

鉄系凝集剤 PSI による濁質処理の効率化

Enhancing Removal of Suspended Particles with Poly-Silicate Iron Coagulant

北見工業大学	フェロー	海老江 邦 雄	(Kunio Ebie)
“	学 生 員	○水 森 豊	(Yutaka Mizumori)
	学 生 員	東 義 洋	(Yoshihiro Azuma)
	学 生 員	山 木 暁	(Satoru Yamaki)
		金田一 貴 朗	(Takaaki Kinndaichi)

1. はじめに

わが国で開発された塩化第二鉄に重合珪酸を導入した平均分子量 20 万～50 万ダルトン程度のポリシリカ鉄(以下、PSI)は、非常に強力な凝集・フロック形成能を有し、ポリ塩化アルミニウム(PAC)使用時よりも大きく重たいフロックを形成する。また、それを構成する素材が安全である上、塩化第二鉄と重合珪酸の比率、即ち、鉄とシリカとのモル比(Si・Fe 比)を原水水質ならびに運転条件に合わせて調節することができるなどの特徴を持っている。同凝集剤の基礎的特性に関しては多数報告されているが、急速ろ過プロセスに適用した場合における濁質の処理性に関しては、いまだ断片的な情報があるに過ぎない。

著者らは、凝集沈澱処理の効果は処理水の濁度だけでなく処理水に残存する凝集剤由来の物質濃度、即ち、ろ過損失水頭の発生量と相関が高い吸引ろ過時間指標(STI: Suction Time Index)をも加えて評価すべきこと、濁質の最適な処理を実現する最適攪拌強度Gr値は凝集剤の種類によって異なり、その値を最適化して凝集沈澱及び急速ろ過の処理性を改善すべきことなどを提唱している。

本論は、そうした基礎的な観点から、塩化第二鉄(以後、PSI-0)、及びこれに上述の珪酸のモル比(Si・Fe 比)を変えて調整した3種類のPSIを用いた場合におけるカオリン濁質の処理性を把握し、さらに処理性の改善方法を明確化することを目的として検討を行った。

2. 実験方法及び条件

1) 実験用原水及び試料の調整

本論では、通常のジャーテスターより大きな攪拌強度を発生させうる新規に開発した凝集沈殿実験装置(図-1)、及び急速ろ過プロセスの全工程を備えた連続流の実験装置(図-2)を用いて凝集沈殿・ろ過実験を行った。前者の実験には、本学水道水に所定量のカオリンを加えて試料水とした。また、後者の実験には、北見市広郷浄水場浄水にカオリン5mg/Lを加えた試料水を用いて実験を行った。なお、全ての実験は水温20℃で行った。

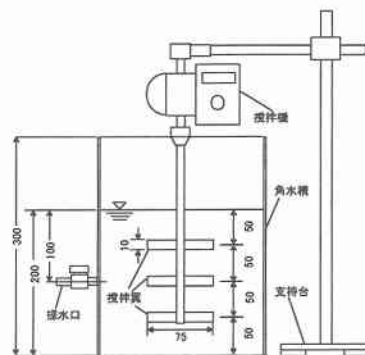
2) 凝集剂

凝集剤としては、重合珪酸を含まない塩化第二鉄、及び重合珪酸を以下に説明する割合で導入した3種類の PSI、即ち、Si・Fe 比が 1:0.5(主成分の濃度:Fe₂O₃:2.9%、SiO₂:1.1%、以下、PSI-0.5)、1:1 (同:2.9、同:2.2、以下、PSI-1)、1:3 (同:1.0、同:2.2、以下、PSI-3)の4種類を用いた。PSI-0(FeCl₃)については、FeCl₃ 溶液(37.5%)を予め

蒸留水で希釈したものを、その他の PSI については、各溶液を所定濃度に希釈したものを、いずれも pH1.5 に調整して実験に使用した。

3) 実験装置及び実験方法

凝集沈殿実験装置は、矩形の水槽（縦 200mm×横 200mm×高さ 300mm）及び攪拌機（10～800rpm に設定可能）などから成



圖一 1 凝集沈殿實驗裝置

式で算出された。

$$G = \{C \cdot A \cdot v^3 / (2 \cdot \gamma \cdot V)\}^{0.5} \dots (1)$$

ここで、C：攪拌係数(1.5 を採用)、A：攪拌翼の面積(m²)、v：攪拌翼の平均速度(m/sec)、 γ ：動粘性係数(m²/sec)、V：攪拌槽容量(m³)

凝集実験は、水槽に前述の試料水を 8L 入れ、これに所定量の凝集剤を注入した後、急速攪拌(G_R 値 $60 \sim 1500s^{-1}$ 、 T_R 値 5min)、緩速攪拌(G_S 値 $20s^{-1}$ 、 T_S 値 20min)、40min 静置(表面負荷率: $0.25cm/min$)の条件下で行い、上澄水を

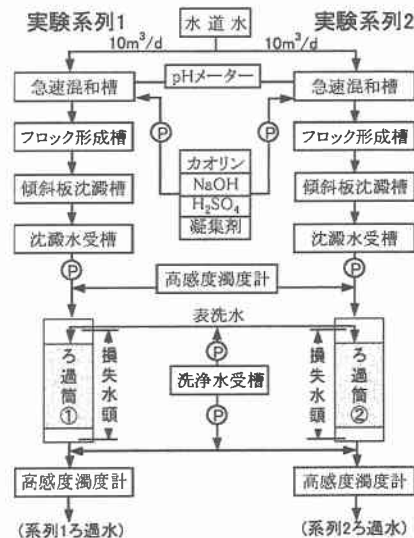


図-2 急速ろ過プロセス実験装置

採水して水質分析に供した。凝集 pH 値に関しては、1N-HClまたは1N-NaOHを用いて、予備実験より最適であると判断された pH6.3±0.1 に設定した。

連続流の凝集沈澱・急速ろ過実験については、図-2 に示す急速ろ過プロセス用実験装置を用いて実験を行い、その条件については、凝集実験の際と同様である。

4) STI の測定及び処理水水質の分析

吸引ろ過試験の手順は、吸引ろ過装置(減圧容器、減圧用フィルターホルダー、吸引ポンプ:真空到達度 26.7kPa)を用いて、試料 500mL のろ過時間を測定した。この際のメンブランフィルターの孔径は 0.45 μm であった。STI (Suction Time Index)は、ろ過抵抗の指標となるものであり、以下の式(2)から算出される。なお、基準とした蒸留水(20 ± 0.1℃)の吸引時間は 63sec であった。

STI 値(無次元) = $\frac{\text{試料水 500mL の吸引時間(sec)}}{\text{蒸留水 500mL の吸引時間(sec)}} \cdots \cdots (2)$

STI を測定する際にメンブランフィルター上に捕捉された重合ケイ酸の濃度についてはモリブデン黄法で、処理水の鉄濃度については、1,10-フェナントリンによる吸光光度法で定量した。

3. 実験結果及び考察

1) 凝集沈澱による処理性及びその高効率化

図-3 は、各 PSI を用いた場合における、Gr 値を 150 から 1500s⁻¹まで段階的に上昇させた時の凝集沈澱処理の結果を示している。なお、この時における注入率はいずれの PSI の場合についても、2.0mg・Fe/L である。

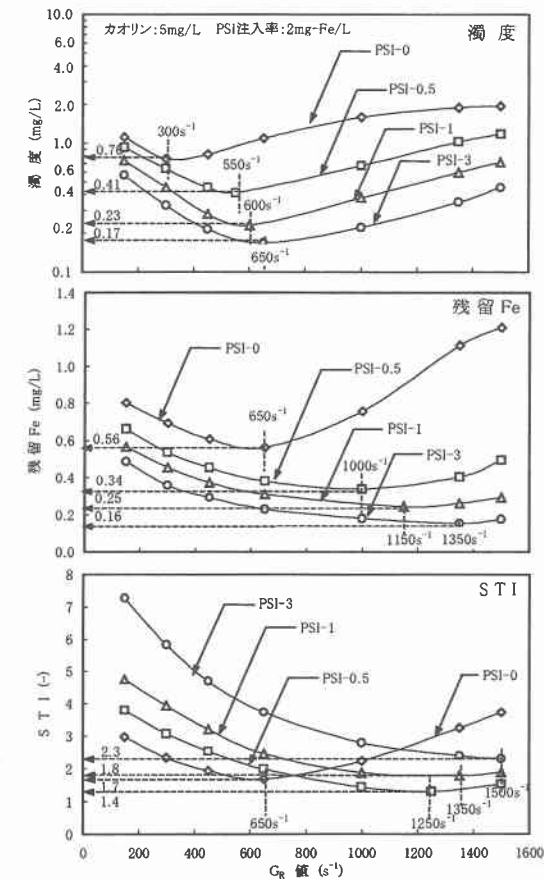


図-3 Gr 値に伴う処理性

同図における処理水の濁度は、いずれの Gr 値を採用した場合にも、Si・Fe 比が 0 から 3 へと高い凝集剤を使用するにつれ低下している。したがって、濁質処理の高効率化を図るには、Si・Fe 比の高い凝集剤を採用することが適当である。また、いずれの凝集剤を用いた場合にも、Gr 値の上昇に伴う処理水濁度の推移パターンは、当初は低下して行くが、最低値に達した後は上昇に転ずる。

これら動きで注目すべきは、いずれの凝集剤を用いた場合にも処理水濁度が最低となる Gr 値、即ち、最適 Gr 値が存在していることである。それらの値は、Si・Fe 比が高い PSI ほど強撹拌の方向に移動して出現(PSI-0 では 300s⁻¹付近、PSI-0.5、・1、・3 ではそれぞれ 550、600、650s⁻¹付近)している。このことは、同じ凝集剤 PSI であっても、Si・Fe 比が異なれば最適 Gr 値も異なることを示している。

ついで、処理水に残留する鉄濃度の動きを見ると、Si・Fe 比の上昇に伴う処理性及び Gr 値の上昇に伴う推移型は濁度と同じ傾向をとるが、鉄濃度が最低となる最適 Gr 値だけは異なっている。即ち、鉄濃度に関する最適 Gr 値は、濁度に対する最適 Gr 値よりも撹拌強度が高い領域で出現しており、PSI-0、・0.5、・1、・3 を用いた場合、それぞれ 650、1000、1150、1350s⁻¹ 付近となっている。また、これらの最低 Gr 値における鉄濃度は、0.56(除去率 72.0%)、0.34(83.0)、0.25(87.5)、0.16(92.0)である。

これらに比べ、Si・Fe 比の上昇に伴う STI の最適 Gr 値は、濁度及び鉄濃度の場合よりもさらに高い領域で出現している。即ち、PSI-0 を用いた場合には Gr 値 650s⁻¹、PSI-0.5、・1 では 1350s⁻¹ 付近、PSI-3 を用いた場合には 1500s⁻¹ 付近にある。STI の動きで注目すべきは、Si・Fe 比が大きい PSI を用いた場合ほど、処理水の STI が高くなっている点である。即ち、PSI-0 の最適 Gr 値 650s⁻¹における STI は、Si・Fe 比の上昇に伴って順に 1.7、2.0、2.5、3.7 と高くなり、PSI-3 では PSI-0 の 2.2 倍も高くなっている。

したがって、Si・Fe 比の大きな凝集剤を使用すると、濁質の処理性は高まるが、後続のろ過において損失水頭の上昇、ろ過継続時間の短縮を招くこととなる。

図-4 は、このような STI の動きに影響する因子を明確にするために、鉄濃度及びシリカ濃度を変動させて調整した試料を対象に、Gr 値 150s⁻¹で 10 分間の急速撹拌のみを行い、その直後の STI を測定した時の STI と珪酸濃度との関係を示したものである。同図より、鉄濃度が同一であってもシリカ濃度が増加すれば STI は上昇することがわかる。例えば、鉄濃度が 0.6mg/L と同一であっても珪酸濃度が 0.42 と 1.71 と異なれば、STI も順に 4.3、10.1 と異なり、前者に比べ後者

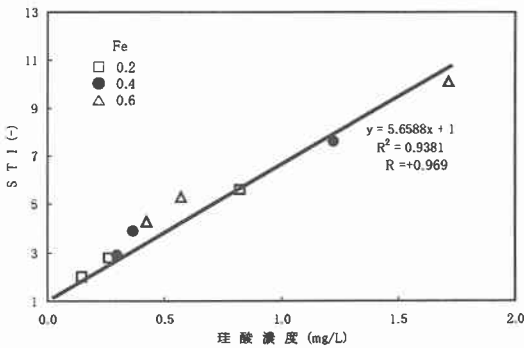


図-4 鉄及びシリカ濃度に伴う STI

は 2.4 倍も高くなることとなる。したがって、図-3 で見たように、濁度及び鉄濃度が低下したのとは逆に STI が上昇したのは、凝集剤中に含まれる珪酸と判断される。

2) 急速ろ過による処理性

急速ろ過プロセス用実験装置を用いて行った実験結果を表-1、2 に掲げる。これらの実験で採用した Gr 値は、150s⁻¹ 及び濁度処理に対して前述の実験で得られた最適値である。

最初に、ろ過損失水頭(ろ過 12hrs 後)については、いずれの凝集剤を用いた場合にも、Gr 値を最適化することにより STI は低下し、損失水頭は低く抑えられている。損失水頭の抑制効果が最も大きかった PSI-3 を用いた場合には、Gr 値を 150→650s⁻¹ に上昇させると損失水頭は 183.5→122.7cm(改善率 33.1%)へと低下している。しかしながら、Gr 値を最適化させて沈澱処理を行っても、Si・Fe 比が大きい PSI を使用した場合には、依然として損失水頭の発生量は大きい。これは、前述の STI の動きからも分かるように PSI 由来の重合珪酸が損失水頭の発生に大きく影響するからである。したがって、沈澱処理水中の濁度または Fe 濃度を十分に低下させても、凝集剤由来の重合珪酸が多量に残留する状況では、損失水頭の大幅な抑制が困難となるため、砂ろ過池の段階でなんらかの対策を講ずることが必要となる。

ついで、沈澱処理水の水质を見ると、いずれの凝集剤を用いた場合にも Gr 値 150s⁻¹ から最適 Gr 値にすることにより、いずれの項目についても改善されているが、Gr 値を最適化した沈澱処理水をろ過した場合には、ピーク濁度の上昇が見受けられた。

表-1 急速ろ過プロセス用実験装置における凝集沈澱処理の結果

凝集剤	Gr 値 (s ⁻¹)	濁度 (mg/L)	Fe (mg/L)	STI (-)
PSI-0	150	2.86	1.29	3.0
	300	2.08 (27.3)	0.72 (44.2)	2.6 (13.3)
PSI-0.5	150	1.24	0.89	2.8
	550	1.03 (16.9)	0.69 (22.5)	2.0 (28.6)
PSI-1	150	1.11	0.69	3.6
	600	0.88 (20.7)	0.52 (24.6)	2.2 (38.9)
PSI-3	150	0.75	0.58	7.2
	650	0.46 (38.7)	0.26 (55.2)	4.3 (40.3)

カッコ内は Gr 値 150s⁻¹ の値を基準にした改善率(%)

表-2 急速ろ過プロセス用実験装置におけるろ過処理の結果(有効径: 0.60mm)

凝集剤	Gr 値 (s ⁻¹)	ろ過0~2時間		ろ過2~12時間		損失水頭 (cm)
		ピーク濁度 (mg/L)	平均濁度 (mg/L)	平均濁度 (mg/L)	平均 Fe (mg/L)	
PSI-0	150	0.041	0.019	0.057	0.08	54.3
	300	0.093 (-126.8)	0.028 (-47.4)	0.024 (57.9)	0.03 (63.6)	52.1 (4.1)
PSI-0.5	150	0.040	0.013	0.009	0.01	68.5
	550	0.065 (-62.5)	0.012 (7.7)	0.002 (77.8)	0.01 (0.0)	60.7 (11.4)
PSI-1	150	0.022	0.012	0.016	0.02	111.8
	600	0.041 (-86.4)	0.011 (8.3)	0.003 (81.3)	0.01 (22.2)	77.6 (30.6)
PSI-3	150	0.021	0.014	0.050	0.02	183.5
	650	0.027 (-28.6)	0.011 (21.4)	0.013 (74.0)	0.01 (50.0)	122.7 (33.1)

カッコ内は Gr 値 150s⁻¹ の値を基準にした改善率(%)
損失水頭については、ろ過 12hrs 後

次に、ろ過 2~12hr の平均濁度については、いずれの凝集剤を用いた場合においても、ピーク濁度の場合とは異なり、Gr 値を最適化した方が低下している。他方、沈澱処理水の STI が最も高かった PSI-3 を用いた場合には、ろ過 12hrs 以内で早くも濁質の終期漏出が認められた。しかしながら、PSI-0.5 と PSI-1 とでは、平均濁度及び平均 Fe のいずれも良好な結果が得られている。

以上の結果より、PSI を用いた濁質処理においては、その処理が凝集沈澱までの場合には Si・Fe 比が高い凝集剤の採用が、また凝集沈澱後にろ過を行う場合には Si・Fe 比が低い凝集剤の採用が有効と考えられる。

3) 大きな径のろ材の採用による損失水頭の抑制

Si・Fe 比が大きい PSI ほど、凝集沈澱による濁質及び Fe の処理効率を高める上で効果を発揮するが、処理水中の STI が上昇することは避けられない。Gr 値の最適化で STI を低下させたとしても依然 STI は高く、処理がろ過プロセスに移ると、損失水頭の上昇、継続時間の短縮などを招く。

そこで、PSI の採用にあたっては、STI がある程度大きな沈澱処理水の場合でも、ろ過損失水頭を抑制しうする方法を示しておくことが必要である。

ろ過損失水頭を抑制しうする方法の一つとして、阻止確率(ブロック径 Dp/ろ材径 Dm)を小さくすることが挙げられる。即ち、ろ材の径を大きくすることにより、ろ材表面上における抑留の推移速度を遅くすることである。ここでは、珪砂の有効径を増加(0.60→0.84mm)することにより、ろ過損失水頭の抑制効果を確認する。

表-3 は、表-2 中の PSI-1 と PSI-3 における沈澱処理水を、有効径を変えてろ過処理した結果を示している。いずれの凝集剤を用いた場合にも大きな有効径を採用することにより、表-2 と同様に、ろ過 0~2hrs のピーク濁度および平均濁度、ろ過 2~12hrs の Fe 濃度は若干上昇しているが、平均濁度は十分に改善されている。

ついで、表-4 はろ過終了時(ろ過 12hrs 後)におけるろ層上部で発生した損失水頭の動きをろ材径ごとにまとめたものである。同表より、PSI-1 及び 3 のいずれも損失水頭の割合は、ろ層 0~10cm 間においてはろ材径 0.84mm、10~20cm 間においてはろ材径 0.60mm の方が低くなっている。

表-3 珪砂の径の上昇に伴うろ過水水质の動き

凝集剤	有効径 (mm)	ろ過0~2時間		ろ過2~12時間	
		ピーク濁度 (mg/L)	平均濁度 (mg/L)	平均濁度 (mg/L)	平均 Fe (mg/L)
PSI-1	0.60	0.041	0.011	0.003	0.01
	0.84	0.122 (0.036)	0.036 (0.036)	0.003 (0.003)	0.04 (0.04)
PSI-3	0.60	0.027	0.011	0.013	0.01
	0.84	0.094 (0.028)	0.028 (0.028)	0.007 (0.007)	0.03 (0.03)

表-4 珪砂の径の上昇に伴う損失水頭の動き

凝集剤	有効径 (mm)	総損失 0~60	ろ層の深さ (cm)			
			0~5	5~10	10~15	15~20
PSI-1	0.60	77.6	33.9 (43.7)	34.0 (43.8)	5.6 (7.2)	2.2 (2.8)
	0.84	36.3	13.7 (37.7)	14.4 (39.7)	4.3 (11.8)	1.5 (4.1)
PSI-3	0.60	122.7	57.5 (46.9)	56.2 (45.8)	5.3 (4.3)	1.4 (1.1)
	0.84	63.6	28.7 (45.1)	25.7 (40.4)	5.4 (8.5)	1.3 (2.0)

カッコ内は総損失に対する割合(%)

このことは、有効径を 0.60 から 0.84mm に大きくすると濁質の抑留はろ層内に分散されることを示している。

このように、有効径を大きくすれば、損失水頭が大幅に抑制されるが、それに伴って水質が悪化することとなる。

4) 薄い熱成層の形成による濁質の漏出抑制効果

ろ過損失水頭を抑制するために、ろ材径を上昇させてろ過を行うと、ろ過初期(0~2hrs)におけるろ過水濁度が僅かではあるが上昇することは前述の通りである。

ろ過初期(0~2hrs)の漏出濁度を抑制するためには、既に報告した凝集剤被覆法及び凝集剤注入法、また、低ろ速スタート法などが有効である。ここでは、これら方法と同様に有効と考えられる熱成層導入ろ過を行い、GR 値及びろ材径の上昇時において初期漏出が大きくなるが、これに伴うピーク濁度の抑制を試みた。

図-5 は、PSI-0.5 と PSI-1 を用いた場合の沈澱処理水を対象に、ろ速 240m/d の急速ろ過(有効径: 0.60mm 及び 0.84mm)と熱成層導入ろ過(同 0.84mm)とにおける初期漏出期の濁度の動きを示している。なお、後者については、ろ過開始前にろ速 20m/d で 20 分間通水し、ろ層上部に薄い熱成層を形成しろ過を行った。

同図より、熱成層導入ろ過を併用した場合には、いずれの PSI を用いた場合にもピーク濁度は抑えられており、有効径 0.60 mm に比べ、PSI-0.5 の場合では 0.050 mg/L(改善率 57.1%)、PSI-1 の場合では 0.030mg/L(同 76.9%)抑制されている。また、ろ過初期の平均濁度についても同様に、PSI-0.5 の場合では 0.010mg/L(改善率 60.8%)、PSI-1 の場合では 0.010mg/L(同 75.1%)低くなった。以上の結果より、損失水頭を抑制するためにろ材径を大きくすると、ろ過初期における漏出濁度は上昇するが、熱成層導入ろ過を併用させることで、急速ろ過(0.60 及び 0.84mm)の場合よりも、ピーク濁度及びろ過

初期の平均濁度は大幅に抑制されることが分かった。

4. ま と め

今回、Si・Fe 比が異なる 4 種類の PSI を用いた濁質の凝集沈澱・ろ過の処理性を検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) PSI 中の Si・Fe 比は凝集沈澱の処理性を大きく左右し、この比が高い PSI を用いた場合処理水の濁度及び Fe 濃度は低く、逆にこの比が低い PSI 使用の場合ほど処理水の STI は低くなる。
- 2) PSI を用いた濁質処理においては、その処理が凝集沈澱までの場合には Si・Fe 比が高い凝集剤の採用が、また凝集沈澱後にろ過を行う場合には Si・Fe 比が低い凝集剤の採用が有効と考えられる。
- 3) STI の高い沈澱処理水を砂ろ過処理する場合の損失水頭については、ろ材径を大きくすることで大幅に抑制できる。また、それに伴い初期漏出期及び清澄安定期の濁度は若干上昇するが、ろ過初期に短時間の低速ろ過でろ層上部に薄い熱成層を形成することによって、ろ過水濁度を改善できる。
- 4) GR 値の最適化、即ち GR 値の上昇に起因するピーク濁度の増加は、熱成層導入ろ過を併用することにより大幅に改善することができ、同時に平均濁度の低減化にも有効であった。

5. あと が き

一連の実験に協力いただいた北見市広郷浄水場の萩下隆係長及び高畑征夫係長、北見工業大学上下水道研究室の輪島秀則技官及び学生各位に感謝の意を表す。

【参 考 文 献】

- 1) 海老江 邦雄、東 義洋、山木 暁:凝集沈澱の処理性改善に関する基礎的研究－GR 値の上昇による濁度と STI の低減化－、水道協会雑誌、816 号、pp.11～21(2002.9)
- 2) 長谷川 孝雄、鬼塚 卓也、江原 康浩、橋本 克紘、丹保 憲仁:新しい無機高分子凝集剤の研究(IV)－有効成分濃度の向上と保存安定性の改善－、第 43 回全国水道研究発表会講演集、pp.163-165(1992.5)
- 3) 海老江 邦雄、東 義洋、山木 暁、浅香 博則、萩下隆:鉄系凝集剤による河川表流水中の濁質・フミン質の凝集沈澱処理、平成 12 年度土木学会北海道支部論文報告集、pp.1020-1023(2001.2)
- 4) 長谷川 孝雄、鬼塚 卓也、江原 康浩、橋本 克紘、丹保 憲仁:新しい無機高分子凝集剤の研究(III)－重合ケイ酸のゼータ電位－、第 42 回全国水道研究発表会講演集、pp.193-195(1991.5)
- 5) 海老江 邦雄、李 宰昊、張 一憲:凝集剤被覆ろ過の有効性に関する基礎的研究、水道協会雑誌、第 798 号、pp.8～20(2001.3)
- 6) 海老江 邦雄、張 一憲、山田 直之、川口 倫由:低ろ速スタート法による初期漏出濁度の抑制機構とその効果、第 53 回全国水道研究発表会講演集、pp.170-171(2002.5)

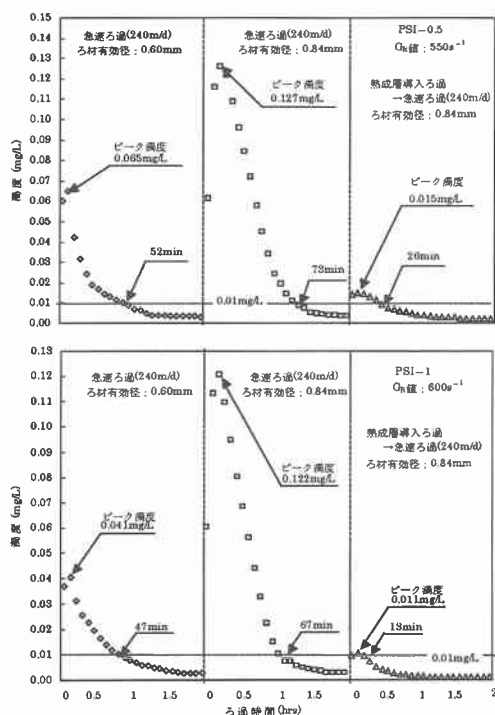


図-5 熱成層導入によるピーク濁度の低減化