

エバポレーターの技術変遷

住重プラントエンジニアリング（株）技術部

熊谷 恒彦

	頁
はじめに -----	2
1. エバポレーターの型式と変遷 -----	2
2. 高濃度化、大型化のトレンド -----	6
3. 省エネ対策例、プレエバ、効用数アップ -----	7
4. エバの能力低下と原因解析事例 -----	8
5. 今後の動向 -----	8

この資料は、平成 22 年 10 月 5 日に開催された紙パルプ技術協会年次大会前日講演会「製紙産業技術 30 年の変遷」での講演記録を基にまとめたものである。資料中すべての図の著作権は作成者に属し、無断使用・複製等をご遠慮ください。

講師略歴

1975 年 住友重機械工業(株)

入社

2001 年より住重プラントエンジニアリング（株）

入社以来、紙パルプ、化学、食品業界向け等のエバポレーター関係の、主に基本設計、開発業務に従事。

はじめに

住重プラントエンジニアリング技術部の熊谷恒彦と申します。

エバポレーターの技術変遷について説明いたします。

内容は、エバポレーターの型式と変遷、高濃度化・大型化のトレンド、省エネの対策例、プレエバと効用数アップ、エバの能力低下と原因解析事例、最後に今後の動向について話します。

紙パルプの薬品回収工程にエバポレーターが使われています。蒸解工程でチップと薬液と蒸気を入れて、チップを蒸解します。蒸解後のリグニンや薬液が混ざったものを黒液と呼んでいます。黒液の濃度は大体 16～20%ぐらいで、これを希黒液と呼んでいます。これをエバポレーターで 70～75%ぐらいまで濃縮します。

黒液エバポレーターの役割は、できるだけ少ないエネルギーで黒液の水分を蒸発させて仕上がり液の濃度をアップさせることです。その効果は、一つ目が回収ボイラーの効率の向上による蒸気と発電量のアップ、二つ目が環境対策として高温高圧型回収ボイラー（S型RB）への対応と、SO_x放散の低減です。エバポレーターに要求される品質としては、仕上がり濃度を上げることと高効率化ということです。

1. エバポレーターの形式と変遷

30年ほど以前では、ほとんどのエバポレーターはチューブタイプでした。

その代表的なタイプを挙げますと、まず、LTVと呼ばれるものがあります。これは、ロングチューブバーチカル、長いチューブを縦に並べたもので、シェルアンドチューブ熱交換器の上に、ペーパーヘッドという蒸発したペーパーとミストを分離する大きな部屋を設けています。次に、FCと呼ばれている強制循環（フォースドサーキュレーション）タイプです。それから、FFと呼ばれているのがチューブを使ったフォーリングフィルムタイプです。

LTVは下から（Fのところはフィード）液が入り、循環ポンプを持たず、スチームで加熱され、チューブの中の黒液が沸騰する状態になって、上昇流になります。そのバブリングして上昇するスピードで伝熱係数を稼ぐ方式です。一方、FCは、そのバブリングなしに強制的に循環ポンプでチューブ内の流速を上げるという方式です。

第53回 - 2010年紙パルプ技術協会年次大会

エバポレーターの技術変遷

住重プラントエンジニアリング(株)

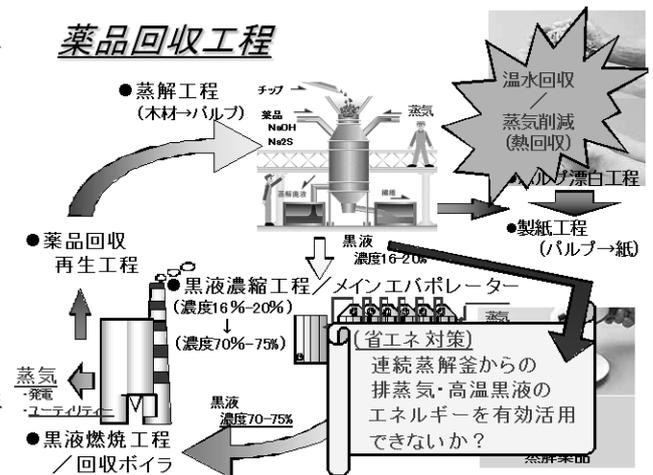
技術部

熊谷 恒彦

2010/10/05

議題項目

- 1) エバポレーターの型式と変遷
- 2) 高濃度化、大型化のトレンド
- 3) 省エネ対策例、プレエバ、効用数アップ
- 4) エバの能力低下と原因解析事例
- 5) 今後の動向



黒液エバポレーターの役割

【役割】極力少ないエネルギーで、黒液中の水分を蒸発させ、エバ仕上液の濃度アップ

【効果】

- ① 回収ボイラーの効率向上→蒸気&発電量増
- ② 環境対策(S型RBへの対応とSO_x放散低減)

エバポレーターへの要求品質

⇒仕上濃度アップ、高効率化

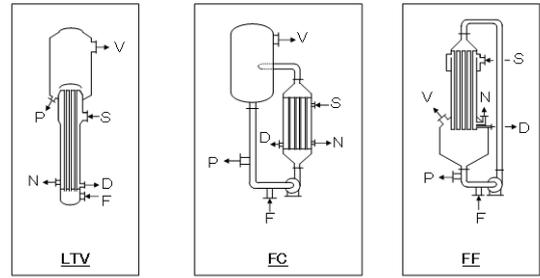
強制循環 FC では、循環ポンプにより、チューブ内の流速を 2メートル/sec 程度に上げないと流速を与えないと伝熱係数が十分とれませんので、循環ポンプでの流量が膨大となり、その動力も大きくなってきます。これをセーブしながら、伝熱係数も稼ぐために生まれたのがフォーリングフィルムタイプです。これは、液をチューブの上から降らせて、チューブの内壁に沿って液が下に流れますので、循環流量を FC タイプよりは少なくできるのです。

このほかに、プレートの FF フォーリングフィルム、あるいは液膜流下式やラメラタイプと呼ばれているものがあります。このタイプが、省エネでスケールに強いということがよく使われるようになったものです。概略の構造を示します。ベッセルの中にヒーティングエレメントを組み込んでいます。ヒーティングエレメントは、2枚のステンレスの薄板の周囲を溶接して、中央部といいますが、周囲以外のところを千鳥状にスポット溶接して、それを成形して膨らませたものです。これを膨らんだ内側に加熱蒸気を入れて、外側の上から液をフォーリングフィルムで降らせて、伝熱機構を持たせたものです。液を上から均一に分散させるような工夫としてディストリビューターと、液を上から降らせるための循環ポンプ、蒸気が出ていくところにミストセパレーターを設けてあります。特徴としては、スケールに強く、省エでコンパクトであることが挙げられます。

紙パルプ以外にも、ブドウ糖、異性化糖や水あめといった食品工場のプロセスにも使われています。その他、グリセリン（石鹼の製造）、メッキの洗浄液、ラクタム回収（これはナイロン製造プロセスの一部）、硫酸やアルミン酸ソーダなどにも使われています。さらに、脱硫廃液、アルコール廃液、ウイスキーや焼酎の廃液などにも使われています。

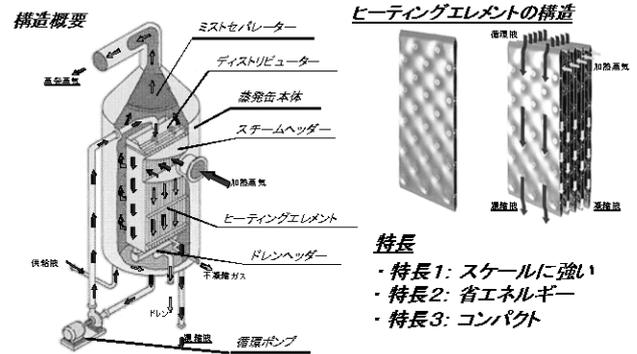
特徴であるスケールに強いということをもう少し説明します。従来のチューブ式では、スケールが「チューブの内部で年輪状に成長」するような感じですが、チューブ内では、蒸発蒸気が液で抑えられて、内圧が上がってきます。そのため、チューブ内についたスケールがかたくなっていて、洗浄するのが困難です。これを取るために薬液で洗おうとしても、スケールが詰まっているので薬液が中に入っていきます。そのため、

チューブタイプエバポレーターの主な型式



LTV: Long Tube Vertical FC: Forced Circulation FF: Falling Film
F: feed P: product S: steam D: drain V: vapor N: no condensable gas

プレート式FFエバポレーター概要 省エネ、スケールに強い液膜流下式蒸発缶



適用事例

●処理液事例

- ブドウ糖、異性化糖、水飴
- コーンステイープリカー
- 大豆ホエー
- グリセリン
- メッキ洗浄液
- 各種濃縮プロセス液
ラクタム回収、硫酸回収
アルミン酸ソーダ、アセトン
etc.
- 紙パルプ黒液
- 脱硫廃液
- アルコール廃液
- 各種工場廃液

特長1:スケールに強い

●チューブ式/スケール生成状況

- Tube内部で年輪状に成長
- Tube内蒸発蒸気の内圧
→ハードスケールの生成



スケール生成
→伝熱性能低下

洗浄が困難

●プレート式FF/スケール生成状況

- スケールが板状で脆い
- 蒸発蒸気が速やかに分離
→ソフトスケールの生成



運転中にスケールが
剥離し易い

洗浄が容易

強制的にメカニカル洗浄（高圧水でジェット洗浄）するのが一般的な落とし方です。チューブタイプが使われた30年近く前の紙パルプ工場では、20人~30人くらいが、洗浄するためにシフトを組んで勤務されていたのを覚えています。それは、エバポレータを1週間に1回、2回と停めて人海戦術でジェット洗浄するための人員配置です。これに対してプレートタイプのエバポレータの場合は、スケールはつくのですが、伝熱面に液を抑えつけながら流していないので、スケールは取れやすく、高濃度で運転した後に薄液に切りかえれば洗浄が可能です。このタイプの採用によって、運転の自動化並びに省力化が進展しました。

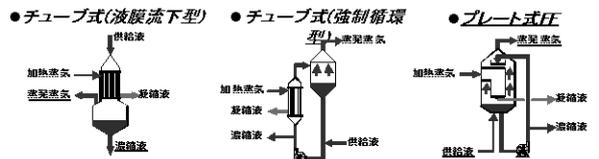
特徴の二つ目ですが、チューブ式のFF型およびチューブ式の強制循環のもの、プレートのFF型を比べた場合に、循環量が強制循環に比べて大幅に少なくて済み、動力費は約15分の1に、FFのチューブタイプと比べても3分の1くらいで済みます。

次に、チューブ式強制循環とプレート式FFを比較します。チューブ式は、加熱管とフラッシュタンクの二つの機器で構成されています。プレート式FFでは、一つの容器の中にヒーターも入っているので、全体に省スペースになっています。また、一つの缶を2室や3室に分けて、それぞれ薄い液を入れたり濃い液を入れたりというような使い方ができます。この例でいきますと、一つの缶を三つのセクションに分けて、セクションを切りかえながら洗浄するロータリー洗浄や、二つのセクションに仕切って、濃度を濃いものと薄いものを切りかえてやる片側洗浄、液の入り口と出口を逆のフローするワンウエー洗浄などが可能です。

蒸発蒸気の潜熱の回収には二つのシステムがあります。一つは、蒸気再圧縮方式またはVRC方式（ベーパーリコンプレッション）です。蒸発したベーパーをブロワで圧縮し、そのエネルギーを高め、加熱蒸気にする方式で、系外に出る潜熱がほとんどありません。イナートガスは系外に出ていきますが、それ以外は出てきません。したがって、定常運転時の加熱蒸気がほぼ不要です。

もう一つが多重効用方式です。これは、加熱蒸気を第1缶に入れ、その発生蒸気が次の蒸発缶で使用され、その発生蒸気がさらに次の蒸発缶で使用されます。これが繰り返えされます。この場合ですと、5回使っ

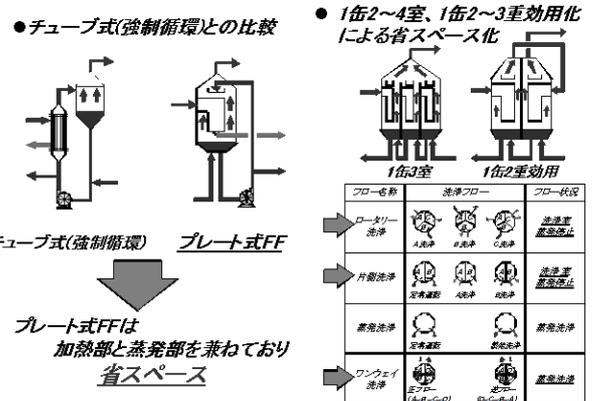
特長2:省エネルギー



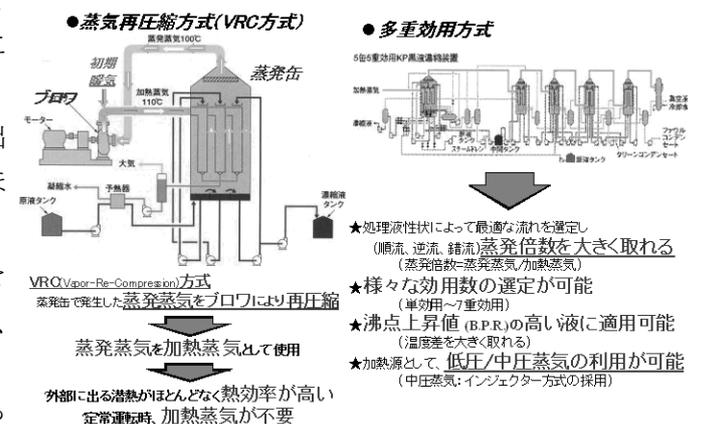
エネルギー消費比較 (伝熱面1000㎡とした時の循環ポンプ動力の比較例)

	液膜流下型チューブ式エバポレータ	強制循環型チューブ式エバポレータ	プレート式FF
仕様	50.84 × 2 × 850本	38.1 × 2 × 1165本 × 2apes	58枚
循環量	12m ³ /hr	2.5m ³ /s (チューブ内流速通常値)	エシノH4枚当り102m ³ /hr (46GPM:エシノH1枚当り標準値)
決定要素	(単位) 約3分の1	4300m ³ /hr	590m ³ /hr
流量	=12m ³ /m ² ・hr×(π×D×L)×950本	約15分の1	102×58
ヘッド	10m	6m	
使用電力	150kW	700kW	6kW

特長3:コンパクト



住友エバポレーターのシステム



て、サーフェスコンデンサーの真空系に行き、5重効用に構成されています。これは蒸発倍数を大きくとれます。一番単純な、イニシャルコストが安く済む単効用から、KP黒液の場合では7重効用まで可能です。沸点上昇の高い液に適用が可能です。一方、VRC方式では、沸点上昇の高い液では、ブロワの圧縮比をかなり上げる必要があります、余り高い濃度までは濃縮できません。紙パルプ工場では、サーフェスコンデンサーで出てくる温水をパルプの洗浄工程で有効に使えることから、多重効用方式がほとんどです。

洗浄効果を説明します。上段がウイスキー廃液で、下段がパルプの黒液です。ウイスキー廃液といっても結構どろどろの状態、50%でこのくらいです。これを原液で洗いますと、ほとんど落ちて、酸洗するとぴかぴかの状態になります。

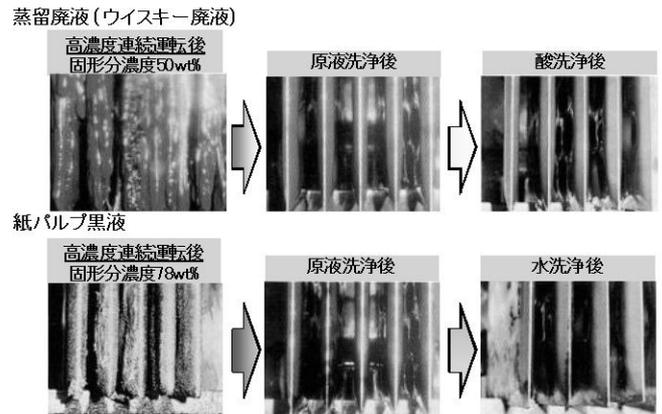
(次にご覧いただくのは、実際に蒸発缶で洗浄の様子を撮影したビデオです。蒸発缶の外のサイドグラスから内側をのぞいて撮影したものです。これが希黒で洗い始めたところです。これは15分くらいたった状態です。30分経過です。ほぼ希黒でさらさらに洗われています。A、B、Cというのは、切りかえながら連続運転をしているものです。---ビデオ内容は省略)

右図は、燃焼黒液の濃度とSO_xエミッションと蒸気発生量の大体の傾向を示しています。黒液濃度が75%くらいでほぼSO₂がゼロになります。発生蒸気量は65%くらいのところを100と置くと、濃度が上がるほどアップしていきます。

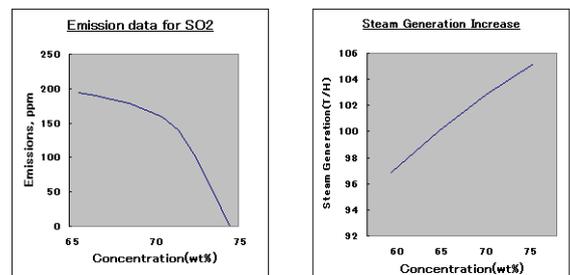
右下図は、黒液の性状をイメージしたものです。横軸が固形分濃度で、縦軸が温度です。濃度70%の黒液は、100℃以上くらいから液体としてポンプで輸送ができます。これが80%まで上げると、大気圧下のストレージタンクから液体として輸送できるような粘度ではなくなってしまいます。80%以上の超高濃度濃縮テストをしたことはありますが、90%くらいまで濃縮して、洗浄して元の低濃度に戻そうとしても簡単に戻らなく、そのまま配管やテスト機の中で岩のように固まってしまった経験があります。

省エネ対策の背景をまとめてみます。原油価格は少し前の時点のものです。環境問題として、地球温暖化対策や省エネ法の改正等があり、社会的には、継続的に環境対策を進める責任も生まれています。

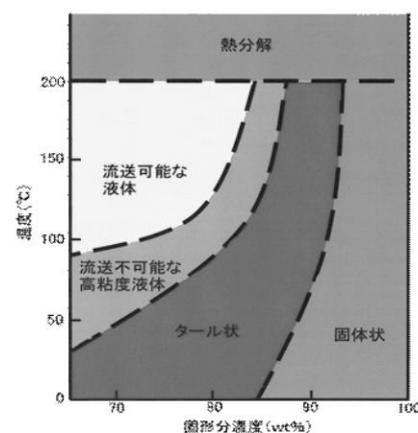
【補足】洗浄効果:例



回収ボイラにおける 燃焼黒液濃度 vs SO_x EMISSION & 蒸気発生量の傾向 環境保護と省エネ



黒液の性状



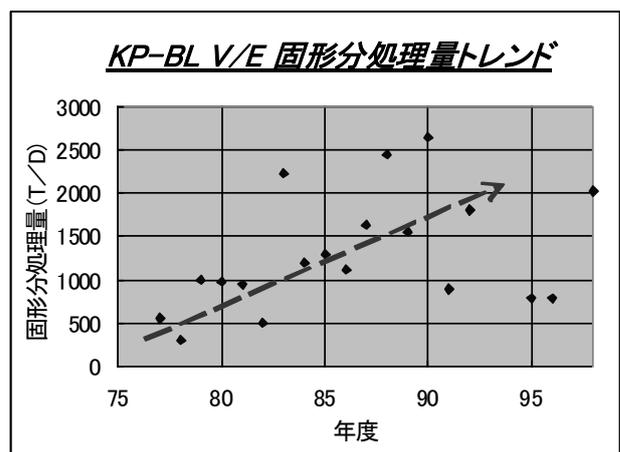
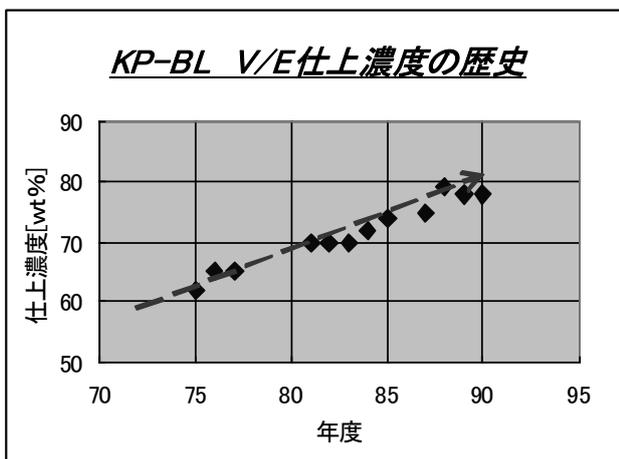
それに対してエバポレータが、どのように変わってきたことかというものを並べてみます。60年代は、チューブ式のLTV、チューブ式のFCとカスケードエバポレータという組み合わせでした。これらは厳しいスケールアップで、黒液濃度50%くらいが限界でした。70年代にプレートタイプのエバポレータが出現し、濃度アップが可能になってきました。同年代にRBの技術革新があり、従来のアメリカンタイプからスカンジナビアタイプに変わってきます。80年代にRBの高温高圧化と相まってエバの仕上がり濃度がアップしていききました。これは、エバだけ頑張っても、RBのほうがそのままでは駄目ですし、RBが頑張ってもエバがそのままでは駄目です。両方が、結果的には、いいタイミングで協力してアップしていききました。その結果、90年代で国内の各工場が高濃度化が進みました。

当社の納入事例を紹介します。74年に、紙パルプ向けの1号機が当時の撰津板紙(株)に納入されています。その後、当時の日本紙業(株)の芸防工場に3セクション方式のエバポレータが納入されました。82年にプレエバポレータが中越パルプ(株)の能町工場に納入されています。83年に十條製紙(株)の石巻工場に高濃度の7缶7重効用方式。これは、高濃度では7重効用として初めてのものです。90年代に世界最大級の高濃度エバポレータ(78%)を王子製紙(株)の春日井工場に納入しています。

2. 高濃度化と大型化のトレンド

エバポレータの仕上がり濃度はどのような変化をしてきたか、当社の納入実績をプロットしてみました。横軸が年度で、縦軸が仕上濃度です。

次に、エバポレータの大型化のトレンドを示します。一番大きいものが固形分処理量2,600トン/日です。



省エネルギー対策への背景

- **原油価格の再高騰**
- **環境問題**
 - ・地球温暖化対策
京都議定書(COP3)、ポスト京都議定書(COP15)
 - ・省エネ法の改正
エネルギー管理:工場・事業場単位 → 企業単位
 - ・3R政策:資源有効利用促進法等
Reduce, Reuse, Recycle (Thermal-Recycle)
- ◆ **省エネルギー**
 - ・コスト削減 — 従来より継続的活動
+ — エネルギー消費に対する合理化
 - ・社会的責任 — 地球温暖化対策を含む環境対策
⇒ 不可欠かつ継続的課題

エバポレータ型式の変遷

- ・1960年代:チューブ式LTV+FC+カスケードエバ
強烈なスケールアップトラブル、濃度アップ困難
- ・1970年代:住友ロスコの出現→濃度アップ可能
同年代のRB:Aタイプ→Sタイプ化が始まる
(7缶7重効用) (スカンジナビア)
- ・1980年代:RBの高温高圧化と相まって、
エバ仕上液の濃度がアップしていった
- ・1990年代:国内の各工場が高濃度化が進んだ

製紙産業 技術遺産

- ・1974年 紙パルプ業界への住友エバポレータ1号機
VRC方式 【撰津板紙(株)殿 東京工場】
- ・1977年 仕上缶3セクション スwitching方式および
Low BOD方式 【日本紙業(株)殿 芸防工場】
- ・1982年 連釜用プレエバポレータ1号機
【中越パルプ工業(株)殿 能町工場】
- ・1983年 高濃度7缶7重効用エバポレータ
【十條製紙(株)殿 石巻工場】
- ・1990年 世界最大級高濃度エバポレータ
78wt%濃度達成 【王子製紙(株)殿 春日井工場】

3. 省エネ対策例、プレエバ、効用数アップ

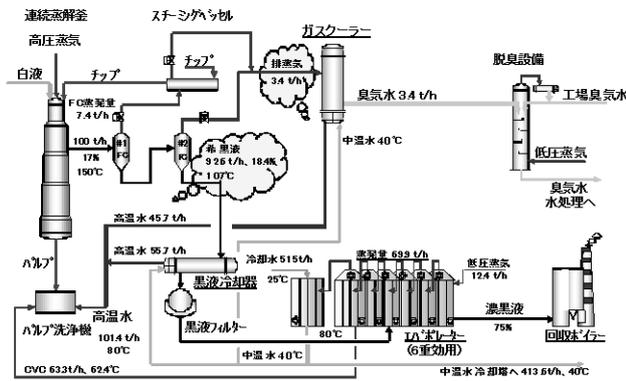
次に、プレエバポレータについて紹介します。従来のフローは、連釜から出てくる排蒸気はガスクーラーを経由して系外に逃げていくというものでした。ここにプレエバポレータを設置して、メインエバポレータに行く黒液濃度を上げ、メインエバポレータでの蒸発量及び加熱蒸気量を減らして、省エネを図ろうというものです。

プレエバポレータ設置

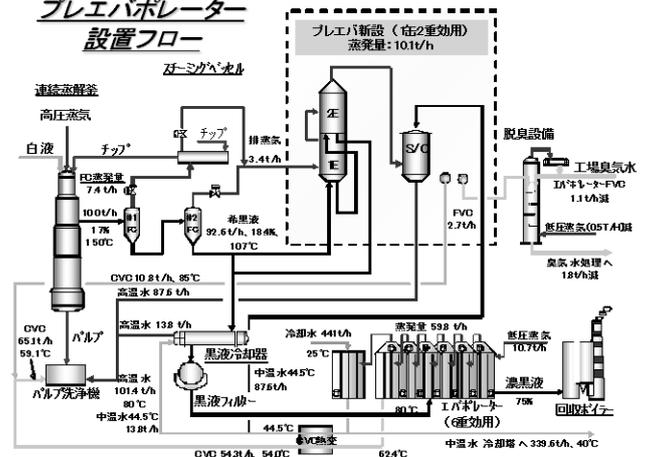
主目的

- 蒸解工程～メインエバポレータの間における
 - ・黒液の熱エネルギーの利用
 - ・排蒸気の有効利用
- プレエバポレータの採用により
 - ・メインエバポレータへの黒液給液濃度の上昇
 - メインエバポレータでの蒸発負荷を低減
- ・蒸気コンデンサの性状改善により
- パルプ洗浄用途に適した温水回収を実現

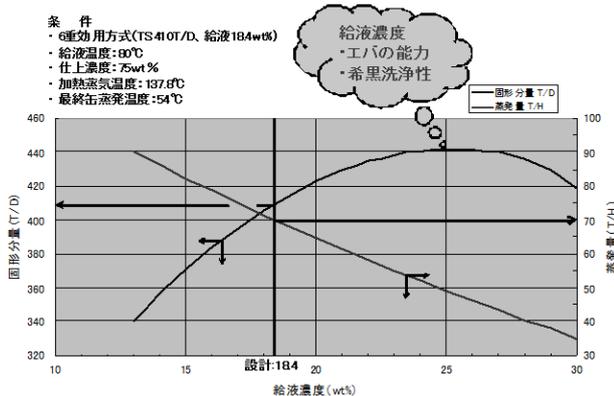
従来フロー



プレエバポレータ設置フロー



給液濃度 VS メインエバ処理能力



給液濃度と沸点上昇の相関を示します。給液濃度が上がってくると沸点上昇が大きくなって、使える有効デルタが減ってきます。

次に、効用数を増やすことによる BPR (沸点上昇)

プレエバポレータ適用前後の比較

プレエバポレータ設置前後のバランス比較

項目	項目	プレエバ設置前後		差	
		現状	プレエバ設置後		
連釜廻り	総蒸発量	T/H	7.4	17.5	10.1
	高温水80°C	T/H	101.4	101.4	0
	CVC 85°C (パルプ洗浄行と仮定)	T/H	—	10.8	10.8
	FVC (脱臭設備行)	T/H	3.4	2.7	-0.7
メインエバ	総蒸発量	T/H	69.9	59.8	-10.1
	加熱蒸気量	T/H	12.4	10.7	-1.7
	CVC (パルプ洗浄行と仮定)	T/H	63.3	54.3	-9.0
	FVC (脱臭設備行)	T/H	7.6	6.5	-1.1
脱臭設備	総蒸	T/H	11.0	9.2	-1.8
連釜・エバFVC	蒸気量	T/H	1.1	0.9	-0.2

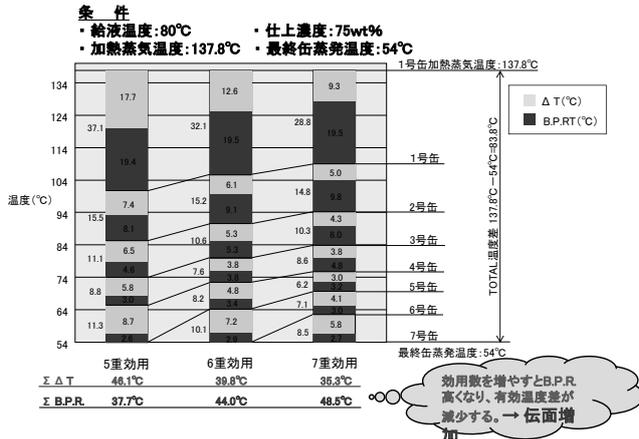
◆ 主なメリット

- メインエバ蒸気量削減
- 連続蒸解釜周りにおける
 - CVC (高温水)の回収及びCVCの洗浄工程への有効利用
- 脱臭設備負荷低減による蒸気使用量削減

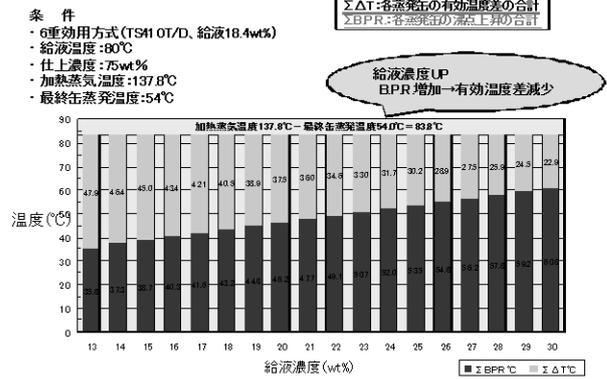
・固形分処理量: 408T/D
 ・連続抽出黒液: 100t/h × 17wt% × 150°C
 ・プレエバ6重効用方式
 ・メインエバポレータ: 6重効用、仕上75wt%

への影響を示します。効用数を5、6、7と上げてくる各効用のBPRの総和が大きくなり、相対的に使えるデルタTが小さくなるので、それに見合う伝熱面積が必要です。効用数を上げることによって加熱蒸気量は減りますので、エネルギー価格が上がった等々ときには効用数のアップは効果的です。

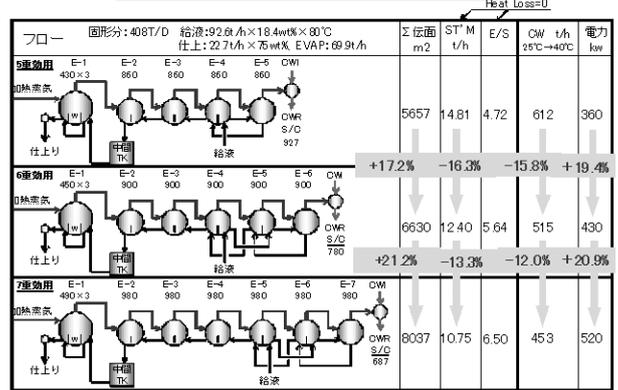
効用数によるB.P.R.の影響



給液濃度 VS ΣΔT / ΣB.P.R.



効用数によるバランス比較



4. エバの能力低下と原因解析事例

次に、エバの能力の低下とその原因にふれます。エバポレータの納入後、年代がたちますと、いろいろな問題が出てきます。例えば腐食等によるエアリークやデミスターの閉塞、循環ポンプの能力ダウン等があります。また、蒸解方法がいろいろ変わってきて、トータル固形分中の有機対無機の比率が変わってくる、あるいは、KPプロセス以外から入ってくる無機成分、廃酸などが一緒にエバポレータで濃縮されていたという例もあります。そのような場合に、エバポレータの能力は減っています。知らず知らずのうちにそのようになっていたことがわからずに困っていたという例があります。

5. まとめと今後の動向

まとめと今後の動向を右に示します。80 から 90 年代にエバポレータの高濃度化、高効率化が進みました。最近では、操業が低負荷になった場合に対応した省エネを求める場合があります。今後は、工場その他設備を

エバの能力低下とその原因(事例)

- ◆ **エバ設備に起因するもの**
 - ・エアリーク(設備老朽化に伴う腐食等)
 - ・デミスター閉塞(過負荷運転、黒液発泡等)
 - ・循環ポンプの能力ダウン(インバータとケーシングのギャップ不良)
 - ・計装レベル制御不良による伝熱部の焦付き
 - ・系内に洗浄水等が流入
- ◆ **黒液性状の変化に起因するもの**
 - ・無機分/有機分の比率(無機比率UPで1、2缶スケリングの傾向)
 - ・残アルカリ濃度UP(沸点上昇が高くなる傾向)
 - ・浮遊固形分
 - (・希黒TK、中間TKの底ざらい)

まとめ、今後の動向等

- ① 80～90年代にエバポレータの高濃度化、高効率化が進んだ。
- ② 最近では、操業が低負荷になった場合に対応した省エネ等を求める場合もある。今後は、工場その他設備を含めた全体としての採算性評価が求められる。
- ③ 経年老朽化が懸念されるエバについては、如何に適切な対応をしていくべきか、メーカーとして協力していきたい。

含めた全体としての採算性評価が求められてきます。
また、経年老朽化が懸念されるエバにいかに対応していき、メーカーとして協力、サポートさせていただくように考えています。

質問 1：どうも講演ありがとうございます。最近、老朽化更新の事例が多いと思います。老朽化更新を計画する場合に特に留意する点がありましたら教えていただきたい。もう一つは、更新する際にプラスアルファのメリットを出す方法、効率がよくなるのはもちろんですが、そのような方法がありましたら何かアドバイスしていただきたい。

熊谷 老朽化してどこが傷んでいるかをまずは確実に押さえていただき、その対策を織り込んだ更新にしなければいけません。あと、単純に同じものに変えるのではなくて、効率アップということであれば、蒸発缶をふやす、あるいは効用数を上げるなど、そのほうが採算性に乗って実現が早くなることもあるかと思います。

質問 2：最後に低負荷の話が出ました。当社の白老工場でもバランス状態によっては低負荷運用を強いられています。低負荷運用に向けた施策、あるいはこのような設備改造をすればさらなる低負荷運用ができますということがあれば、ご紹介ください。

熊谷 低負荷運転は各工場でいろいろ条件が違うので、一概に申し上げられません。例えば既設のエバポレータの系列に、先ほど説明しましたチューブタイプの LTV などが組み込まれていると、LTV は循環ポンプを持っていない蒸発缶なので、負荷を下げると焦げつき等が出る懸念があります。LTV でも低負荷で運転されていることがあるかとは思いますが、一般にはそれはお勧めできません。循環ポンプを持っている従来のチューブのフォーリングフィルムや、強制循環、あるいはプレートタイプのものでしたら、負荷が下がっても循環ポンプはずっと回っていますので、伝熱面には液が常に流れている状態で、蒸発缶の構造的には負荷変動は可能です。ただし、高濃度の仕上がり液を得ようとして、負荷を下げると、濃度コントロールや液面制御が結構敏感であり、少し振れただけで濃度が大きく変動したりすることがありますので、その辺の工夫が必要になります。

以上