | ■ 29-30 | ■ 30-31 | ■ 31-32 | ■ 32-33 | ■ 33-34 | ■ 34-35 | ■ 35-36 | ■ 36-37 |
| ■ 37-38 | ■ 38-39 | ■ 39-40 | ■ 40-41 | ■ 41-42 | ■ 42-43 | ■ 43-44 | ■ 44-45 | ■ 45-46 | ■ 46-47 | ■ 47-48 |         |

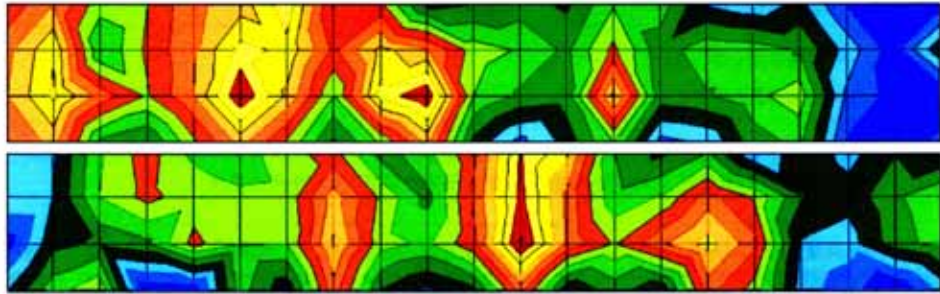


図 1(上)及び図 2(下) フラット・フレイム系の釜の溶損分布図。明らかにシングル・バーナーの溶損への影響が見られる。それぞれのバーナーの調整、燃焼ガスの流れ、釜の寸法、釜の変形などにより、溶損への影響がそれぞれ異なった現れ方をしている。

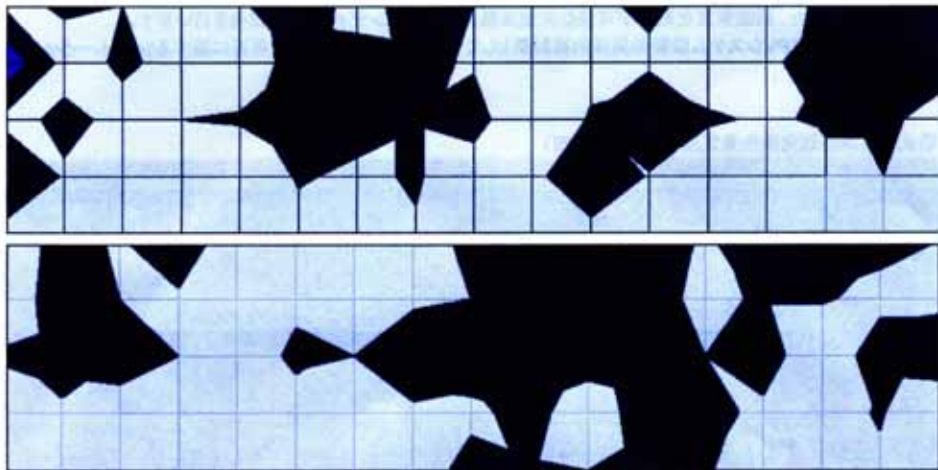


図 3(上)及び図 4(下) 電気加熱の炉の溶損分布図。電気加熱系では均一な加熱がされており、非常に規則的な溶損分布となっている。溶損は規則的で分布のピークも少ない。



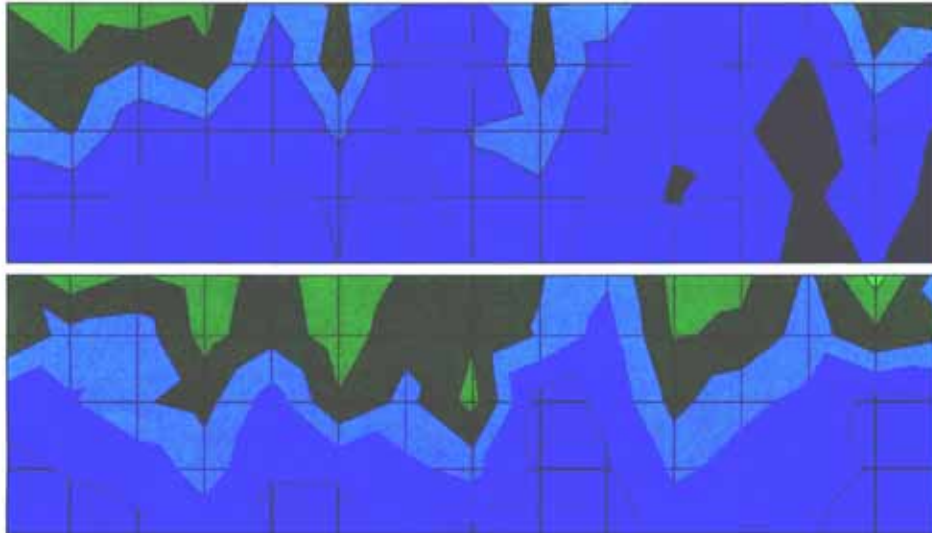


図5(上)及び図6(下) フラット・フレイム系炉の溶損分布図。釜は5年間の使用で、年平均生産量は 25,000トン。

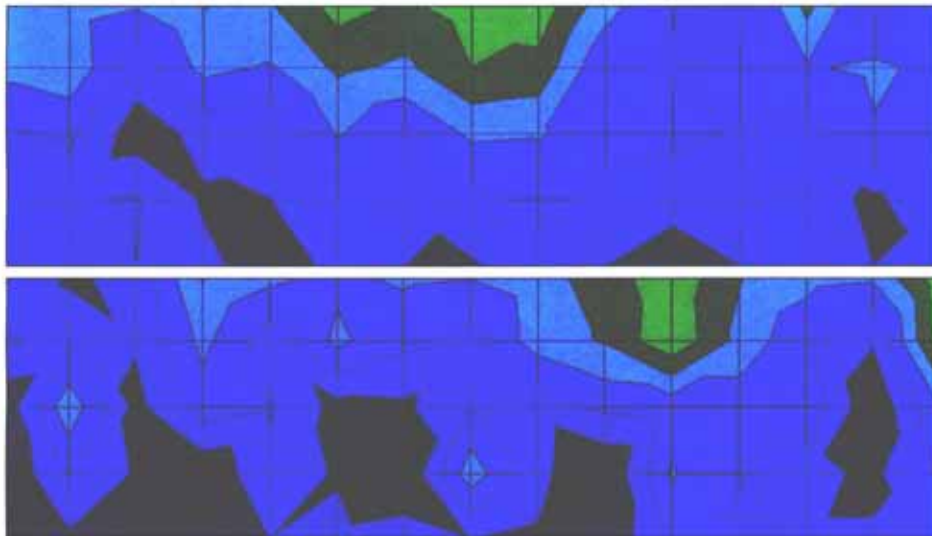


図7(上)及び図8(下) フラット・フレイム系炉の溶損分布図。釜は5年間の使用で、年平均生産量は 12,000トン。  
溶損分布は図5及び6より高い平均値を示し、溶損部分の拡がりも少ない。

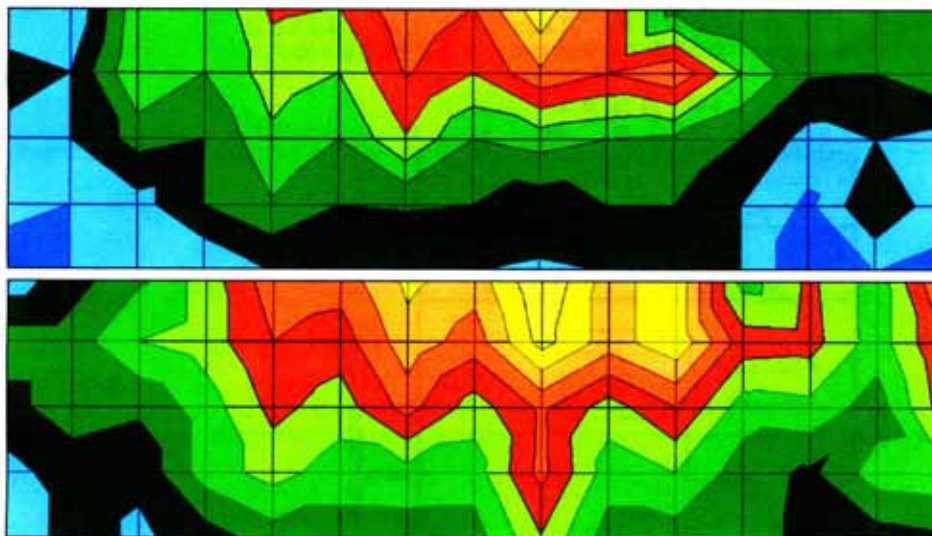


図9(上)及び図10(下) フラット・フレーム系の同じ釜の長さ方向の溶損分図。6年目(図9)と7年目(図10)の測定値。

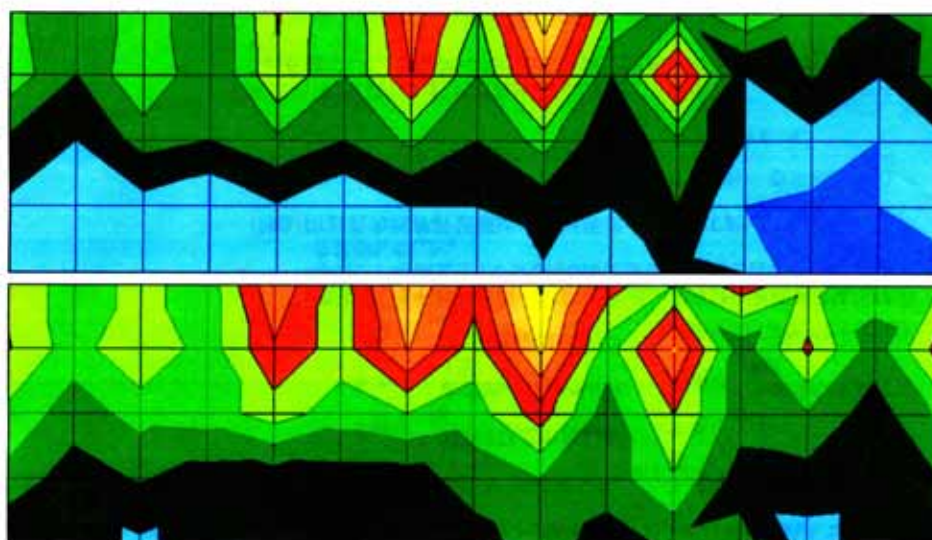


図11(上)及び図12(下) フラット・フレーム系の同じ釜の長さ方向の溶損分布図。6年目(図11)と7年目(図12)の測定値。

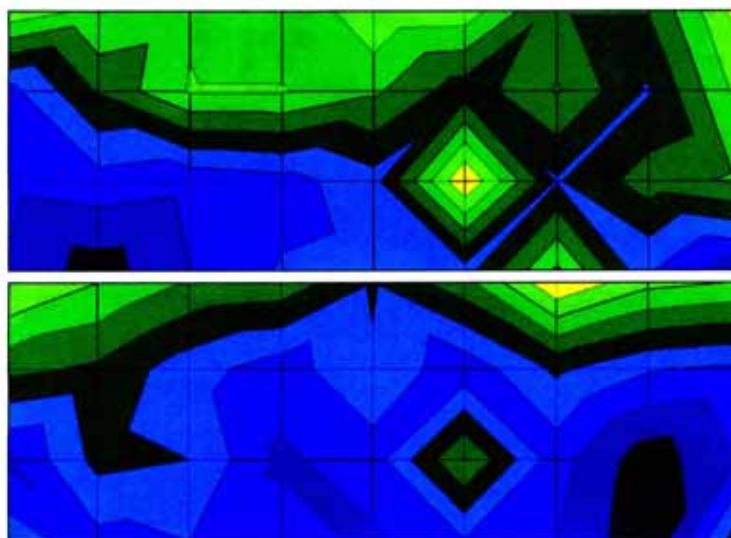


図13(上)及び図14(下) 遠心分離適用製品用めっき釜の溶損分布図。両方ともに壁の特定の部分がかこの浸漬の影響を受けている。