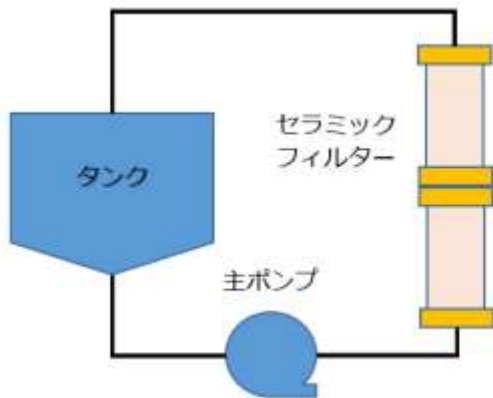


スラリーリサイクル概説 第4章 (Part3)

今月は、先月に引き続き第4章「計測と装置設計」に関する問題のなかで、「ウォーターハンマー」による破損の問題についてお話する。

濃縮装置の主要な構成は、クロスフローとして働くセラミックフィルターであるが、堅牢であるがゆえに「ウォーターハンマー」による破損が問題となる。

4-8 主要配管径の選択



濃縮装置において、タンク-ポンプ-セラミックフィルターを結ぶ配管は主要配管として設計上重要な要素となります。
ここでは、「キャビテーション」、「ウォーターハンマー」を考慮しなければならない。

4-8-1 配管径別ウォーターハンマー計算値

主要ポンプは、15kW マグネットポンプを使用した場合の配管径を 65A、75A、100A の3種類を選択した上で、管内の流量が 50m³/h、18m³/h、15m³/h の時にウォーターハンマーが発生した際に発生する、ポンプ近接及び膜出入口面に伝わる圧力を計算し下記表 12 に求めた。

表12. 配管径別ウォーターハンマー(WH)推定値

WH想定径路	配管の種類	配管呼び径	配管厚さ S(m)	配管内径 d(m)	管材体積弾性係数 E(Pa)	管内流量 m ³ /h	管内流速 v(m/s)	流体の体積弾性係数 K(Pa)	流体の密度 ρ(kg/m ³)	内径/厚さ	圧力伝搬速度 a(m/s)	圧力上昇 h(m)	圧力上昇 P(MPa)		
ポンプ-フィルターリング前面(リング内含まず)	塩ビ配管	65	4.1E-03	6.7E-02	3.0GPa	50	3.90	2.15GPa	994(35°C)	16.3	413	164.0	1.64MPa		
						18	1.40					59.0	0.59MPa		
						15	1.20					51.0	0.51MPa		
		75	5.5E-03	7.7E-02	3.0GPa	50	2.99					135.0	1.35MPa		
						18	1.08					48.8	0.49MPa		
						15	0.89					30.2	0.40MPa		
	65	6.6E-03	1.0E-01	3.0GPa	50	1.77	76.9			0.77MPa					
					18	0.64	27.8			0.28MPa					
					15	0.53	23.0			0.23MPa					
	フィルター内	ジルコニア	ポア径 50nm	1.3E-04	5.0E-08	210GPa	72			9.40		3.8E-04	1470	1410.0	14.1MPa

*塩ビ配管、バルブ関係の耐圧は 0.8MPa、フィルターハウジング及びセラミックフィルター表面は、1MPa に設計されている。但しチャンネルよりポアー径に至ってはその耐圧は 10MPa とされている。
*逆洗中に、配管内にウォーターハンマーを発生させる事は、フィルターチャンネル内のウォーターハンマーを誘発させフィルターの破損につながる。

ウォーターハンマー計算値一覧

$$\text{圧力伝搬速度: } a = (\sqrt{K/\rho}) / ((\sqrt{1+(K/E)} (d/s)) \text{ m/s} \quad \text{--- (4-3)}$$

$$\text{圧力上昇: } h(\text{max}) = av/g \text{ (m)}$$

K: 流体の体積弾性係数 (Pa)

g: 重力の加速度 (m/s^2)

ρ : 流体の密度 (kg/m^3)

E: 管材の縦弾性係数 (Pa)

d: 管の内径 (m)

S: 管の厚さ (m)

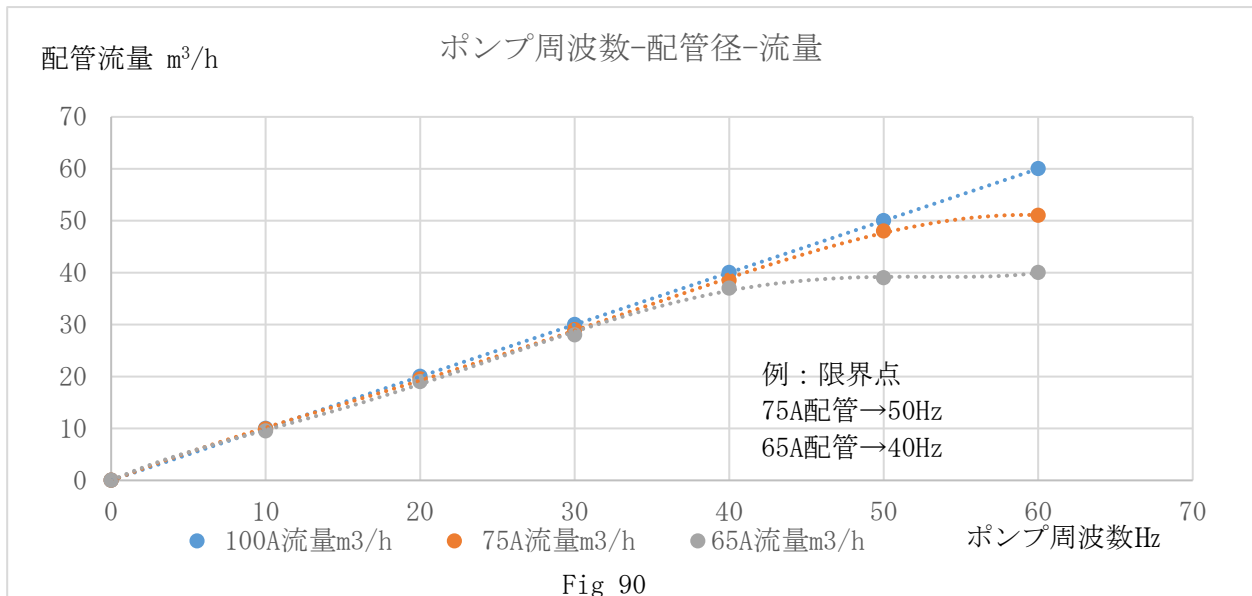
v: 管内の流速 (m/s)

4-8-2 配管径とキャビテーション

ウォーターハンマーと同様にキャビテーションにも注意が必要であり、濃縮装置の設計上ポンプをマグネットポンプ 15kW を用いた場合、タンク---ポンプ---フィルターの閉回路において負荷の原因と成りうる配管径とその系の長さに応じてポンプの運転回転数=インバーター周波数を設定する必要がある。装置設計・運転の経験から、運転周波数とキャビテーションの発生予知は比較的簡単に見出すことが可能である。

ポンプ周波数と流量からキャビテーションの予見

主要配管に接続されているポンプの周波数と配管内の流量を監視する事によりキャビテーション発生を予見する事が出来る。



ポンプ周波数を徐々に上げて行くと、周波数に比例して流量が相対的に増加する運転は正常時であるが、上図の様に増加のカーブが鈍くなることは負荷の抵抗が大きくなっている事を表している。これは、キャビテーションの兆候と言える。また、兆候として配管内から発生する音が、ゴロゴロとエアを噛むような音を感じる事も同様に危険な兆候を示している。

4-9 ウォーターハンマーの実態

筆者らは、濃縮装置運転中のセラミックフィルター破損問題に直面した経験を持ち、その原因追及を行っていく過程で、セラミックフィルターチャンネル内の耐圧は10MPaであり、濃縮流が高濃度時に高粘度を伴って運転した場合に、逆洗時にウォーターハンマーがセラミックフィルター内部で発生し、その時に発生する圧力はセラミックフィルター破損に至る10MPa以上になり得る事を、理論上明らかにする事が出来た。

以下、この検討の際の解析詳細を紹介する。

4-9-1 セラミックフィルター破損に於ける調査、検討

- 1: 新型菱形セラミックフィルターの機械的条件
本件等に用いるセラミックフィルターに関する諸数値の整理
- 2: 逆洗時の動作
モデルを用いて逆洗で導入する透過水状況の詳細の見積り
 - 2-1: 逆洗時の透過水経路
逆洗で導入する透過水の経路の仮定
 - 2-2: 逆洗時の透過水側の透過面積と流速
逆洗で導入する透過水の流速の見積り

- 3: ウォーターハンマーの発生による圧力上昇
逆洗時ウォーターハンマー発生モデル提示と発生最大圧力見積り
- 3-1: 圧力波の伝わり速度
- 3-2: 圧力上昇
発生し得る最大圧力の見積り
- 3-3: 圧力波の周波数
圧力波の減衰速度の見積り

- 4: その他諸解析
- 4-1: 過去に逆止弁付近でウォーターハンマーが発生した状況の解析
- 4-2: 実運転中のウォーターハンマーの発生
フィルター閉塞が無くてもウォーターハンマーが発生する可能性の提示
- 4-3: 濃縮流の流れと逆洗の噴流との衝突
二つの流体の衝突だけでは過大内圧発生可能性は低いという結果
- 4-4: フィルターハウジング内の逆洗時の圧力上昇
逆洗圧力だけではハウジング内過大圧力発生可能性は低いという結果

1: 新型菱形セラミックフィルターの機械的条件

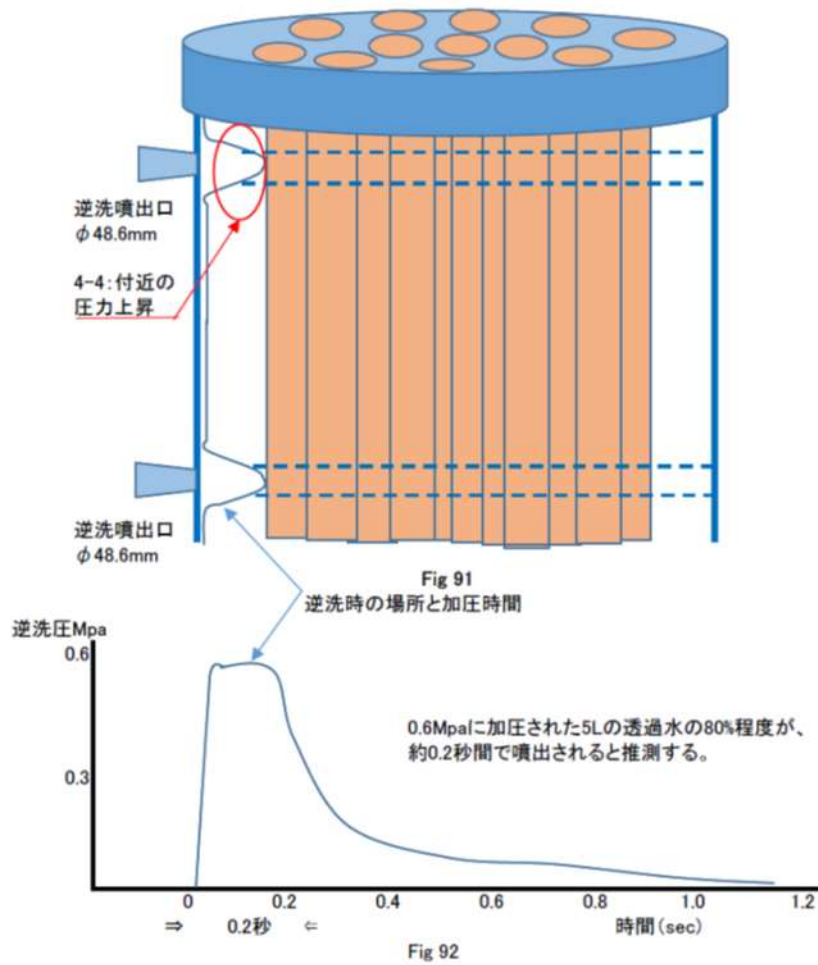
表 13

フィルター 1本当たり		
膜面積	透過水膜面積 (50nm 総面積) (ポア径 50nm を面積として計算)	
0.68m ²	濃縮流量 50m ³ /h の場合の 1set 当たりの 透過水量は、23L/min. である。(1.92L/min・本) 膜面積と透過水膜(50nm 膜) との比は 50m ³ /h=833L/m $1.92 / (833/12) = X / 0.68$ $X = 0.68 * 1.92 * 12 / 833 = 0.019\text{m}^2$ 透過水膜面積=0.019m ² オリフィスの原理からの算出では透過水膜面積=0.012m ² (全濾過フィルターとして計算)	実測値

表 14

	濃縮運転時の諸条件 (廃液濃度 0.05~0.5wt%程度)
線速度	フィルター1本、48 Channel 各 Channel の線速度 濃縮流量は、50m ³ /h として 2.3m/s
濃縮流量と透過水量	1 分間当たりの濃縮流量と透過水量 濃縮流量：833L/m 透過水量：23L/m・1set 1.92L/m・本
透過水膜面積	透過水の実測値より計算された 50nm の総膜面積は 0.019m ² /本 膜面積との比は、0.019/0.68=0.028

2：逆洗時の動作



2-1: 逆洗時の透過水経路

Fig 91 にフィルターハウジング内における逆洗噴出し口の位置関係を示し、また、逆洗加圧は噴出し後 0.2 秒間で約 80%は完了すると推測する。その場合の透過水経路は、全透過水経路の約 10%を使用しているものと推定する。

$$(48.6 \times 2) / 1000 = 0.0972$$

2-2: 逆洗時の透過水側の通過面積と流速（ポア径 50nm より噴出する流速）

表(1)及び追加説明文より濃縮運転時の透過膜面積は 0.019m^2 としたが、逆洗時の噴出し口方向や静圧の分布予想を考慮して

$$0.019 \times (24/192) \times 0.3 = 7.1\text{E-}4\text{m}^2 \text{ とした} \quad \text{--- (4-4)}$$

$$\text{噴出し口付近に集中する事より } 5\text{cm、}5\% \text{ とし、} (7.1\text{E-}4) \times 0.05 = 3.55\text{E-}5\text{m}^2 \quad \text{--- (4-5)}$$

$$\text{逆洗噴出しの流速は、} ((2.5\text{E-}3) / 12) \times 0.8 \times 0.4 / (3.55\text{E-}5) = 1.88\text{m} / 0.2\text{sec} \quad \text{--- (4-6)}$$

逆洗時流速 = 9.4m/sec (噴出しの 80%は 0.2 秒に集中するため。)

3：ウオーターハンマーの発生による圧力上昇

ウオーターハンマーが発生した場合に上昇する圧力を次に計算する。

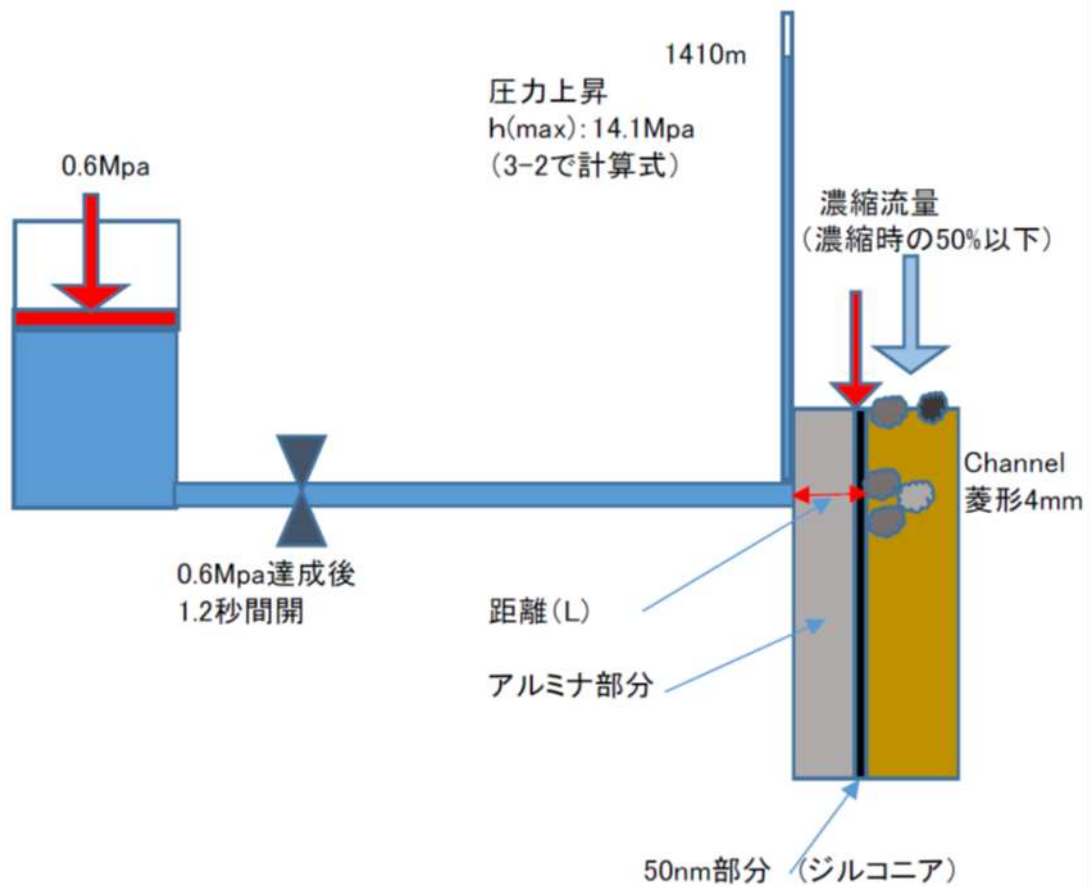


Fig 93

Fig 93 はウオーターハンマーが発生する様子を最も簡単な例として表している。逆洗時に、0.6MPa の加圧が約 0.2 秒間に集中するとアルミナ部分よりポア径 50nm のジルコニアの部分における流速は約 9.4m/s に達する。Channel に抜ける際に、ゲル化したスラリー等で経路が遮断された場合には行き詰まった事による流れの急速な変化が圧力の変化に変わる。

圧力の変化は、水中の音の伝搬速度で元に引き戻される、しかし引き戻されても 0.6MPa で加圧されていると、またその圧力の波は Channel 側に跳ね返る事になりこの往復を繰り返す事になる。次に、ウオーターハンマーが発生したした場合に、セラミックフィルターの超ミクロ的な領域での圧力上昇を計算する。

3-1: 圧力波の伝わり速度

圧力波の伝わり速度 a は、(Allievi)の式によると

$$a = (\sqrt{K/\rho}) / (\sqrt{1 + (K/E)(d/s)}) \quad \text{--- (4-7)}$$

ここで、 $d/s \approx 0$ となる為

$a = \sqrt{K/\rho}$ と簡略する。

また水溶液の体積弾性係数は、2.15GPa、35°Cの $\rho = 994\text{kg/m}^3$ として

$$a = \sqrt{2.163 \times 10^9 / 994} = 1.47 \times 10^3 = 1470\text{m/s}$$

K : 流体の体積弾性係数 (Pa)

ρ : 流体の密度 (kg/m^3)

E : 管材の弾性係数 (Pa)

d : 管材の内径 (m)

S : 管材の厚さ

3-2: 圧力上昇

圧力上昇 $h(\text{max}) = av/g$ (m) で求められる。

--- (4-8)

$$h(\text{max}) = 9.4 \times 1470 / 9.8 = 1410\text{m}$$

上昇圧力 14.1MPa となる。

3-3: 圧力波の周波数

圧力波の周期 T は、 $T = 2L/a$ で求まる

--- (4-9)

菱形セラミックフィルターの外縁に向けての厚みは、約 2.5mm である。従って、

$$T = 2 \times 0.0025\text{m} / 1470\text{m/s} = 3.4 \times 10^{-6}\text{s} = 3.40 \mu\text{s}$$

周波数 $f = 1/3.4 \mu\text{s} = 294\text{kHz}$ となる。高周波では、水中の伝搬において減衰する事は言われているが、大よそ 1MHz で約 3m の進行で 50% に減衰するといわれる。ある文献から推測すると 300kHz の進行波では、約 30m で 50% に減衰すると推測する。従って、 $30/1470 = 0.020\text{sec} = 20\text{msec}$ にて力は 50% になる。

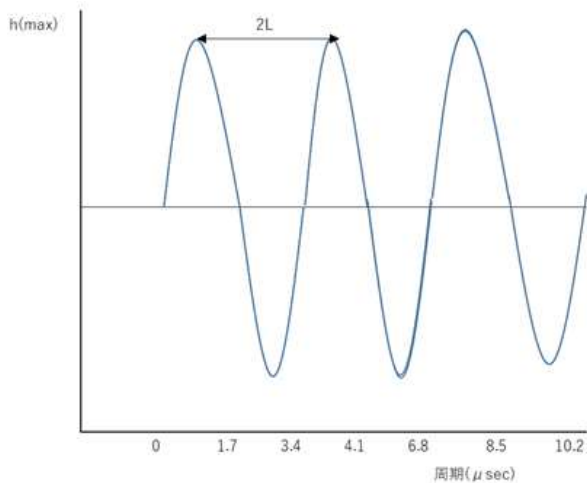


Fig 94

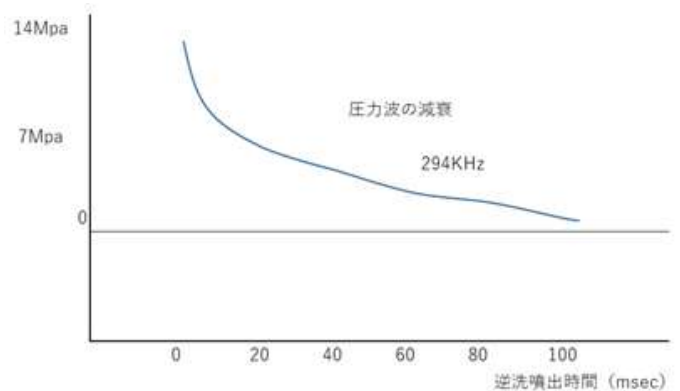


Fig 95

4:その他諸解析

4-1:過去に逆止弁付近でウォーターハンマーが発生した状況の解析

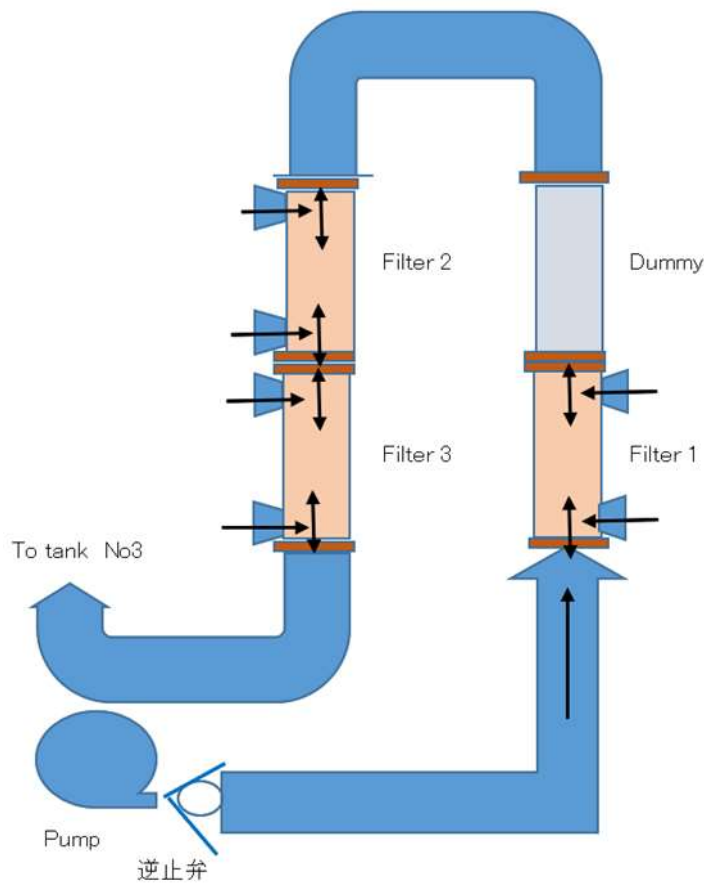


Fig 96

Fig 96 は、逆洗運転時の動作図である。フィルター破損時は、第3タンクに於ける濃度 16wt%以上の逆洗時であった。現象として次の事を経験している。

- 1:フィルター1 及び 3 の同時逆洗時に、ポンプ周波数 20Hz 運転では、逆止弁から異音が発生した。
- 2:異音解消の為に、ポンプ周波数を 25Hz (濃縮流量増) にしたところ異音は解消した。
- 3:この現象は明らかに、濃縮本流に於けるウォーターハンマーと言える。

第3タンク運転時の、ポンプ周波数と濃縮流量との関係は、

ポンプ周波数 20Hz

濃縮流量	15m ³ /h
	4. 17L/sec
	0. 834L/0. 2sec

ポンプ周波数 25Hz

濃縮流量	18m ³ /h
	5L/sec
	1. 0L/0. 2sec

逆洗時に 80%が 0.2sec で噴出された場合の流量、

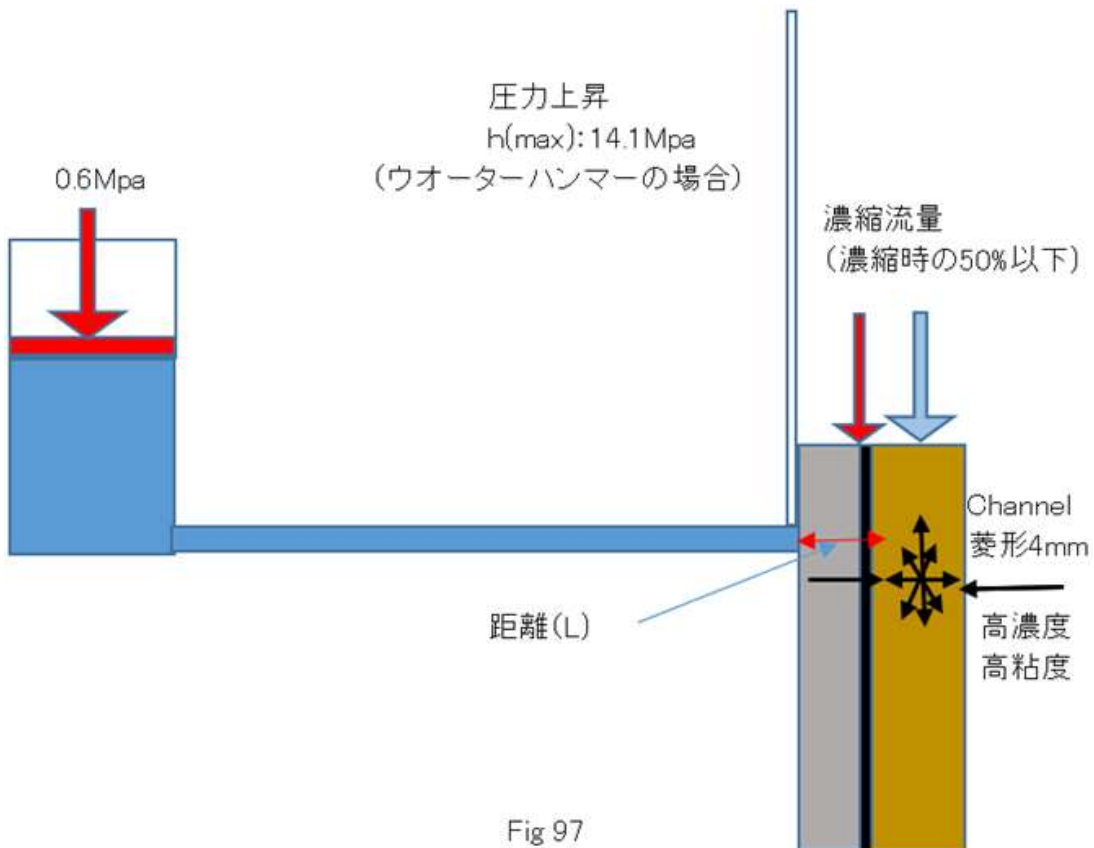
逆洗噴出し流量 $5 \times 0.8 = 4\text{L}/0.2\text{sec}$

1 ヲ所当り $2\text{L}/0.2\text{sec}$

2 方向に分散 $1\text{L}/0.2\text{sec}$

逆洗時にポンプ周波数 20Hz の場合の逆洗噴出し始め 0.2sec に於ける濃縮流量は 0.834L/0.2sec である。それに対して、逆洗噴出し始め 0.2sec の流量は、1.0L/0.2sec と濃縮流量を上回っている。濃縮流量の流れは、堰き止められた形となり逆止弁に圧力波による衝撃が伝わったと考える。そこで、ポンプ周波数を 25Hz に変更した。同じ条件では、濃縮流量は 1.0L/0.2sec と、同じ値になるが、逆洗に使用する水溶液は、濃度 0.05wt%以下、粘度 1 以下であるが一方濃縮液は第 3 タンクに於いては、濃度 16~26wt%, 粘度 5~10 程度と予測され、濃縮流量はある程度は低下するもののウォーターハンマーには、至っていないと判断する。しかし、濃縮流量側を増した事は、ウォーターハンマーの発生をポンプ---濃縮流量の経路より、セラミックフィルター側に移動させた事になると考える。

4-2: 実運転中のウォーターハンマーの発生



濃縮流が高濃度、高粘度の状態に対し逆洗流は、0.05wt%以下、粘度 1 程度と考えた場合に、ジルコニアポア径 50nm に接する面が堰き止められた状態を想定した場合には、ウォーターハンマーが発生すると考えられる。その場合は、前述の (4-8) 式により圧力上昇=14.1MPa となる。

4-3:濃縮流の流れと逆洗の噴流との衝突

ウォーターハンマーが以外に、濃縮流の流れと逆洗の噴流との衝突についても推測した。

流れ同士の衝突による力の上昇は、 $F = \rho Qv$ (N) で求まる --- (4-10)

逆洗時に最も強く当たるフィルター外側 30%の噴流の流量 Q 及び流速 v は逆洗噴流の計算式(2-2)、(2-3)より、

$$Q = (2.5E-3) / 12 \times 0.8 \times 0.4 = 6.7E-5 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{--- (4-11)}$$

$$v = (6.7E-5) / (3.55E-5) = 1.89 \text{ m} / 0.2 \text{ sec} = 9.45 \text{ m/s}$$

噴流が Channel 内壁を押し上げる力 F は、

$$F = 994 \times (6.7E-5) \times 9.45 = 0.629 \text{ N} \quad \text{--- (4-12)}$$

$$0.629 / 3.55E-1 = 1.77 \text{ kgf/cm}^2 = 173 \text{ kPa} \quad \text{--- (4-13)}$$

逆洗運転時に、フィルター1&3の同時運転により濃縮流量の流れが重畳したとして、

$$F = 994 \times (6.7E-5) \times (9.45 - (-9.45)) = 1.26 \text{ N}$$

$$1.26 / 3.55E-1 = 3.55 \text{ kgf/cm}^2 = 348 \text{ kPa} \quad \text{--- (4-14)}$$

フィルター破損の要因には成らない。

4-4:フィルターハウジング内の逆洗時の圧力上昇

付帯 Fig1 にあるように、フィルターハウジング内のフィルターの外周に及ぼす逆洗時の影響について推測した。逆洗時には、0.6MPa に加圧され約 0.2 秒程度の時間でハウジング内に噴出されると推測している。逆洗の墳力によるフィルター外周に与える力は、

墳力 = $0.0238 \times \text{流量} \times \sqrt{\text{静圧}}$

$$F = 0.0238 \times Q \times \sqrt{P} \quad \text{--- (4-15)}$$

(0.0238 : 実験値)

流量 $Q = 2.5 \text{ L} \times 0.8 / 0.2 \text{ sec} = 600 \text{ L/min}$

圧力 $P = 6 \text{ kgf/cm}^2$ (G)

の場合は、 $0.0238 \times 600 \times \sqrt{6} = 35.0 \text{ kgf}$

衝撃量は、JIS 安全値の 15 倍を用いて、 $F = 35.0 \times 15 = 525 \text{ kgf}$

フィルター投影面積は、 $25 \times 5 = 125 \text{ cm}^2$

圧力は、 $525 / 125 = 4.20 \text{ kgf/cm}^2$ (G) = $0.412 \text{ MPa} = 412 \text{ kPa}$ --- (4-16)

破損には至らない。

5: 纏め

フィルター破損に至った事実と、フィルターを取り巻く環境の内、破損に至る可能性のある圧力上昇についての計算値を推測した。

フィルター破損の事実

1: 逆洗時に発生した。

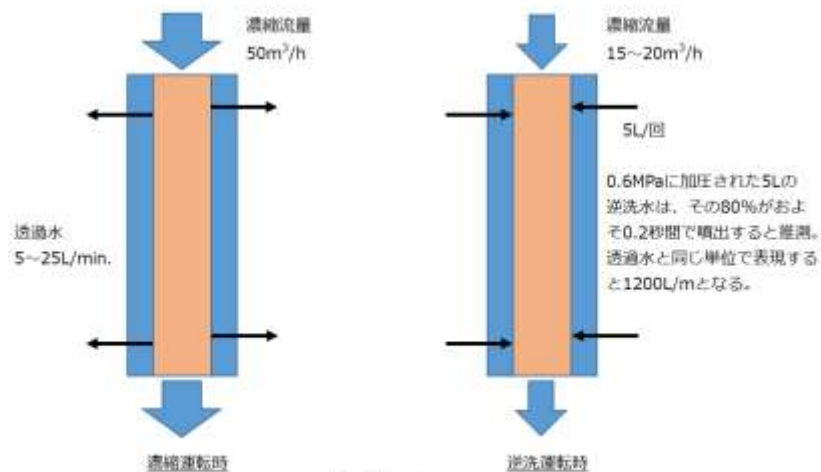
2: ハウジング 1, 3 同時逆洗時だった。

- 3:タンク 3（高濃度）運転時だった。
- 4:ハウジング上蓋を片方のみ取り外した事がある。
- 5:破損箇所はハウジング流れ入口側である。
- 6:フィルター破損箇所は端面より 50mm 下である。
（逆洗噴出口とほぼ同じ高さである。）
- 7:フィルター破損箇所は逆洗噴出口の方向である

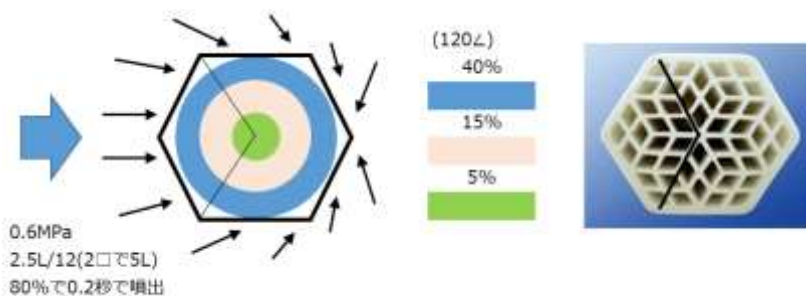
以上を参考にウォーターハンマー他、ハウジング内及びフィルター素子（Channel）の圧力上昇値を推測した。

- 1:ウォーターハンマーでは、10MPa を超える圧力上昇が予測される。
- 2:0.6MPa に加圧され、約 0.2 秒間で 80%が噴出されると推測した。仮に 0.1 秒間で噴出されると全ての圧力上昇は今回の推測値の 2 倍になる。
- 3:ウォーターハンマー以外の圧力上昇は、破損に至る値では無いと推測する。

付帯説明



付帯Fig.1

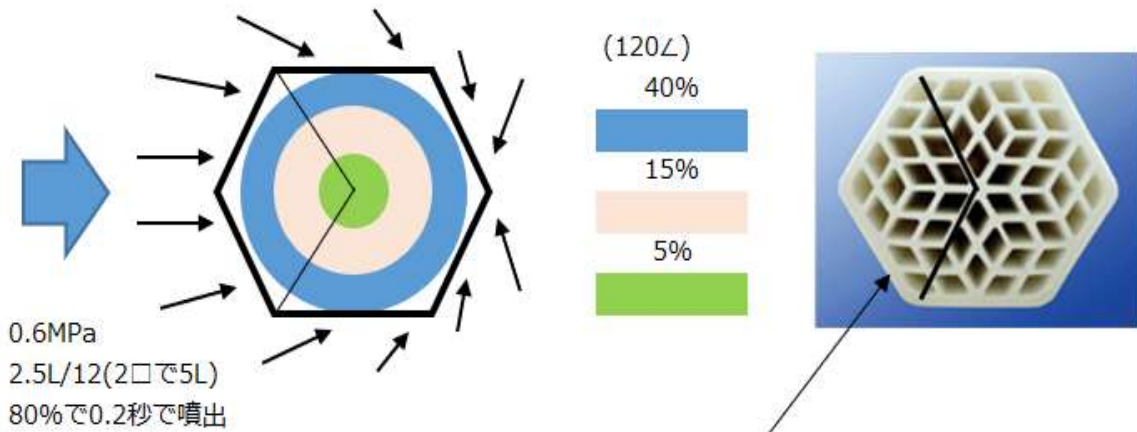


付帯Fig.2

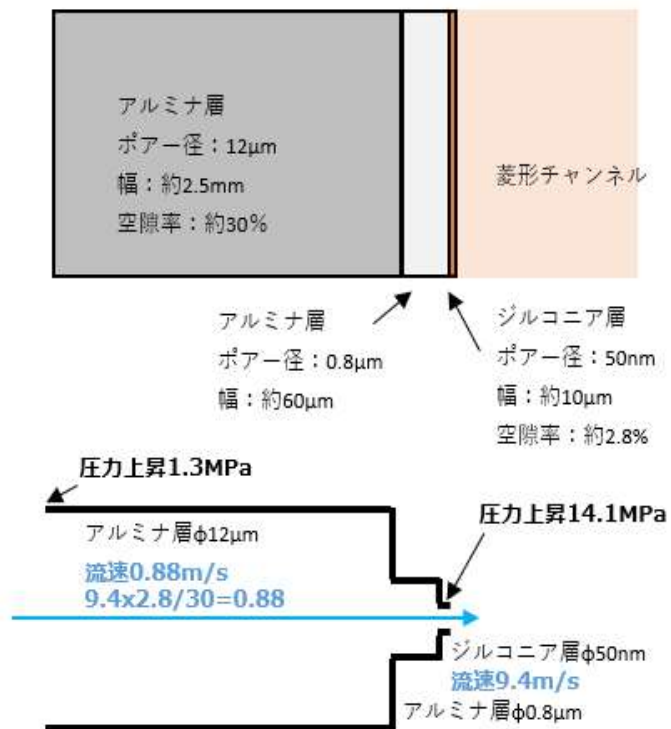
フィルター1set 内には、12本のフィルターがセットされている。その為に、フィルター1本当りには $5/12=0.416L$ が逆洗として流入すると考える。フィルター1本には Channel 数が 48あり、その形は 1 辺約 4mm 弱の菱形を呈し、 $48 \times 4=192$ 辺で成り立っている。最外周側には、

18Channel, 24 辺が接している。均一に静圧としてフィルターに加圧する事は困難と考え、最も影響を受ける透過膜面積は、逆洗噴出し口方向の 30%程度 (120°) とし、逆洗流量の 40%程度が当たるものとした。

濃縮運転時は、ハウジング内の各フィルター及び各 Channel の濃縮流量は、ほぼ平均化しており、それ故に透過水も平均化して安定している。逆洗時は、0.6MPa に加圧された逆洗流が 2 カ所(48.6 φ mmx2) から流入する。従って、逆洗流入口の方が強くまた、各フィルターの Channel に対しても付帯 Fig 2 に示す様に、外側が最も強い影響を受けると判断する。



セラミックフィルター膜断面

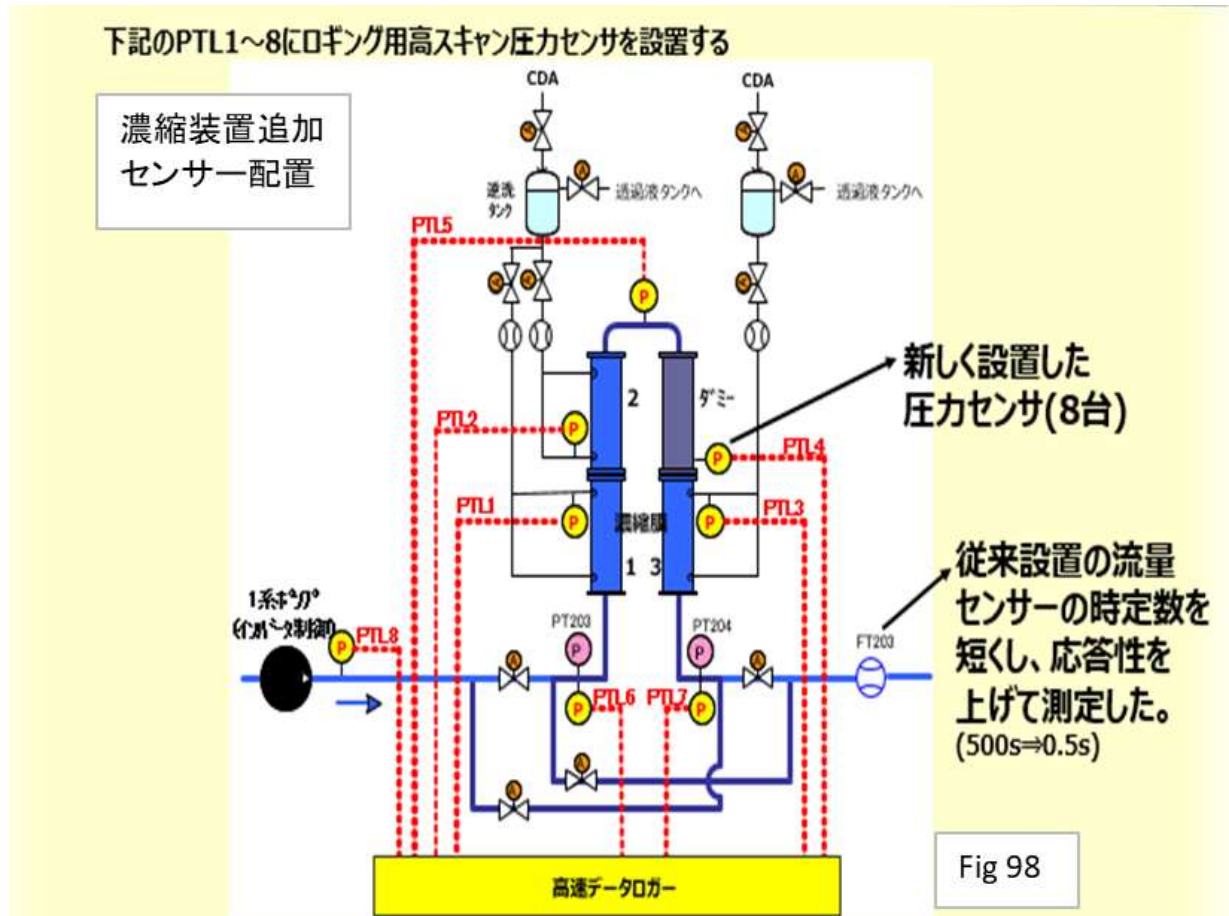


付帯説明(2)

4-10 実際の事故に於ける実機説明

事故原因説明の為に、圧力センサー及びデータロガーを設置した。事故説明の実験には、当時の技術部の多大の努力による実験データを基に説明出来た。

4-10-1 濃縮装置に圧力センサーを設置



セラミックフィルターの周辺を中心に8台の圧力センサーを設置した。それらの出力は、データロガーにて収録した。データロガーのサンプリングクロックは、圧力センサーの応答性の問題もあり1msecが最速であった。

4-10-2 ウォーターハンマーが発生している測定例

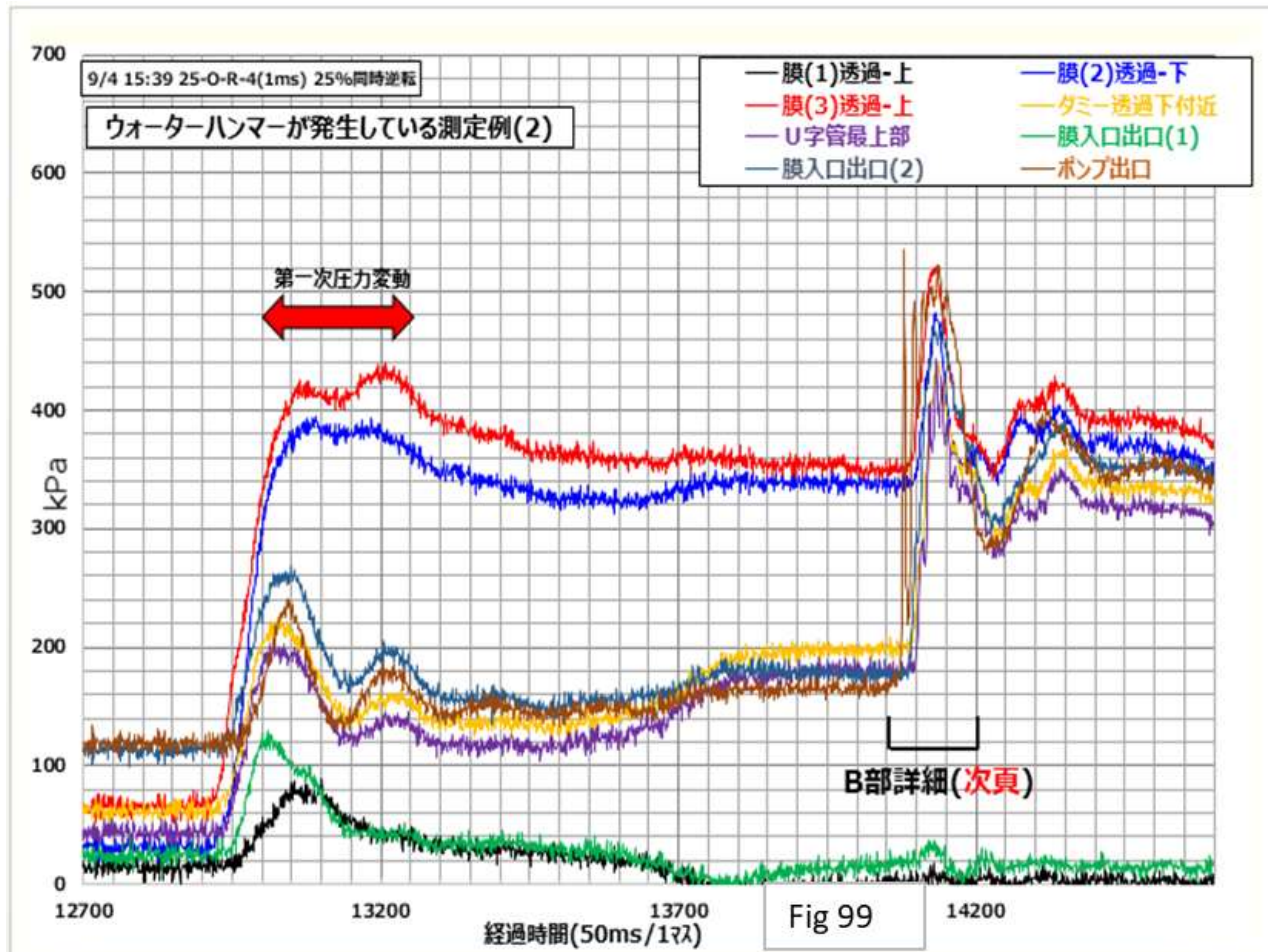


Fig 99 において、第一次圧力変動とは、逆洗開始による透過液タンク側からの 0.6MPa に加圧された噴流による圧力上昇を表している。問題点は、B部詳細とあるポンプ出力側の急激な圧力上昇である。これは、濃縮本流が止まる事によるウォーターハンマーの発生であり、B部を拡大したのが Fig 100 である。

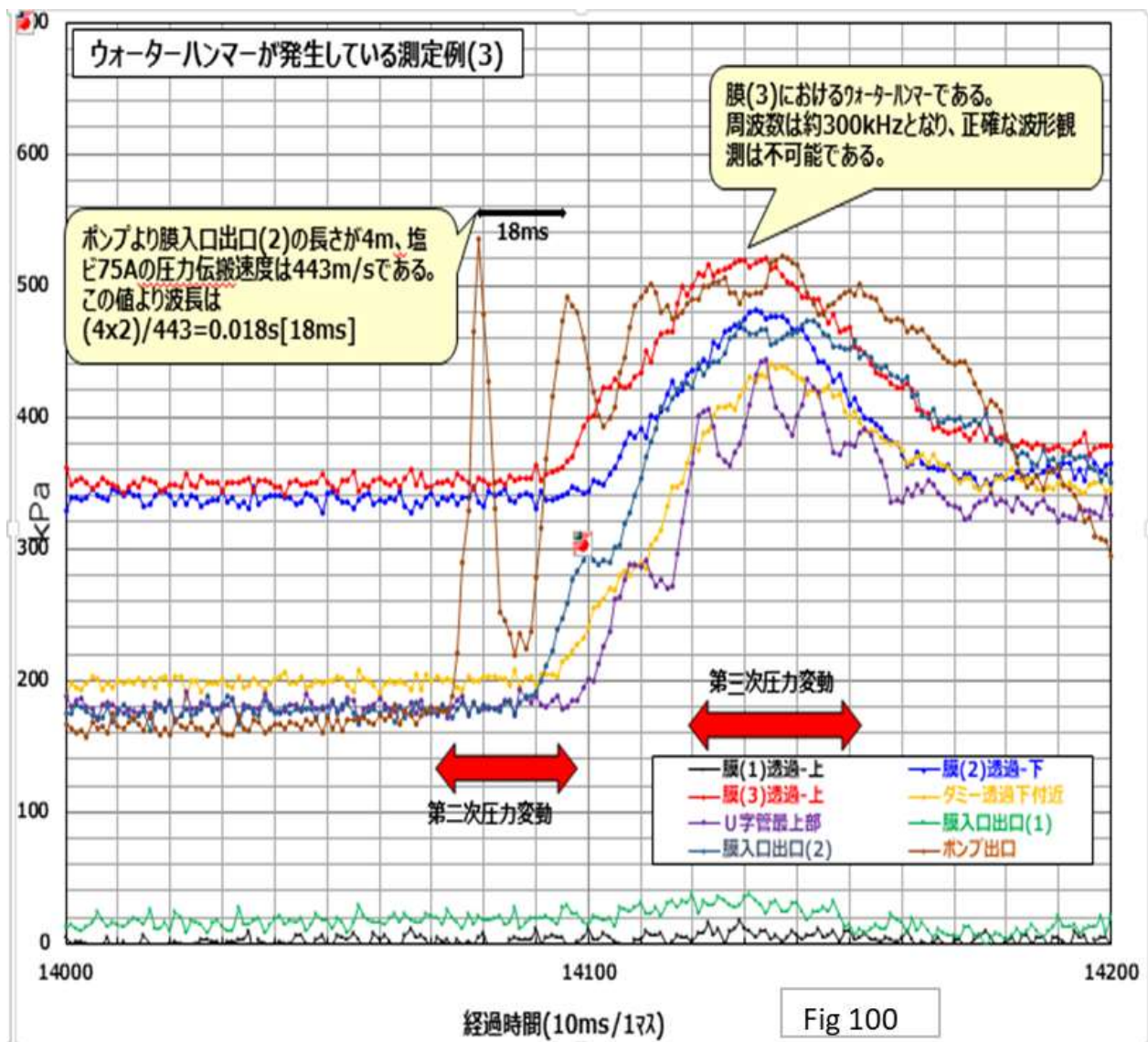
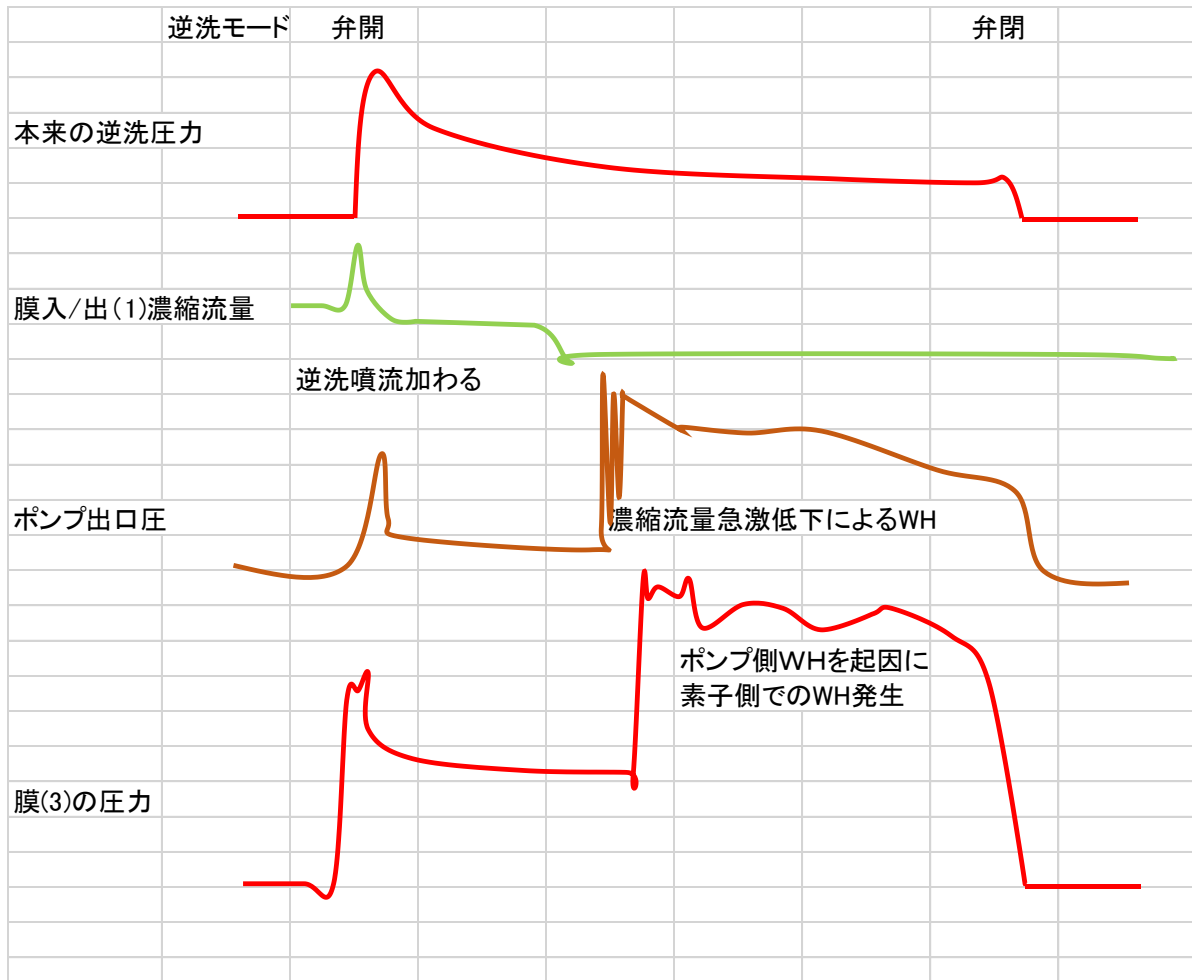


Fig 100 では、濃縮本流が止められた為に、ポンプ出口側との間でウォーターハンマーが発生した。本装置では、膜入口出口ーポンプ間の長さが約 4m であり、75A の塩ビ配管では、表 12 より圧力伝搬速度は 443m/s である。この値より波長は、 $(4 \times 2) / 443 = 0.018\text{ms}$ 、18ms であり、グラフデータと一致する。濃縮本流が止まると、透過水が加圧され逆流として噴流状態であった流れが止まる事となり、膜素子チャンネル (50nm ポア) にウォーターハンマーが発生する。前節 4-9 「ウォーターハンマーの実態」にて説明しているが、予測として最大 14MPa に達する事になる。今回の実験データを基に、圧力の変位を時間を追って計算した。

4-10-3 実験データを基にウォーターハンマー時間推移



サンプル例の圧力の推移 (kPa)							
ポンプ出口圧	120	240	150	536	400	300	120
膜(3)圧力	70	440	350	516	420	340	110

WH発生時の素子内から膜(3)圧力の傾斜			
最高圧での傾斜			
166kPa	664kPa	1.66MPa	7.1MPa
膜(3)圧力	素子外側	素子内部	素子内部
	アルミナ2.5mm	アルミナ60μ	ジルコニア



* 今回の測定で素子内WHの最高圧を示したのは、22wt%-従来-逆運転同時逆洗時の、11.7MPaでした。

4-10-4 ウォーターハンマー発生の因果関係

濃縮装置における、セラミックフィルターのチャンネル素子の 50nm 側のジルコニア部分の耐圧 10MPa を上回る原因は、今回の解明に至ったウォーターハンマーであると確信するが、さて装置との因果関係はどのように推測できるか。

如何に列挙できるか

- 1:バルブの誤動作
- 2:逆止弁の誤動作
- 3:人為的ミス操作
- 4:濃縮液体の粘度
- 5:その他

今回の原因は、ヒュームドシリカスラリーの急激な粘度上昇であった。

では何故、濃縮と粘度上昇が影響するのか？その原因は？については、私の 4 章に及ぶ説明の中に答えはあります。

ここまで 4 章 8 回に分けて掲載してきました「スラリーリサイクルについての深いお話特集」は一旦終わりになります。長い間お付き合い下さいましてありがとうございます。

この「…深いお話し特集」にご興味をお持ちで、全 4 章を一括でご入手をご希望される方が居られましたら、info@mfc-technology.com までご連絡下さい。

今回分の掲載期間が終了する 6 月以降になりますが、全章を PDF ファイルにしてお送りいたします。

今後も興味ある知見が得られましたら、随時 MFC テクノロジー社ホームページ上に掲載するつもりでおります。その節には再びお付き合いをよろしくお願い致します。