REVAP

—クヴァナ黒液濃縮装置における蒸気再循環システム—

クヴァナパルピング株式会社 中 村 二 郎

REVAP

—Vapour Recycling System in Kvaerner Evaporation Plant—

Jiro Nakamura

Kvaerner Pulping KK

For the final concentration of the black liquor a special system have been developed, the so-called “REVAP” vapour recycling system. This system is especially beneficial when evaporating black liquor to high solids as it improves the heat transfer rate.

Black liquor of high dry solids have a high viscosity, which affects the heat transfer in evaporators. With “REVAP” vapour recycling there is a possibility to improve the heat transfer in falling film evaporators. “REVAP” vapour recycling is a system where a vapour flow shears the falling liquor film, and thereby the heat transfer coefficient of the film is improved.

1. はじめに

エバポレーションシステムでの黒液の高い固形分濃度への濃縮は回収ボイラーの操業において

- ・処理能力の増加
- ・大気汚染物質放出レベルの低下
- ・熱効率の改善
- ・安定化した火炉の運転

を達成、改善させるため大変重要であり、最近では80%以上の非常に高い固形分濃度への濃縮も可能となってきた。

クヴァナは60年以上もの間パルプ業界にエバポレーションシステムを納入してきたドイツ Lurgi 社の技術を1992年に取得し、以後その技術をさらに開発、

向上させてきた。図1にクヴァナエバポレーターの本体図を示す。

REVAP 蒸気再循環システムは黒液の最終濃縮のために開発されたシステムであり、蒸気の流れによってフォーリングフィルムをせん断変形させることにより熱伝達率を向上させるシステムである。

パイロットプラントで非常に高い固形分濃度へ黒液を濃縮させることが達成され、蒸気の流れによるフォーリングフィルムのせん断変形効果による熱伝達の大幅な改善が証明された。

本稿では最近の傾向である75%以上の高い固形分濃度への濃縮に対し、優れた効果を発揮するREVAP 蒸気再循環システムについてテスト結果をふまえて紹介する。

図 1 クヴァーナエバポレーター本体図

2. 背 景

黒液の非常に高い固形分濃度への濃縮はその黒液の粘度によって制限される。粘度は高固形分濃度の黒液では非常に高くなり、熱伝達率に影響を与えるため総括伝熱係数（U 値）を改善させるための技術が必要となる。1つの方法として黒液温度を高めることにより粘度を低下させる方法があるが、これらはある範囲に制限される。これに対し、REVAP 蒸気再循環システムではコンセントレーターでのチューブ内部の蒸気の流れを増加させることにより U 値を促進する。75%以上の固形分濃度への濃縮、特に蒸気再循環を採用した濃縮についてはごく一部でのみ発表されており、それによると熱伝達係数は 50~70 m/s の流速で倍になるが、このような高い流速は蒸気再循環を採用したエバポレーションシステムでは一般的ではない。

クヴァーナが取得した Lurgi 社の蒸気再循環システムでは蒸気流速に関する条件に制限があり、今まで蒸気再循環を採用したエバポレーションシステムは 75%以下の固形分濃度に制限されていた。

それゆえ、クヴァーナは蒸気再循環システムのための条件をより広く検討するプロジェクトを開始し、パイロットプラントでの様々なテストが実施された。

3. REVAP 蒸気再循環システム

REVAP 蒸気再循環システムでは、図 2 のように 3 缶または 4 缶のコンセントレーターにおいて、1つの蒸発缶から発生したフラッシュ蒸気が他の蒸発缶の液側頂部に供給され、そしてこのフラッシュ蒸気が液と一緒にチューブ内を流れる。そこでフォーリングフィルムがこのフラッシュ蒸気によりせん断変形され、このせん断変形によりフォーリングフィルムでの乱流を多く起こし、それによりフィルムの熱伝達係数が改善される。

Lurgi 社の蒸気再循環システムでは、図 3 のように 1つの缶からのフラッシュ蒸気は洗浄中でない残りの 2 缶へ再循環フラッシュ蒸気として分割供給されるため、チューブ内のフラッシュ蒸気の流速はあまり大きくとれなかった。これに対し、クヴァーナは図 4 のように再循環フラッシュ蒸気を全ての缶を通して液と平行に流すように改善した。このことは最初の蒸発缶からのフラッシュ蒸気が全ての蒸発缶を通り、最後の蒸発缶に達するとより高いフラッシュ蒸気流量が得られることを意味する。蒸発缶の 1つが洗浄中の時もフラッシュ蒸気はこの缶を通して流れ、フラッシュ蒸気の量を維持する。この新しい REVAP 蒸気再循環システ

図 2 REVAP 蒸気再循環システム

図 3 Lurgi 社の蒸気再循環システム

図 4 クヴァナの REVAP 蒸気再循環システム

ムにより、最も濃度の高い液がそれ以下の濃度の液よりフラッシュ蒸気によるせん断変形効果が大きくなる。フォーリングフィルムのこのせん断変形は U 値に

写真 1 チューブ内のフォーリングフィルム

影響する。フォーリングフィルムは波形になっているが、せん断変形によりちょうど風によって波が大洋上に発生するようにフォーリングフィルムにより大きな波を形成する。写真 1 に砂糖水溶液を使ってチューブ内に 15 m/s の流速でエアを吹き込んだ場合と、エアを吹き込まない場合を表す。これによりフォーリングフィルム上に、より大きな乱流が生じ U 値を改善する。

また、チューブ壁面の湿度割合はこのフラッシュ蒸気の流れにより壁面全体に液を接触させて改善される。湿度割合が不十分な場合、液は不均一に濃縮され乾燥部分が発生し、スケーリングの原因となるが、REVAP 蒸気再循環システムと共に図 5 のシングルフルコーンノズルによる黒液分配システムにより湿度割合は大きく改善される。この黒液分配システムは黒液を均一に分配することができるため非常に信頼性が高く、またノズルは大きな開口と広い流路をもつため

図 5 黒液分配システム

詰まりをなくし、分配板が不要であるので保守、点検が容易である。ノズルを使用した黒液分配システムが REVAP 蒸気再循環システムでの流入するフラッシュ蒸気によって影響を受けることはほとんどない。

4. パイロットプラント

パイロットプラントは5m長さで内径49mmのチューブ20本を内蔵した蒸発缶1缶からなり、フラッシュ蒸気の流れを得るために循環パイプを設けており、蒸気エジェクターにより循環させている。また、液の循環パイプおよび生蒸気圧力、液側のフラッシュ蒸気圧力、エジェクター用蒸気圧力、黒液供給用のコントロールバルブが設置されている(図6)。

パイロットプラントはスウェーデンの Skoghall 工場に設置されており、中圧蒸気と55%濃度の黒液が供給され、固形分濃度、有効温度差、液温およびチューブ内フラッシュ蒸気流速のいずれかを変化させてテストされ、広い範囲でこれらの運転要素の変化による濃縮の状態を検討した。

全てのテスト運転ではシステムが安定した状態になるまで運転され、その後U値、圧力損失等の貴重なデータが記録された。システムは詰まりの無いことを確認するために定期的に洗浄され、従ってU値はきれいな伝熱表面に対しての値であると考えられる。

図6 パイロットプラント

5. テスト結果

図7にU値と固形分濃度の関係を表す。U値はフラッシュ蒸気を循環させない場合、固形分濃度70%近辺より急激に低下し、80%近辺で100 w/m², °C位の非常に低い値まで低下した。中程度のフラッシュ蒸気流速で再循環させた場合には80%近辺で約600 w/m², °Cまで改善され、また、より高い流速で再循環させた場合には、約1,100 w/m², °C程度にまでU

図7 U値と固形分濃度

値は向上した。

この結果より同じ固形分濃度において、フラッシュ蒸気を再循環させた場合には明らかにU値が改善され、またフラッシュ蒸気流速が高い程U値が大きくなるのがわかる。

図8にはU値とチューブ内フラッシュ蒸気流速の関係を表す。この図からもREVAP蒸気再循環システムによりU値が数倍高くなるのがわかる。流速が増加する程U値も増加し、固形分濃度81%でもフラッシュ蒸気流速が0 m/sの場合U値は約100 w/m², °Cであるが高い流速では1,000 w/m², °C以上に達しているのがわかる。

図8 U値とチューブ内フラッシュ蒸気流速

6. 考 察

テスト結果はREVAP蒸気再循環システムにより、特に高い固形分濃度においてU値が非常に高くなることを明白に表わしている。U値が低い固形分濃度において同じ位の割合で高くならない理由としては、チューブ壁面の伝熱抵抗とチューブ外面の凝縮水膜による伝熱抵抗によると考えられる。また低い粘度のフォーリングフィルムは蒸気再循環によるせん断変形の影響を受けない位、既に充分なフィルム表面の粗さをもっているため、蒸気再循環によるU値の増加は高

い粘度のフォーリングフィルムの場合ほど大きくはない。

REVAP 蒸気再循環システムは低い固形分より高い固形分の方がU値が高い割合で促進されることより、高い固形分濃度で特に有効である。また、高い固形分での低いU値を改善する有効な手段である。技術面および経済面より熱伝達係数には制限がある。例えば、黒液濃縮で熱伝達係数が $400 \text{ w/m}^2, ^\circ\text{C}$ の場合、図7に表わされているようにREVAP 蒸気再循環を行わない時には固形分濃度は約75%が上限であるが、蒸気再循環を行った場合には80%以上の固形分濃度を達成できる。

蒸気再循環システムはコンセントレーターに2缶またはそれ以上の蒸発缶を必要とする。これについては蒸発缶1缶が洗浄中でも他の蒸発缶で必要な容量を維持する一般的なコンセントレーターと同様であるが、コンセントレーター間でのフラッシュ蒸気の循環のためのスペースおよび機器が必要となる。

フラッシュ蒸気流れの圧力降下によりコンセントレーターでの全体的な温度差は小さくなる。これは当然チューブ長さやフラッシュ蒸気流速による。蒸気再循環システムを採用する黒液濃縮システムは温度差が1~3°Cのオーダーになるようなフラッシュ蒸気流れの圧力降下を持つよう設計される。しかしながらコンセントレーターでの温度差は数10°Cのオーダーであり、フラッシュ蒸気流れによる圧力降下が発生してもU値は数倍改善されていることより圧力降下はシステムの効率上、小さな影響しかもたないことがわかる。

7. 最近の納入例

図9に最近受注したスウェーデンのSödra Cell AB, Värö工場向けの改造プロジェクトのフローを示す。

Värö工場では既設のエバポレーションシステム2系列があり、1系列は6重効用で5缶のライジングフィルムと1缶のフォーリングフィルムユニットからなり、もう1系列は2缶の強制循環コンセントレーターと4缶のフォーリングフィルムユニットからなっている。クヴァナは蒸発量を345 T/Hrから484 T/Hrに、また黒液固形分濃度を68%から75%に改善するため新たに3缶のコンセントレーターと3缶の効用缶(第2, 3, 4)を追加し、コンセントレーターにはREVAP 蒸気再循環システムを採用する。3缶のコンセントレーターはそれぞれ約63%, 69%, 75%の固形分濃度で運転され、最終ユニットで最もフラッシュ蒸気流速が大きくなり、大きなせん断変形を液膜上に与えることによりU値が大幅に改善される。

8. 結 論

REVAP 蒸気再循環システムをもつクヴァナのエバポレーションシステムは高い固形分濃度で非常に有効である。パイロットプラントでのテスト結果はU値がREVAP 蒸気再循環システムにより数倍促進されることを表わしている。

参考文献

*Olle Wennberg and Jan Bergman: "Evaporators with Vapour Recycling" 1995 Interna-

図9 Södra Cell AB, Värö工場向け改造プロジェクトのフロー

- tional Chemical Recovery Conference
- *Olle Wennberg : "Kværner Evaporation System-Design Features"
- *Numrich R. : "Influence of Gas Flow on Heat Transfer in Film Condensation" Chem. Eng. Technol. 13 : 136-143 (1990)
-