



耐摩耗性耐火ライニング における不具合の軽減

エグゼクティブ サマリー

石油化学産業のエンドユーザーは、耐摩耗性ライニングの不具合を、彼らの運用における最も重大な課題の一つとしています。これはプロセスの中断、予期せぬ修理、および重要な処理装置の早期交換につながり、特にFCC（流体触媒クラッキング）設備で顕著になります。これにより、運用コストが著しく増加し、製品生産量が減少します。

特にこれらの不具合に関する議論は、その根本原因ではなく、二次的な症状に焦点が当てられることがよくあります。このホワイトペーパーでは、耐摩耗性耐火ライニングの設計上の致命的な欠陥に焦点を当て、ライニングのバイパス現象が発生する可能性がある問題について取り扱います。これは、通常の閉鎖式および非閉鎖式セルのアンカリングシステムの挙動を調査し、コーキングおよび非コーキング環境で両方の影響を検討し、代替のアンカリングソリューションを紹介しています。

ハイライト:

- ・ 耐摩耗性ライニングの主要な故障原因は、通常の閉鎖式セルおよび非閉鎖式セルアンカリングシステムの設計上の欠陥によるライニングのバイパス現象です。
- ・ ライニングのバイパス現象は、ライニングの隙間やクラックを通じてプロセスガスや液体が処理装置のシェルに到達し、不要な堆積物の蓄積や流れの中断を引き起こします。これはさまざまな故障と運用コストの増加につながる可能性があります。
- ・ バイパス現象は、コークスジャッキング、耐火性ビスケティング、腐食の加速、さらには完全なライニングの分離を引き起こす可能性があります。
- ・ これらの不具合は、プロセスの中断、触媒の損失、および緊急シャットダウンを引き起こす可能性があります。
- ・ ここでは代替の半閉鎖式アンカリングシステムが紹介され、通常の閉鎖式セルおよび非閉鎖式セルシステムの利点を有しながら欠点を軽減します。
- ・ 検証を通じて示されたように、非閉鎖式アンカリングシステムはライニングのバイパスを効果的に軽減し、耐火材料を保護することができ、これにより石油化学処理装置の効率、安全性、および長期的な持続可能性が向上します。

Sponsors

We thank the following sponsors for their materials, resources, expertise and support:

Innovating leading sponsor:



Specialist sponsor:



Sponsor:



チャプター1 イントロダクション

圧力下で行われる石油化学処理装置、例えば流動層触媒クラッカー(FCC)、は80年以上にわたりダウンストリームの石油精製市場で重要な存在となっています。初めて商業用FCCユニットが1942年に導入されて以来、機械的信頼性を向上させ、プロセスを進化する市場の要求に適応させるために重要な改良が行われています。FCCプロセスは石油精製においてその柔軟性で知られ、さまざまな原料を効率的に処理できる最も適応性のある容器とされています。FCCは原油から価値のある製品を生産する上で重要な役割を果たし、精製産業において操作の効率性と経済的実現性を促進しています。その出力は単に精製製品の総生産に大きく寄与するだけでなく、触媒クラッキング技術の進歩を反映しています。

運用の長寿命と効率、信頼性のある装置と処理の革新にかかっています。このような装置の強靭さと耐久性に寄与する重要な要素の一つは、摩耗に強い耐火ライニングの実装です。FCC(流動層触媒クラッキング)の運用が要求される状況では、触媒粒子が絶えず流動する摩耗要素が存在するため、摩耗に強い耐火ライニングの使用が極めて重要となります。これらのライニングは、処理ユニット内の摩擦力や高速粒子によって引き起こされる摩耗を緩和する保護バリアとして機能します。

最近のAPI 936の会合で共有された経験によれば、エンドユーザーは耐摩耗ライニングの不具合を、彼らの運用における最も深刻な課題の一つと見なしています。この状況は、エンドユーザーがこれらの不具合に対処し、修理する際にかかりのコストが伴います。各FCCデザインがエンドプロダクトへのアプローチにおいてわずかに異なるかもしれませんが、従来の耐摩耗ライニングが適用される領域で直面する問題は類似しています。

この記事は、耐摩耗性ライニングの設計上の欠陥に注目し、これがFCCおよび類似の設備の運用効率に大きな影響を与えるさまざまな故障メカニズムを導くことを目的としています。この記事では、この設計上の欠陥の原因とその影響に深く踏み込み、問題を軽減するための代替ソリューションを探求します。

Chapter 2 – Refractory Lining Bypass (耐火層のバイパス)

処理装置の壁は、厳しい処理環境から容器を保護するために特別に設計された耐火材料で被覆されています。これらの耐火ライニングは、構造的なサポートのために金属製のアンカリングシステムを利用しています。さまざまな用途に利用可能な耐火製品やアンカリングシステムが存在しますが、共通の目標は、処理装置を最適に保護するために連続的な一体型のライニングを確立することです。

しかし、通常 $\frac{3}{4}$ インチ (19mm) または 1 インチ (25mm) の厚さの耐摩耗性ライニングは、伝統的なアンカリングシステムのために、連続的な一体型ライニングを維持するという目標を達成できていません。これが、耐火材の分節化およびマルチリックライニング (複数の岩石様なライニング) の形成につながります。

これらの従来の金属製アンカリングシステムは、通常、ライニングと同じ面に配置されており、処理側からシェル側まで広がる隙間やクラックの形成を許容します。その結果、耐摩耗性ライニングでは、処理ガスや液体がライニングの裏側に到達することが多く発生します。ライニングの裏側にある処理環境の望ましくない (悪影響を及ぼす) 要素の存在を、「refractory lining bypass (耐火ライニングのバイパス)」と呼びます。

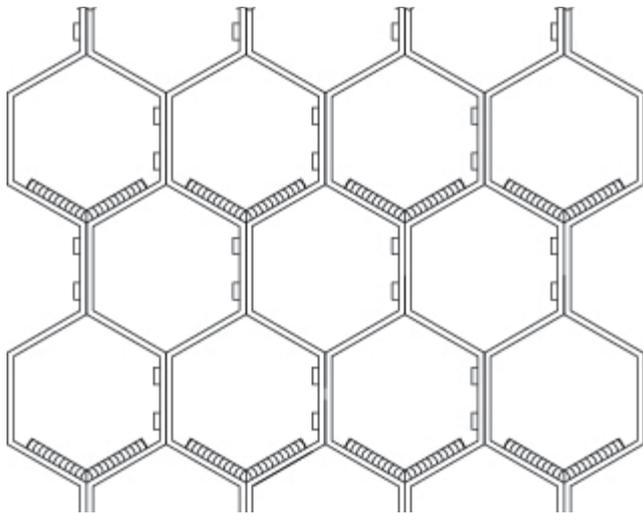
バイパス現象が発生する仕組みを理解するには、石油化学産業内で使用されている耐摩耗性ライニングの伝統的なアンカリングシステムを理解することが重要です。

2.1 Metallic Anchoring Systems (金属製アンカリングシステム)

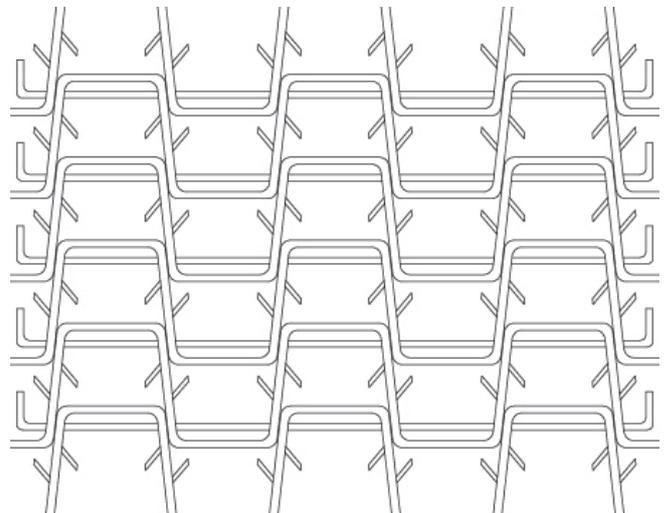
Closed Cell Anchoring Systems (閉鎖式セルアンカリングシステム)

閉鎖式セルアンカリングシステムは、耐火材が詰め込まれた小さな閉じられた空間から構成されます。閉じられたセル内に含まれる耐火材は「クッキー」と呼ばれます。閉じられたセルを構成する金属ストリップの開口部を通じて以外は、耐火材は連続していません。六角形のメッシュ、または六角金属 (hex metal)、は耐摩耗性ライニングに最も使用されるアンカリングシステムの一つです。これは六角形のセルを形成する金属シートが連続的に接続されたもので構成されています。完全なシステムはハチの巣の形状を模倣しています。メッシュはまず容器の壁に溶接され、その後、六角形のエンクロージャに耐火材が詰め込まれます。フレキシブルメッシュ、またはフレックスメッシュ、は閉鎖式セルアンカリングシステムの別の例です。

これらのタイプのシステムは、高い金属対耐火材の比率と単位面積あたりの多数の溶接箇所を特徴としています。



標準的なヘックスメッシュ) 金属

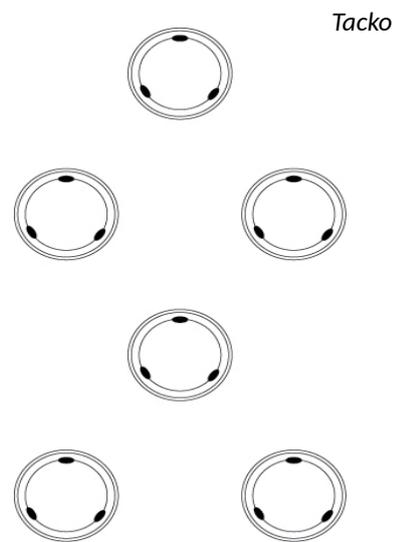
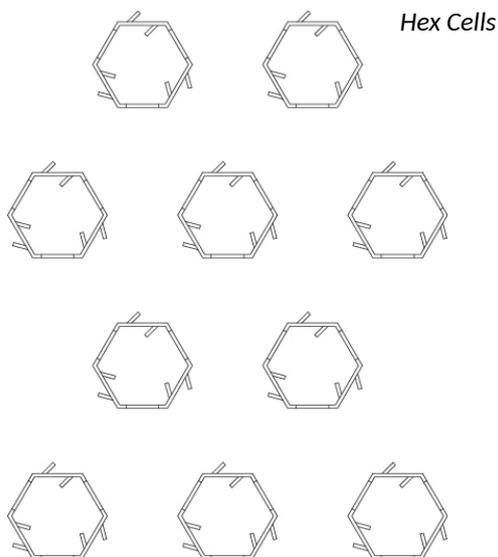
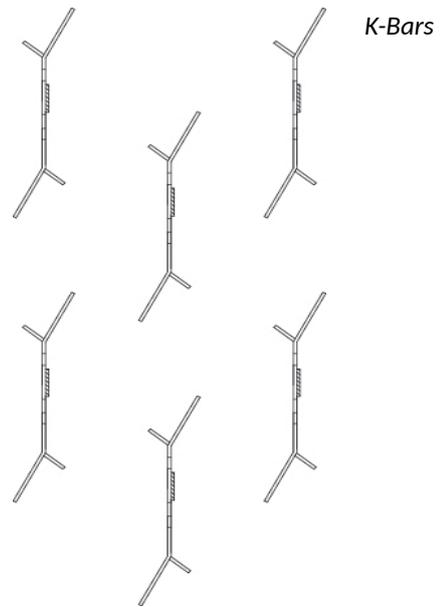
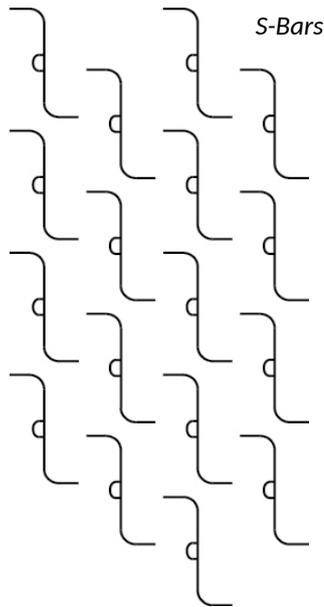


フレキシブルメッシュ

Non-Closed (Open) Cell Anchoring Systems 非閉鎖(オープン)セルシアンカリングシステム.

非閉鎖式セルアンカリングシステムは、個々の耐火セル(クッキー)の列を生成しません。耐火材は連続したシステムであり、各金属アンカーは耐火材に埋め込まれています(ライニングにフラッシュになった露出した金属部分を除く)。S-バーおよびK-バーなどが例であり、これらはいずれも六角形アンカーと呼ばれています。一部の六角形アンカーシステム(例:個別の六角形セル)は閉式セルアンカーと非閉式セルアンカーの両方の特性を持っています。

これらのタイプのシステムは、低い金属対耐火材の比率と単位面積あたりの低い溶接数を特徴としています。

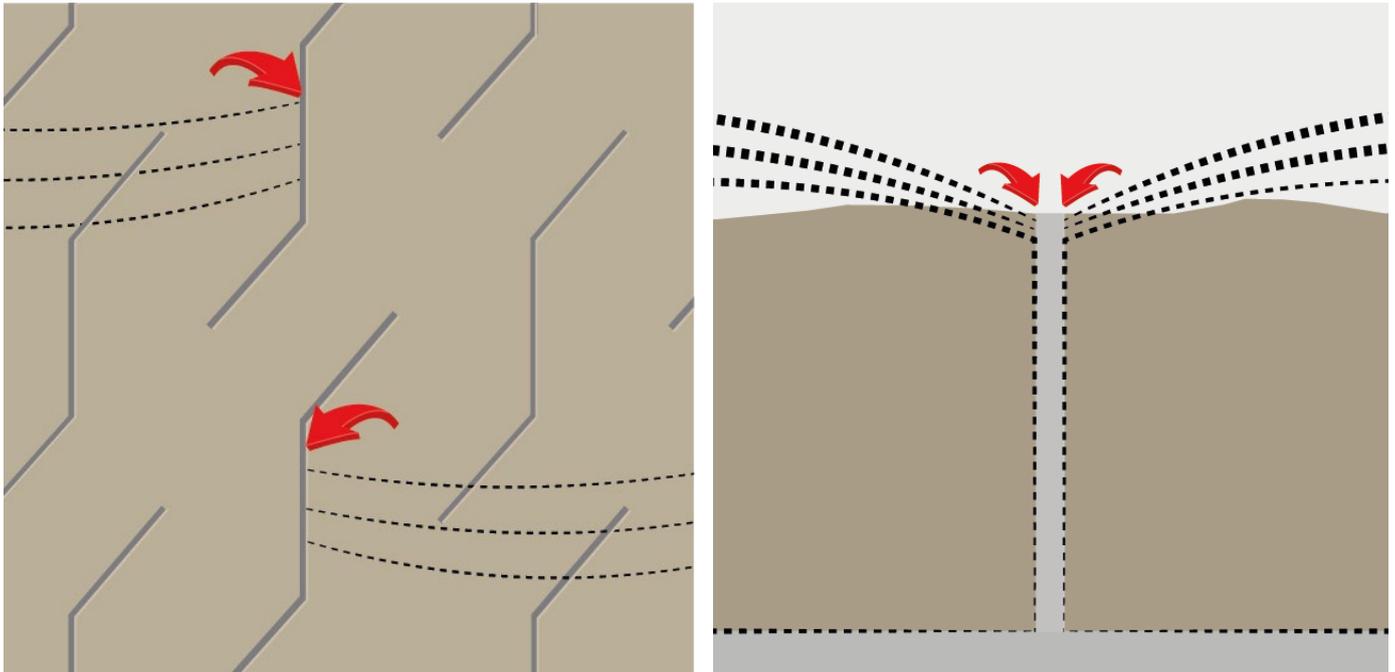


2.2 Mechanisms of Lining Bypass (耐火ライニングバイパスのメカニ)

従来のアンカリングシステムが、耐摩耗性ライニングにおいてバイパス現象を引き起こすメカニズムは、以下のようにカテゴリーに分ける事が出来ます。

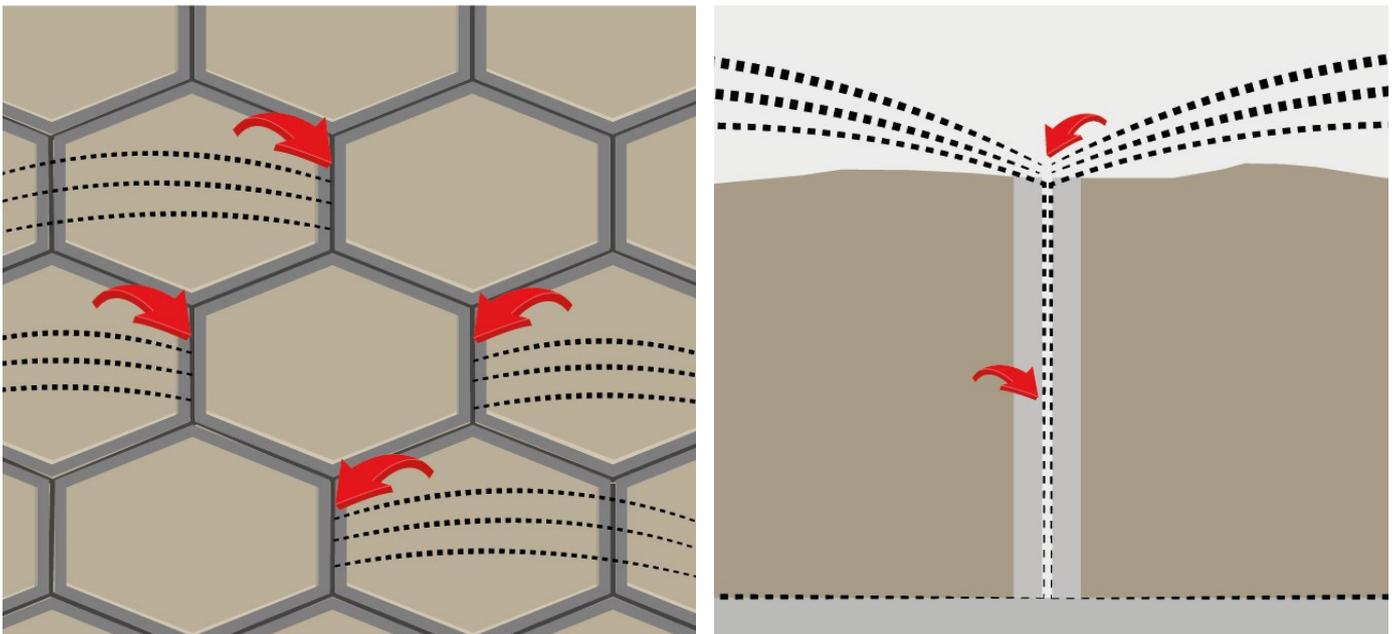
耐火材と金属アンカリングの間の隙間を通るバイパス現象

高温では、耐火材は収縮し、金属は膨張しますが、両者は異なる割合で変化します。この膨張率の違いが、耐火材と金属の界面に物理的な隙間が形成される自然な結果となります。これは繰り返される熱サイクルによってプロセスが助長されます。ヘックスメタル・ライニングでは、これらの隙間がライニング表面から容器の壁まで妨げられずに広がり、プロセスガスや液体がライニングの背後に滲み込む直接の経路を確立します。伝統的な六角アンカーも同様に、これが起こりうる領域が存在します。耐火材の不適切な施工も、ガスや液体が通過する可能性のある小さな隙間を形成することがあります。



金属アンカーのプレート間の隙間を通るバイパス

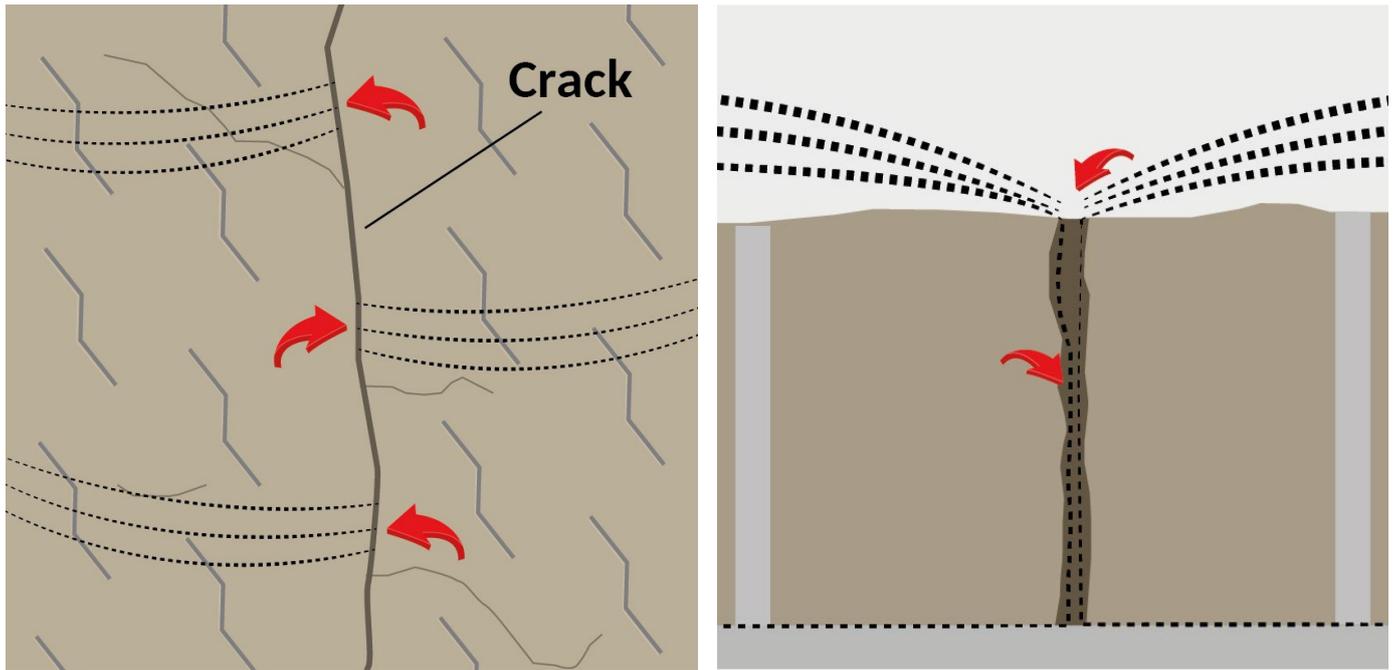
アンカーシステムが六角メタルなど金属シートで構成されている場合、時間の経過とともに、これらのシート間に隙間が形成される可能性があります。六角メタルの場合、これらの隙間はライニング表面から裏側(容器の壁)までに広がり、ライニングバイパス現象を促進する条件が自然に生まれます。



耐火材間の隙間を通るバイパス

密閉された領域内には大きな範囲の耐火材がバッチで設置されることがあります。設置された耐火材には固まるまでの時間が与えられ、その後、固まった耐火材は次に設置される領域の物理的な障壁となります。新たに設置された耐火材は固まった耐火材と結合せず、これがライニングを分節化させる原因となります。これらの箇所はコールドジョイントと呼ばれ、ライニングバイパスにつながる可能性があります。耐火材の設置時に一定のコールドジョイントは避けられませんが、ここで発生する故障メカニズムの影響を最小限に抑えるためには、コールドジョイントをデザインする際にライニングバイパスのリスクが最小限に抑えられるようにすることが重要です。

不適切に混合され、設置された、または十分にサポートされていない耐火材は、耐摩耗性材料および熱サイクリングの多くが硬直する性質により、クラックや分節化を発生させる可能性があります。これもまたバイパスの原因となります。



耐火ライニングの多孔性を通る吸収

耐火ライニングは本質的にある程度の多孔性を持っていることに注意すべきです。これにより、処理環境の一部が吸収される可能性があります。通常、この吸収は容器の壁まで達することはなく、著しい有害な影響を引き起こすことはありません。したがって、この現象はライニングバイパスとは見なされず、議論の対象とはなりません。

2.3 Repercussions of Lining Bypass (耐火ライニングバイパス現象の影響)

このセクションでは、耐火ライニングバイパスの影響と、これがコーキングおよび非コーキング環境、および閉鎖式セルおよび非閉鎖式セルのアンカリングシステムで異なる形で現れる現象について詳しく説明します。

コーキングおよび非コーキング環境

FCCは一般的に、コーキングサイドと非コーキングサイドと呼ばれる2つの主要な処理環境を持っていることで知られています。コーキングサイドは「反応器」と呼ばれる設備の一部に密接に関連しており、ここでは意図的な反応が起こり、デヒドロ生成物であるコークスが形成されます。FCCの「フルイド」部分は、リアクターサイドに存在する液体、流動化ベッドを指します。この液体がコーキング環境で最も顕著な問題、いわゆるコークスジャッキングを引き起こします。ここでは、バイパスされた液体と固体コークスがライニングをシェルから押し離す現象が起こります。



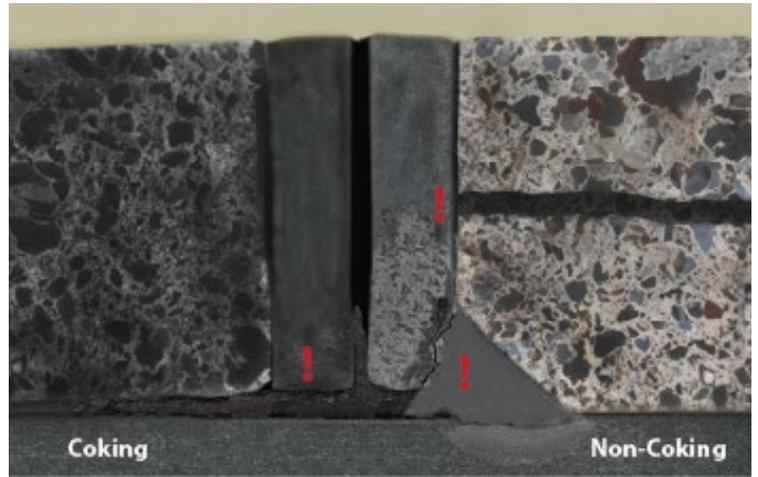
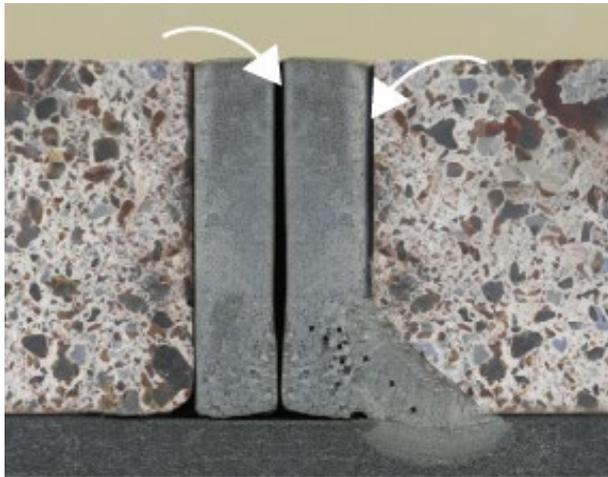
コークス形成の例。

非コーキング環境は、通常、FCCの「リジェネレーター」部分に見られます。ここでは使用済み触媒が小さなコークスのかたまりから分離され、「再生」されてプロセスで再利用されます。リジェネレーターでは、ほとんどの内部部品が明るい色の残留触媒のほこりで覆われています。小さな粒子は、リアクターサイドよりも高い摩耗性と速度をもたらします。これに加えて、より高い運転温度と低酸素環境が組み合わさることで、ライニングの劣化が加速され、アンカリングシステムに問題が生じ、運用上の問題を引き起こす可能性があります。



リジェネレーター、非コーキング環境では、厚い層の触媒の堆積が見られます。

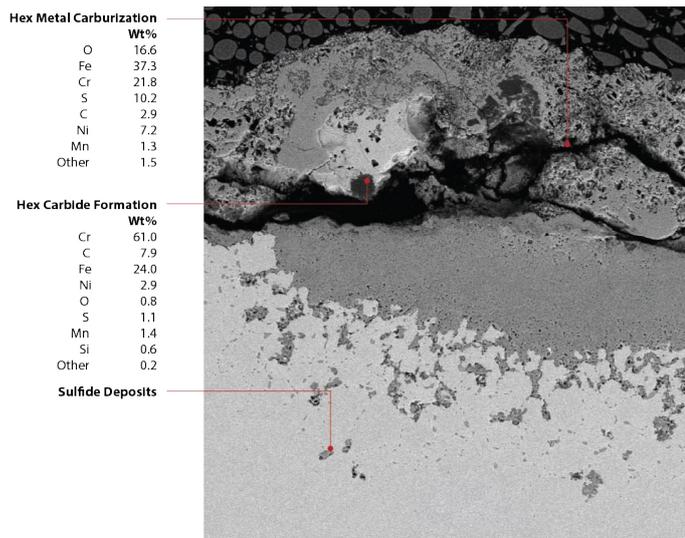
閉鎖式セルおよび非閉鎖式セルアンカリングシステムの両方が、コーキングおよび非コーキングの環境で不具合を発生させやすいことが示されています。一旦バイパス現象が発生すると、その現象は以下の画像で見られるように異なる形で現れます。



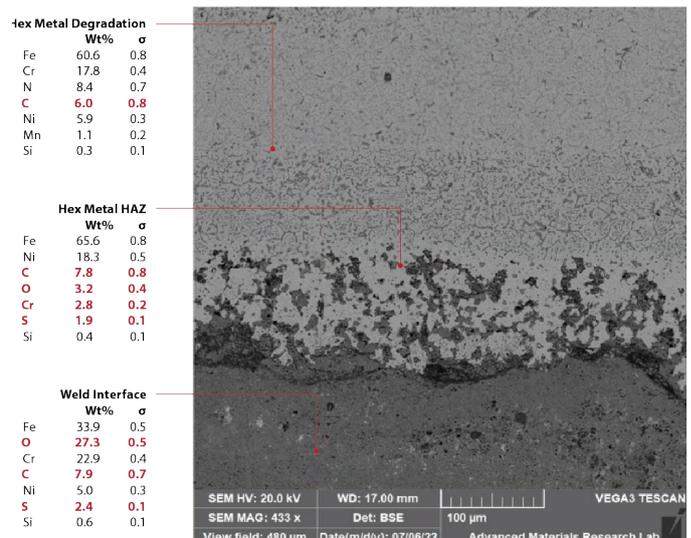
六角メタルは、耐火材の設置後に封入セルになります。アンカリングデザインと可能な設置の隙間や収縮が組み合わさり、ライニングを迂回する経路を可能にし、ライニングの背後に残ります。

コーキング環境と非コーキング環境では、設置された耐火材が異なる処理環境にさらされます。両環境のいくつかの注目すべき特徴は、コーキングサービスでの耐火材への黒い粒子の大量の吸収(いわゆる「コーキングオーバー」)と、リジェネレータ処理環境でのより高い運転温度です。

以下の画像では、各環境での不具合を起 顕微鏡で分析し、バイパスの真の影響を明確に理解するためのものです。望ましくないプロセス要素がアンカーとシェルの溶接個所に到達すると、ステンレス鋼が局所的に影響され、耐食性が低下します。試験結果は、カーバリゼーションとスルフィデーションがアンカーの最終的な不具合の段階を表しており、これは炭素および硫黄含有量、および触媒によって引き起こされます。これらの故障は、バイパス現象を許容する事により発生します。



コーキング環境で不具合を起こしたヘックスのサンプル。



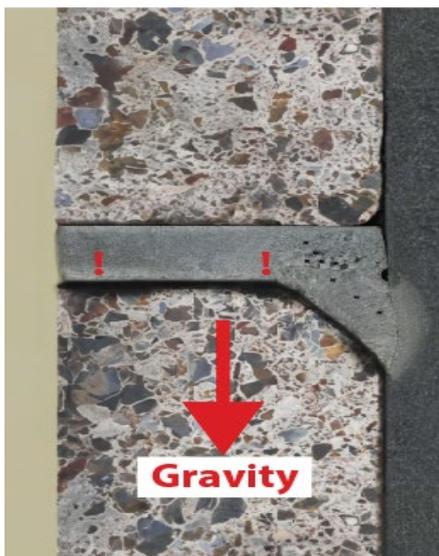
非コーキング環境で不具合を起こしたヘックスのサンプル。

閉鎖式セルシステムが最も使用され、認識されているアンカリングシステムであるにもかかわらず、その設計にはセル内の保護ライニングを有害な物質が迂回するさまざまな経路が許容されています。閉鎖式セルシステムの主な弱点は、接続された金属シートのクリンチ間に隙間が存在することです。さらに、乾燥中に耐火材が収縮することで、鋼鉄と耐火材の間に小さな隙間ができる可能性もあります。これらの隙間により、ガス、触媒、およびさまざまな処理要素がライニングの背後に流れ込み、時間とともに沈殿し、蓄積します。これはアンカーシステムだけでなく、シェルやライニング等の設備に総合的に直接影



閉鎖式セルシステムの設計上、ライニングの背後に到達する経路が許容されています。

非閉鎖式セルアンカリングシステムでは、アンカー間の距離が閉鎖式セルシステムよりも大きく、したがって単位面積あたりの耐火材の体積が増加し、アンカリングサポートが減少します。これにより、天井および側面の向きでの設置時に、重力の影響が平面で下向きの向きよりもより大きな影響を与える可能性があります。この効果はライセンス供与者の仕様でよく知られています。これは、製造環境で耐摩耗性耐火材の設置の向きを下向きに制限することで緩和されます。



側面への耐火物は施工時に重力の影響でたわんでしまう。

バイパス現象の発生原因が何であろうと、両方のアンカリングシステムでの不具合は時間の問題です。次のセクションでは、各アンカリングシステムにおけるコーキングおよび非コーキングの環境で発生する故障について詳細に取り上げます。

コーキング環境での不具合

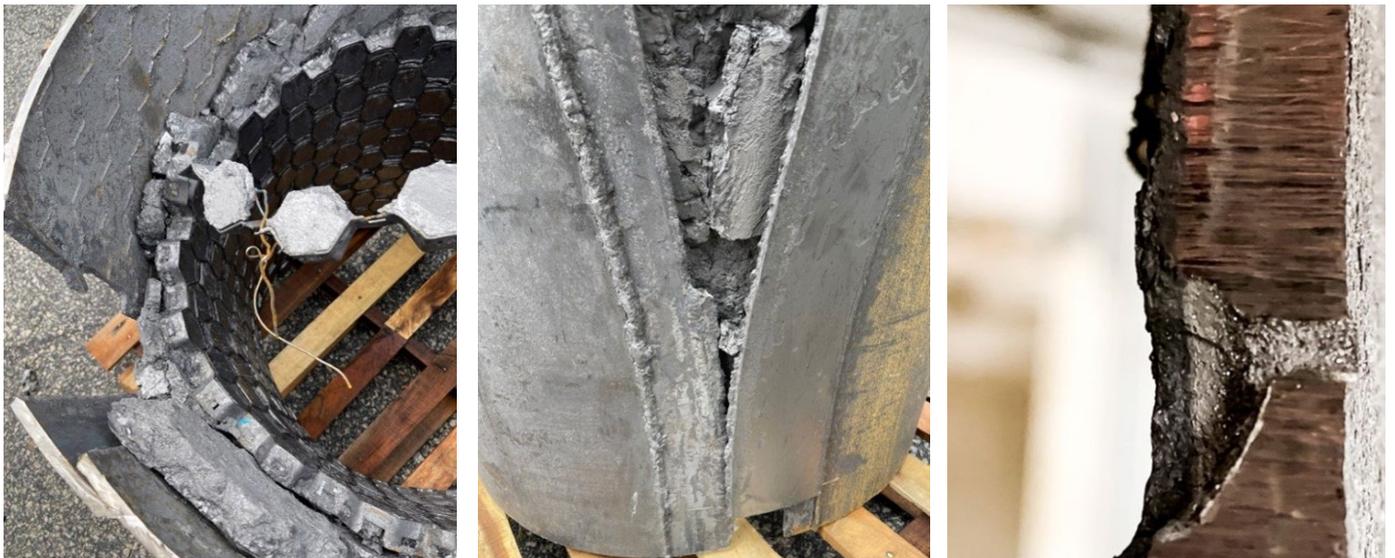
コーキング環境では、非コーキング環境と比較して注目すべき違いの一つは、耐火材の黒ずみです。耐火材の多孔質な性質は、炭素を含むガス、液体、および固体にさらされ、製品への吸収を引き起こします。この吸収により、耐火材のセルがわずかに膨張し、コークスジャッキングに寄与します。これは、殻から離れようとする溶接された金属への追加の応力です。膨張するセル内の耐火材が要因である一方で、コークスジャッキングにおいてより重要な応力の影響は、バイパス現象を引き起こしライニングの背後にコークスが蓄積される事が容易になってしまいます。



コークを吸収した状態の耐火材

事例研究: FCCリアクターサイクロン - 閉鎖式セルシステム

液体バイパスが引き起こしたコークスの蓄積が非常に大きかったため、この蓄積の継続的な形成と拡大が、ヘックスメタルをその溶接部から分離させるだけでなく、多くのコンポーネントが割れる原因となりました。



左/中央: 反応器サイクロンディップレグ、3年以内の稼働で交換が必要なもの。これはバイパスされた耐火材ライニングに起因します。右: バイパスに長時間さらされた結果、少なくとも6mmの炭化鋼シェル。

観察結果から明らかなように、耐火ライニングの背後にある厚い蓄積物の原因は、バイパス現象にあることがわかります。

- 1) バイパスにより、ライニングの背後でのコークスの形成が継続しました。
- 2) シェルは硫化と炭化作用にさらされ、その構造的な信頼性が弱まりました。²
- 3) コークスのジャッキングにより、大部分のアンカリングシステムがシェルから分離され、同時にシェル自体が破裂しました。
- 4) コークス形成要素が露出したため、感化された六角メタルで応力腐食割れが発生しました。
- 5) 不具合が大きかったため、完全な閉塞が観察されました。これにより緊急シャットダウンが必要でした。

ケーススタディ: FCC転送ライン - 非閉鎖システム

非閉鎖システムは、しばしば高い耐火材料の保持を犠牲にして、単一の内張りを実現しようとしています。クラックが発生した場合、これにより耐火材の保持が損なわれる可能性があります。これらの内張りでのコーキングは懸念されており、吸収されたコークが耐火材に更なる応力を加えます。このプロセスにより、予測不可能なクラックが形成され、バイパスが増加します。相互に連結されたメッシュが存在しないため、耐火材料は完全にはずれ、孤立したホットスポットや腐食が引き起こる可能性があります。

また、このケースでは、バイパス現象が不具合の根本原因として機能していますが、不具合は予測不可能なクラックが形成された後に発生します。

観察から明らかなように、バイパス現象によりライニングの背後に厚い堆積物を形成した事が根本原因であったことが確認されました。

1. 熱サイクル、コークの吸収、およびクラック伝播バリアがないことにより、制御されていないクラックが観察されました。この時点から、バイパスメカニズムが発生し始めます。
2. バイパスによって、コークはライニングの背後に継続して蓄積されます。耐火材のコークジャッキングにより、耐火材の塊がシェルや他の耐火材から分離する可能性があります。
3. 完全に露出した鋼材はホットスポットを形成し、蒸気冷却が必要な場合があります。
4. 完全に露出した鋼材のため、腐食が速く進行し、緊急の漏洩や補修、あるいはシャットダウンが必要となる可能性があります。

非コーキング環境の不具合

コーキング環境と比較して、非コーキング環境は通常、より高い処理温度、還元雰囲気、およびより速い粒子流速を特徴としています。これらの要因は通常、より多くの乱流を引き起こし、コーキング環境では一般的でないさまざまな現象につながります。ここでの耐火材は通常「焦げたように」見え、全体的に白く見えます。

低酸素環境のため、ステンレス鋼のアンカリングシステムは腐食抵抗が低下する可能性があります。これは特に内張りの背後で顕著であり、ここではガスが迅速にかつ妨げられることなく移動します。

非コーキング環境で主に発生するもう一つの注目すべき現象は、耐火セルのホットフェイス側が分離する事です。これは積層された耐火材にも同じような現象が起こります。この現象は「ビスケティング」と呼ばれ、ビスケットに似ているためです。



部分的に欠落したライニング



耐火材のはがれ落ちを「ビスケティング」と呼びます

ケーススタディ: FCCリジェネレータサイクロン - クローズドセルシステム

低酸素処理環境でのガスバイパスは、このケーススタディで見られるように、ヘックスメタルとそのシェルへの溶接個所に対して急速な劣化を引き起こす可能性があります。さらに、このリジェネレータサイクロンは、カーボニゼーションによるシェルのさまざまな場所で損傷を受け、小さな窪みとして現れました。重大な触媒の損失も発生しました。緊急シャットダウンが必要で、シェルの修理とライニングの完全な交換が必要でした。



リジェネレータサイクロンのヘックスメタルの裏側



リジェネレータサイクロンのヘックスメタルの表側



ビスケティングとヘックスメタルの剥離

ここでは特にライニングの裏面が表面よりも影響を受けていたことが注目されました。この不具合はバイパス現象無しでは発生しえなかった可能性があります。

- 1) カーバーライジングおよびサルファイジング要素、および触媒がのライニング背後に蓄積し、アンカリングシステムおよびシェルを劣化させます。
- 2) 鋼の感作化が発生し、ヘックスメタルおよびその溶接部がシェルから分離されるまで劣化するという連鎖反応が発生します。
- 3) 耐火材および部分的なヘックスメタルがはがれ、剥がれ、ビスケティングします。
- 4) ヘックスメタルシートがシェルから分離し、シェルを露出させます。この時点で1日に50トン以上の触媒損失が発生しました。
- 5) 容器保護層(ライニング)の不在により、容器およびそのサポートに損傷が発生しました。緊急シャットダウンをすることで、災害は回避されました。

ケーススタディ: FCC ライザー - 非閉鎖セルシステム

コーキング環境の非閉鎖セルシステムと同様に、このようなオープンシステムの単一の内張りは、耐火材の膨張および収縮の挙動を十分に吸収することができません。

非コーキング環境では、これが小さいながらも頻繁に発生する予測不可能なクラックの形成として現れる傾向があります。これらのクラックが一旦形成されると、ガスバイパスは避けられず、孤立したホットスポットの形成に大きく影響します。

右の画像は、ライザーライニングのものでほとんどの小さなクラックがさらに広がらなかったことがわかります。ただし、大きなクラックは暴走し、鋼の外殻が歪みました。幸運なことに、重大な事故は発生しませんでした。ライザーライニングは耐火物とアンカリングのほぼ30%が交換される必要がありました。再び、耐火物のバイパス現象が修理の必要な根本的な原因でした



クラックが暴走したライニング

2.4 Operational Impact of Lining Bypass(バイパス現象がもたらす操業へのインパクト)

ライニングに対してのバイパス現象に起因する損害は、内部構成要素および全体のプロセスに混乱を生じさせることにより、運転コスト、修理作業、およびメンテナンスに重大な影響を与えます。過去20年間で、エンドユーザーの間で設備容器的信頼性に対する強い懸念があり、安価な短期修理よりも結局はより高いコストをかける事になっており長期的な補修戦略の重要性がますます認識されています。

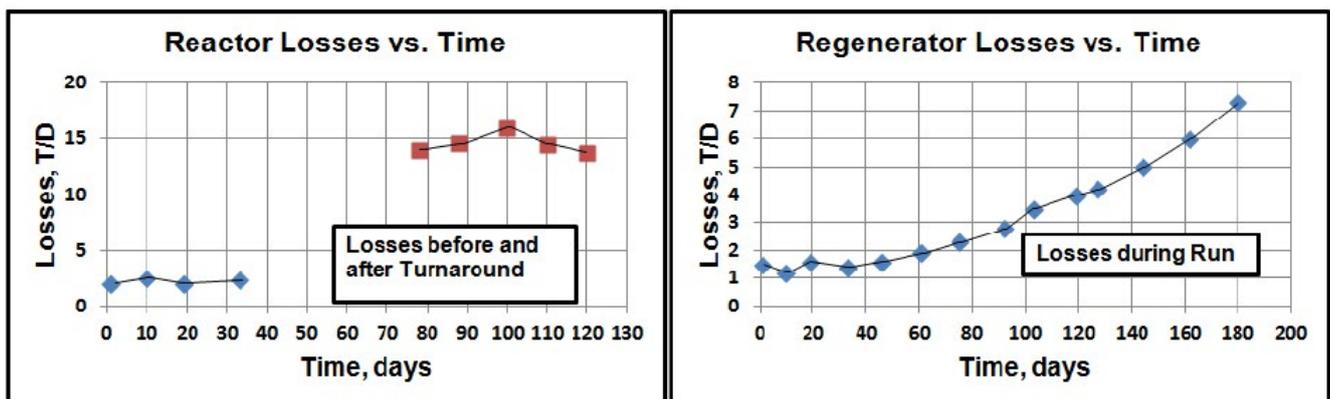
4-6年の運転を想定して設計された設備容器は、計画された製品生産量の予期せぬ中断や効率の低下なしにこの期間を達成できるように保守されるべきです。予測不可能な出来事は、直接的にその製油所や顧客にとって設備容器的戦略的および経済的な価値に影響を与えます。

例えば、1トンあたり最大3,000米ドルの触媒損失が発生すると、これは直接的に原価対利益比率と製品生産量に影響を与えます。これらの損失は、サイクロン環境での非効率的で意図しない処理動作によってしばしば発生し、製油設備の信頼性に直接影響を与えます。年間基準で、これらの追加コストは、容器およびそのライニングのサイズと年数によりますが、1日あたり1トンの触媒損失で100万米ドル(1億円以上)から25トンの触媒損失で2,500万米ドル(25億円以上)まで幅広く、早期のシャットダウンが、必要となる可能性があります。処理された製品の市場価値と製油設備の1日あたりのバレル出力を考慮すると、予期せぬシャットダウンによる失われた利益は1日あたり追加で2,000~5,000万米ドルに達する可能性があります。

全体的に言えることは、検査が難しい耐摩耗ライニングの予測不可能な挙動が、高コストな運転の非効率化と1バレルあたりの生産コストの増加につながる可能性があるということです。これらの非効率化は、早期かつより頻繁な修理につながり、構成要素の構造的信頼性の損失を引き起こす可能性があります。その結果、運転サイクルが完了する前に交換が必要となるかもしれません。これらすべてが、より高いコストと低い利益につながります。

Cyclone Plugging

Plenum Crack



2019年にBASFが行った、反応器および再生器環境におけるサイクロンの性能に関するケーススタディ³

左側のグラフは、反応器環境内での触媒損失の例を示しています。計画的なターンアラウンド中では、耐摩耗性の六角メタル製ライニングはホットフェイス側からのみの検査となりました。ライニングは良好な状態に見え、修理は必要ないと判断されました。しかし、容器の運転シーケンス中の熱ショックと、六角メタルの観察されていない弱くなった溶接部、バイパス現象によりライニングの背後に蓄積されたダメージにより大規模なライニングの脱落とそれに続くサイクロンの詰まりが発生しました。この流れの遮断は、重大な運転上の非効率を引き起こしました。右側のグラフは、再生器環境内での触媒損失の例を示しています。ライニングが徐々に劣化した事により耐火物が局所的に脱落し、プレナム・シェルが露出しました。これにより、残りのライニングが抵抗となり効率の低下が生じ、同時にシェルの急激な劣化が進み、最終的には破損しました。この影響は、触媒損失に影響しました。これはプロセスの効率を著しく低下させ、1バレルあたりの生産コストを上昇させます。

Chapter 3 – Mitigating Lining Bypass (ライニングパイパスの軽減)

前のセクションでは、ライニングにおけるバイパス現象の影響とそれが耐摩耗ライニングの従来のアンカリングシステムとの関連について説明しました。これらのシステムに関連する多くの文書化された不具合があるにもかかわらず、これらは広く使用され、指定されています。このセクションでは、従来のアンカリングシステムの利点と欠点を再評価し、その欠点を排除しながら利点を維持する解決策を探ります。

3.1 Closed Cell Systems (閉鎖式セルシステム)

利点:

- ・ 暴走クラックは閉じられたセルの境界内に抑制されます。
- ・ 連結されたメッシュは、初期の個々の溶接の不具合がシステム全体の故障を引き起こす事を遅らせることができます。
- ・ 耐火物の施工時の適切なセルサイズおよびサービス中の耐火物の保持に対する最適なクッキーサイズ。
- ・ 耐火物の取り付けが容易。
- ・ 幅広く入手可能。
- ・ ほとんどの耐火物の施工作業者にとって馴染みがあります

欠点:

- ・ 設計上、連続した単一の一体型保護を作り出すのではなく、むしろ分節化された複数の孤立したセルのセットを作り出します。
- ・ 金属対耐火物の比率が高い。これにより、耐火物の存在が低く、金属対耐火物の接合部が多いため、より保護性の低いライニングになります。
- ・ 金属ストリップ間または金属と耐火物の接合部間のどちらかに、容器の壁に達する物理的なギャップ(隙間)が生じやすく、ライニングバイパス現象を引き起こす可能性があります。
- ・ 労力を要するアンカーの取り付け。
- ・ 曲面や狭い空間への施工が複雑。
- ・ 効果的に検査するのが難しい。
- ・ 継続的な溶接の不具合がプロセスフローを阻害する事により緊急シャットダウンを引き起こす可能性があります。
- ・ 一つのエリアでのプロセスフロー乱れが、その連結性のために別の領域に悪影響を与える可能性があります。

3.2 Non-Closed Cell (Open) Systems (非閉鎖システム)

利点:

- ・ 設計上の一体型保護。
- ・ 迅速なパッチ修理に有用。
- ・ 個々のアンカーは、取り付け前に特別な加工が必要ありません。
- ・ 個々のアンカーの故障は通常、プロセスフローの阻害を引き起こしません。
- ・ アンカーの取り付けが容易。
- ・ 市場で豊富な選択肢があります。

欠点:

- ・ 金属対耐火物の比率が低い。これにより、耐火物のライニングに対する不十分なアンカリングサポートが提供される可能性があります。
- ・ 金属と耐火物のインターフェースに物理的なギャップが生じやすく、容器の壁に達し、ライニングバイパスを引き起こす可能性があります。
- ・ 暴走クラックは予測不可能なバイパスを引き起こします。
- ・ 暴走クラックは大きな耐火物のかたまりの剥離を引き起こします。これらの剥離されたかたまりは局所的なホットスポットを作り出し、それがシェルの変形と漏れを引き起こす可能性があります。
- ・ 時間の経過とともに、クラックやギャップの形成により、一体型の保護が徐々に分節化された複数の箇所の保護に変わります。
- ・ アンカーの取り付けピッチが広いため耐火物施工時に厚さの不均等を招き、運転中の耐火物の保持に問題を引き起こします。
- ・ 施工時、耐火物を押し込むため追加の物理的なバリアが必要です。その為、特に広い範囲で多くの冷間接合が発生します。
- ・ 専有製品(特許製品)であり、事例が少ない可能性があります。
- ・ 新しい仕様と検査基準、取り付け方法のトレーニングが必要な場合があります。

3.3 Past Mitigation Efforts

The industry has made the following efforts to enhance closed cell systems.

a) Increasing refractory height above the anchoring system creating a top monolithic layer.

In this case, the refractory height was double the hexmetal height (1" hexmetal, 2" refractory). The 1" top layer experienced spalling due to lack of anchorage and soon abraded. This caused chunks of unanchored refractory to detach.

b) Altering design of hex metal to allow more refractory through to prevent pathways of bypass.

Several design alterations were introduced to the market with the aim of reducing the metal-to-refractory ratio. However, these concepts underestimated the ability of gases and liquids to penetrate the inevitable gaps created by an interlinked system, even though minimized.

Both efforts failed to achieve enough success for widespread adoption. However, a new type of system can be proposed that incorporates the beneficial features of both closed cell and non-closed cell systems.

3.4 Semi-Closed Cell Anchoring System

Conventional anchoring systems are generally over-anchored or under-anchored. A so-called semi-closed cell anchoring system should have an optimum balance between anchorage and refractory. In addition, a semi-closed cell anchoring system should mimic the shape and effectiveness of closed cell anchoring enclosures while allowing for continuous refractory flow similar to non-closed cell anchoring systems.

This system should feature the advantages while mitigating the disadvantages of both closed cell and non-closed cell systems:

- Optimum cookie size for compacting during refractory installation and refractory retention during service.
- Optimum metal-to-refractory ratio ensuring adequate anchoring for structural support and enough refractory material to maintain the monolithic integrity.
- Lasting monolithic protection throughout the lining.
- Not prone to the formation of gaps with a direct pathway from the lining surface to the vessel wall, thereby mitigating bypass.
- Not prone to runaway cracking, due to cracking being contained within the boundaries of the semi-closed cell.
- Potential localized deterioration of the lining does not affect surrounding areas due to the independent behavior of semi-closed anchoring.
- Individual anchor failures typically do not cause flow disruption.
- Provides predictable wear behavior.
- Ease of anchoring installation.
- The anchors can be welded at a single point or at multiple points.
- Individual anchors do not require special modification or bending prior to installation.
- Ease of refractory installation.
- Refractory flow and compaction are observable within each cell due to flow-through.
- During refractory installation there is little to no need for temporary molds or barriers to compress the refractory.
- Useful for both patch repairs, relines and new equipment.

3.5 Considerations

Any alternative anchoring system poses risks that need to be considered with the aim of achieving the optimum design for abrasion-resistant linings. Some key considerations are as follows.

- **Refractory Cohesion**

How can bypass be mitigated in a cohesive monolithic lining compared to a segmented multi-lithic lining, especially in areas with unavoidable cold joints?

Desired Performance: The refractory should show no signs of direct bypass of liquid or gas. Due to isolated pockets of compacted cold joints, it should not show significant travel of liquid or gas behind the lining.

- **Refractory Structural Integrity**

How will the abrasion-resistant refractory behave as a reinforced section of monolithic compared to conventional segmented closed cell refractory under loads encountered during service?

Desired Performance: The refractory should show a significantly increased resistance to separate from its anchoring system and from the shell when exposed to the same load.

- **Mechanical Anchoring Integrity & Design**

Is the anchor strong enough after installation, while allowing sufficient continuity of refractory?

Desired Performance: The strength of a welded semi-closed anchor should exceed that of an individual weld in an interconnected hex cell to mitigate a single weld failure.

In addition to the considerations mentioned above, numerous other factors might need to be addressed, exceeding the scope of this white paper. When evaluating any alternative solution, compatibility with the vessel's design, unique processing conditions, and other potential complexities of the application must be assessed.

In the next chapter, the considerations regarding refractory cohesion and structural integrity are further discussed because they are closely related to bypass and its repercussions.

Chapter 4 - Testing & Results

To address the considerations of the previous chapter and evaluate the effectiveness of semi-closed cell systems as opposed to closed cell systems in minimizing lining bypass and ensuring optimal substrate protection, penetration tests and pull tests were conducted. The objective of the penetration test was to evaluate lining bypass in both systems and to demonstrate that semi-closed cell systems are less conducive for bypass compared to closed cell systems. This evaluation took into account the impact on cold joints in both scenarios.

The pull tests were conducted to evaluate the strength of the lining in semi-closed cell systems and closed cell systems.

The following conditions were taken into consideration for the test setup:

- Anchors were installed with the same pattern as industry recognized hex metal (2" cookies).
- Refractory materials used are standardly recognized by petrochemical end-users and licensors.
- Refractory materials were installed by experienced refractory installers.
- Refractory materials were cured and fired according to manufacturers' specifications.

4.1 Penetration Test

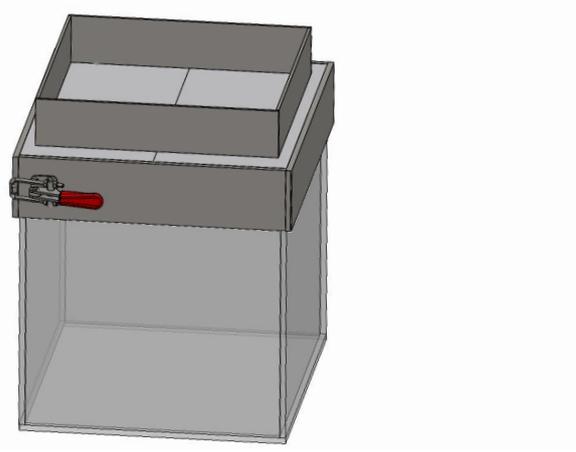
The test setup sought to simulate the impact of FCC process fluids on various abrasion-resistant refractory linings, showing a semi-closed cell anchoring system (SILICON SpeedHex® 3) and a closed cell anchoring system (traditional Hexmetal), with a focus on cold joints. Although duplicating exact FCC process conditions, with typical temperature and pressure values, proved impractical, the aim was to assess the potential occurrence of bypassing under normal ambient conditions. To achieve this, water colored with black ink was selected as the fluid to detect any signs of bypass behind the lining.

Sample panels with semi-closed and closed anchoring systems, incorporating various types of industry-standard refractories, were utilized. Panels with the semi-closed cell system had its refractory material installed in two phases—half of the panel received refractory installation, was terminated with refractory backing clips, underwent a complete dry-out cycle lasting approximately 24 hours, and then the remaining refractory was installed in the other half. This deliberate process was employed to purposely create a cold joint. Panels with the closed cell system were also installed in two phases, with the hex cell in this case forming a hard barrier for installation of the other half of refractory. After the dry-out cycles were completed, 1 liter of ink-colored water was poured over each sample panel, after which it was observed for 10 minutes.



Semi-closed cell system refractory installation with an intentional cold joint.

Click [here](#) for the 24 hour dry-out timelapse video.



Penetration Test Setup, liquid placed on top of lining, captured in container below.
Apple iPhones used to capture videos of the process.

Result Summary

Sample Type: Semi-Closed Cell System



Before Test



After 90 Seconds



After 3 Minutes



After 10 Minutes

Observations

Minor absorption of the test fluid through and reaching behind the refractory lining was observed. No penetration or lining bypass was observed within the cells or at the cold joint after 10 minutes.

Sample Type: Closed Cell System



Before Test



After 10 Seconds



After 20 Seconds



After 90 Seconds

Observations

Penetration or lining bypass was observed within seconds in the cells and at metal joints with all test fluid flowing through. This may be attributed to cold joints formed between the refractory material and the closed cell anchoring system as well as occasional gaps at the metal joints. The tests concluded within approximately 90 seconds, as the test fluid had fully penetrated the lining by that time.

The results of the penetration tests demonstrated two phenomena:

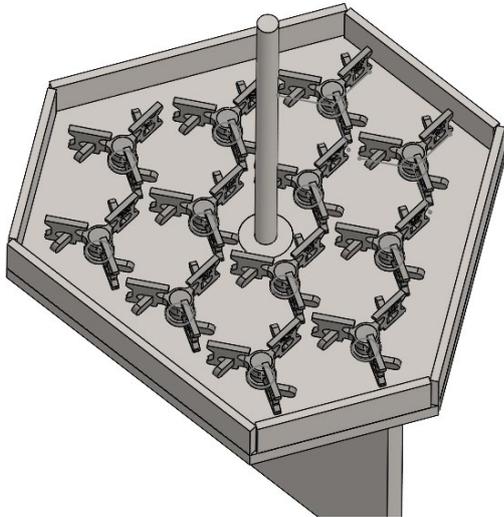
- Absorption of liquid in the refractory (observable by the light discoloration of refractory).
- Circumvention of the lining by the liquid via direct bypass to the shell (observable by the dark buildup behind the refractory and passing through the plastic backing).

It was evident that the semi-closed cell anchoring system provided superior protection against lining bypass by showing no signs of direct liquid bypass, as opposed to the closed cell anchoring system, where significant fluid bypass occurred within seconds.

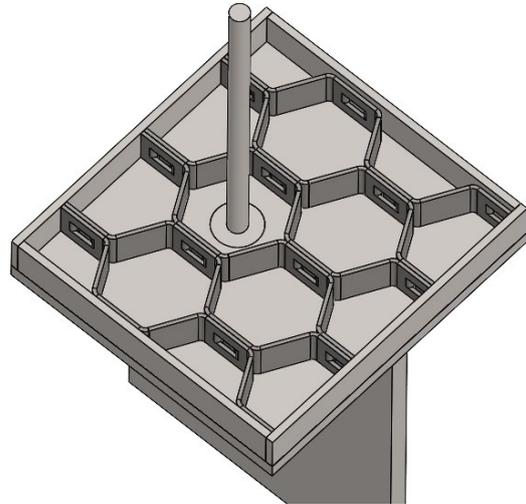
Although absorption occurred in the refractory materials for both systems – which is to be expected in typical processing environments – the time it took for the initial signs of absorption to manifest in the semi-closed system suggests that in actual processing environments this would not pose any concern. This is attributable to the absence of pathways that would allow fluids to bypass, as seen in closed-cell systems.

4.2 Pull Test

Various sets of semi-closed and closed cell anchoring systems, each featuring different industry-standard abrasion resistant refractories, were utilized. A pull pin was freely inserted into a cell to assess the force needed to extract a closed refractory cell (cookie) from the lining.



Semi-closed cell system before refractory installation.



Closed cell system before refractory installation.

Result Summary

Sample Type: Semi-Closed Cell System, After Pull Test



Observations

On average, approximately 42.9 kN of force was required to pull out a cookie.

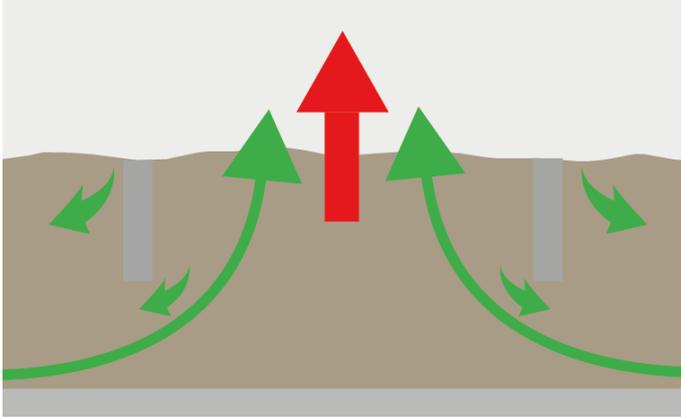
Sample Type: Closed Cell System, After Pull Test



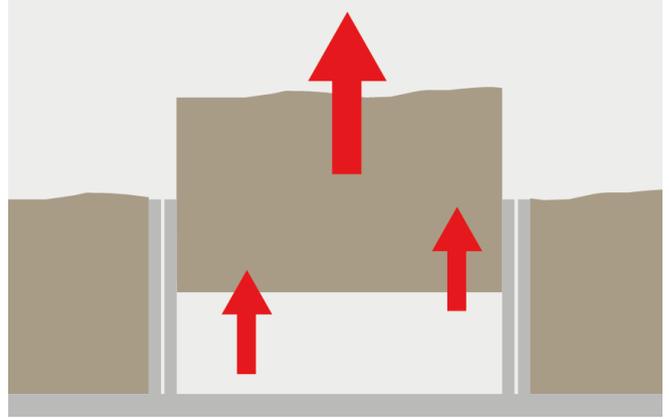
Observations

On average, approximately 7.6 kN of force was required to pull out a cookie.

The pull test results revealed that the semi-closed cell system showed a significant difference to the closed cell system in retaining abrasion-resistant refractory material. This is attributed to the design of the semi-closed cell system, with embedded anchors in a monolithic refractory lining providing robust support and resistance against forces that could cause refractory separation from the anchoring. Refer to the illustration below for a visual representation of these forces in both systems.



Representation of exerted forces during pull test in semi-closed cell system.



Representation of exerted forces during pull test in closed cell system.

Chapter 5 - Conclusion

Refractory lining bypass, particularly in abrasion-resistant linings for Fluid Catalytic Cracking (FCC), poses a significant and expensive challenge for the industry. The limitations of traditional closed cell and non-closed cell anchoring systems, for example, hex metal and its inability to create a continuous monolithic lining, highlight their vulnerability to lining bypass. Consequently, this creates a potential for costly operational disruptions and premature structural failures.

The transition to a semi-closed cell system, such as the demonstrated SpeedHex® system, emerges as a reliable and strategic solution. This alternative has been supported by conclusive testing affirming the effectiveness in mitigating lining bypass and preserving refractory material, thereby enhancing the efficiency, safety, and long-term sustainability of petrochemical processing equipment

Sources

- 1 - Sadeghbeigi, R. (2020), Fluid Catalytic Cracking Handbook – An Expert Guide to the Practical Operation, Design, and Optimization of FCC Units (Fourth Edition)
- 2 - Jerry Wilks (2010), Damage Occurring in FCC Hexmesh Systems – Refcomm Galveston 2016
- 3 - Jason Goodson, Joe McLean (2019), Catalysts Losses and Troubleshooting – Refcomm Galveston 2019

Contributors

Jerome Garot

Sr. Project Manager / RAW Specialist

Danielle Garot

Head of Engineering

Henry Wilson

Technical Product Manager

Koen van Mil

Engineer

For any questions related to this white paper, please contact jerome.garot@silicon.nu .

SILICON is a metal fabrication company, designing and manufacturing a wide range of specialist heat-resistant anchors for use in the petrochemical, cement, incineration, steel, power industries.

SILICON Headquarters

Monsterseweg 2
2291 PB Wateringen
The Netherlands
T +31 (0) 174-225522
info@silicon.nu

www.silicon.nu

**SILICON Rapid Arc Welding
Contracting and Services**

7842 S, Cypress Circle, Reserve M,
Cedar Pond Industrial Park,
Humble TX, 77396
T +1(832) 762 50 66
info@silicon-usa.com

SILICON Asia Co. Ltd.

Nisihumura No.2 Warehouse,
55- 7 Chigusa-Cho, Hanamigawa-Ku,
Chiba-Shi, Chiba, Japan 262- 0012
T +81-70-8383-9253
info@silicon-asia.com