

低速スタートろ過法によるろ過水濁度の低減化に関する研究

Improving Effluent Turbidity by Rapid Sand Filtration with Low Flowrate Start

北見工業大学 フェロー 海老江 邦 雄 (Kunio Ebie)
 " 学生員 ○張 一 憲 (Il-hun Jang)
 " 学生員 山 田 直 之 (Naoyuki Yamada)
 " 学生員 樋 口 真 也 (Shinya Higuchi)

1. ま え が き

近年、クリプトスポリジウム原虫の流出事故が契機となって、最終工程である砂ろ過処理の粒子分離効率の大幅な改善が緊急課題となっている。クリプトスポリジウム原虫が危惧されている水源から取水する場合には、ろ過水濁度を 0.1mg/L 以下に抑制しなければならない。これを達成するには、ろ過安定期における水質レベルの向上は勿論のこと、ろ過開始直後の初期漏出濁度をいかに抑制するかが重要となる。

著者らは、初期漏出濁度の抑制に関しては、ろ過開始前後において、ろ層内の熟成を早期に達成する技術の導入が必要となることから、ろ過池流入水中の粒子のゼータ電位を調整することを目的とした凝集剤再注入法、ろ材表面のゼータ電位を調整することを目的とした凝集剤被覆法、低速スタートろ過法などを報告してきた。その中で、低速スタートろ過法に関しては、粒子の抑留がろ層の上層部に限定され、ろ層の薄い表層部が早期に熟成することが抑制効果に繋がっている。同法に関しては、初期漏出濁度の抑制だけではなく、その後に続く安定期の濁度抑制にも有効であることを報告した。

今回は、低速スタートろ過法の継続時間と PAC 注入の組み合わせによるろ過性能の改善、ろ過水濁度を 0.1mg/L 以下に抑制するために必要な PAC 注入量などについて検討した結果を報告する。

2. 実験方法および実験条件

2.1 実験方法

実験には、図 1 に掲げるような、直接ろ過システムを採用したベンチスケールのろ過装置を使用した。未ろ水としては、北見工業大学水道水を用い、これに 1mg/L のカオリン（平均濁度 1.48mg/L ）を加えて原水とした。

この原水に含まれる径 $0.5\sim 1.0$ 、 $1.0\sim 3.0$ 、 $3.0\sim 7.0$ および $7.0\ \mu\text{m}$ 以上の粒子数を微粒子アナライザー付きの高感度濁度計（ZYU、富士電機製）で測定したところ、径が小さい粒子から順に $1,682,802$ (95.83%)、 $64,611$ (3.68%)、 $8,319$ (0.47%)、 359 (0.02%) 個/mL となった。括弧内の数値は粒子数の割合を示している。

また、凝集剤としては PAC を用いた。実験では上述の原水に所定量の PAC を注入後、所定の急速攪拌（攪拌強度 150sec^{-1} 、攪拌時間 5 分）を施した後、この微フロックを含む未ろ水を、珪砂（有効径 0.61mm 、均等係数 1.39、比重 2.60）を厚さ 60cm （空隙率 44.3% ）に充填したろ過

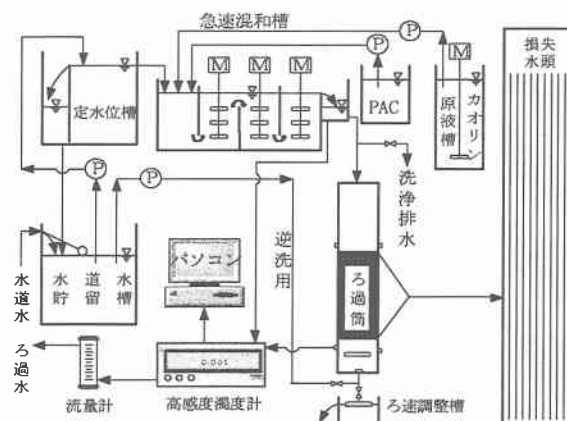


図1 直接ろ過に関する実験装置のフロー

筒に導き、所定のろ過速度で2～5時間のろ過を行なっている。

ろ過実験中は、未ろ水およびろ過水の濁度を微粒子アナライザー付きの高感度濁度計で測定した。損失水頭については、ろ層 5cm 毎に経時の値を測定した。また、ろ層内の抑留濁質量については、直接採砂・ジャーテスト法で（一定量の試料をろ層から採取、これを水中に懸濁させた後、一部試料の濁度を測定）定量した。

2.2 低速スタートろ過の継続時間とろ速の変動回数

低速スタートろ過法におけるろ速変動の継続時間については、今回用いた実験装置の場合、ろ過水ピーク濁度がろ過開始から20分前後に現れ、その後、徐々に低下するため、ろ過水濁度ピークの前後20分が初期漏出に与える影響が最も大きいと考える。そこで、ろ過開始から40分間、ろ速を変動することとした。また、ろ速の変動回数については、次の結果から決定した。

図2は最終ろ速を 360m/d と設定し、ろ過開始からの40分間を1段（ 360m/d ）から9段（ 40m/d ）のろ速に分割したろ過におけるろ過1時間のろ過水濁度を示している。ろ速及び時間の分割によるろ過水濁度の改善効果は、いずれの PAC 注入率においても、分割数が3までにおいて高く、それ以上は改善効果の増加量が小さいため、ろ過開始からの40分間、ろ速を3分割で上昇させ、その後は一定なろ速でろ過を行った。すなわち、最初の20分間を最終ろ速の $1/3$ のろ速、つぎの20分間を最終ろ速の $2/3$ のろ速でろ過を行い、その後はろ過終了時間まで最終ろ速で運転した。この方法に従った場合の処理水の減少量はいずれの場合にも最終ろ速20分相当量となる。

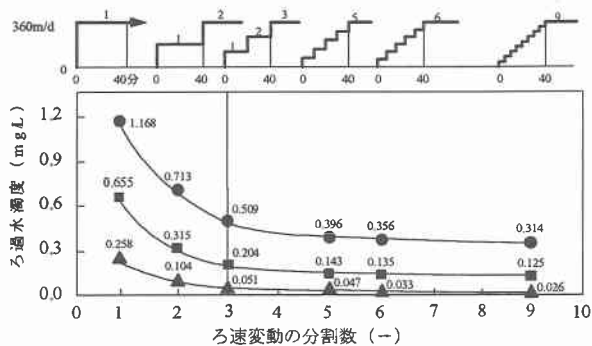


図2 低速スタートろ過の分割によるろ過開始から1時間までの平均ろ過水濁度の変化

3. 結果 および 考 察

3.1 低速スタートろ過におけるろ過性能

図3は、カオリン1mg/L、PAC 1、2または3mg/L注入の未ろ水を対象に低速スタートろ過を行なった結果を示している。

ろ過初期のピーク濁度の動きを見ると、ろ速 120m/dの定速ろ過では、いずれのPAC注入率においてもピーク濁度は0.1mg/Lを超えているが、低速スタートろ過法を採用するといずれのPAC注入率においても0.1mg/L以下となり、PAC注入率3mg/Lではピークは完全に消失している。ろ速 240m/dの場合にはPAC注入率2mg/Lで、ろ速 360m/dの場合にはPAC注入率3mg/Lでピーク濁度が0.1mg/L以下に抑制されている。また、0～1時間のろ過水濁度改善率は、それぞれのろ速において84.2（平均濁度1.028→0.162mg/L）、89.5（同0.822→0.086mg/L）、及び95.4%（同0.658→0.030mg/L）となっている。

ろ過水濁度がほぼ安定になっているろ過 4～5 時間においても、ろ過水濁度はろ速 120m/dでPAC1mg/Lの場合には81.0%（0.058mg/L→0.011mg/L）、ろ速 360m/dでPAC3mg/Lの場合には95.2%（同0.124→0.006）に低下している。

ろ過 5 時間における損失水頭は、ろ速 120m/d、PAC1mg/Lの場合には定速ろ過より0.1cm（0.1→0.2cm）、ろ速 360m/d、PAC3mg/Lの場合には1.5cm（11.0→12.5cm）の僅かな増加となった。これらのことから、低速スタートろ過の採用は、損失水頭を増加させず初期漏出を有効

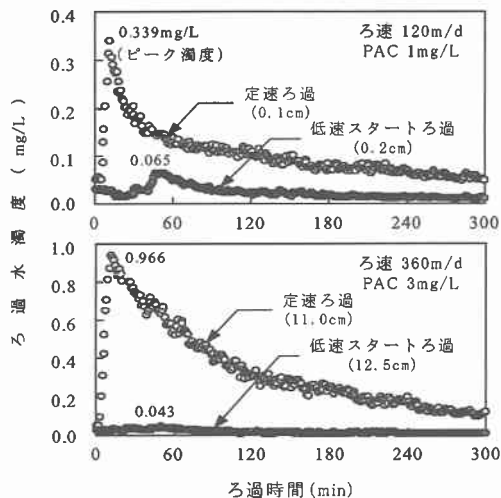


図3 PAC注入率に伴うろ過水濁度の変化（括弧内はろ過5時間の損失水頭）

に抑制できることが分かった。

LeChavallier と Norton は 5 μm 以上の粒子と濁度、Cryptosporidium、及び Giardia との相関を見出し、5 μm 以上の粒子の除去はこれらの微生物の除去を意味すると報告している。表1と表2に一例としてろ速 120m/dの場合のろ過開始から1時間と4～5時間におけるろ過水中の粒子の径と個数の動きを示した。

ろ過水濁度の動きから推測されるように、低速スタートろ過が定速ろ過より、また PAC 注入率が高い場合ほど大きな効果が現れている。特にろ材表面の熟成がキープインとなるろ過 1 時間までは、クリプト原虫と関連する 3 μm 以上の大きな粒子の除去に低速スタートろ過が効いている。PAC 注入しない場合と比較すると、径 3.0～7.0 μm の粒子の除去率は定速ろ過は 59.3%であったが、低速スタートろ過では 98.6%となり、7.0 μm 以上の粒子径の場合には 64.3%、99.7%となり、大きな粒子ほど大きな効果が現れている。さらに、低速スタートろ過の場合には、いずれの PAC 注入率においても径 7.0 μm 以上の粒子の除去率はほぼ 100%となっており、大きな改善効果が認められる。

また、ろ過 4～5 時間においては、低速スタートろ過の場合、7 μm 以上の粒径については、いずれの PAC 注入率においても 0 個/mL となり、完全に抑制されている。3.0～7.0 μm の粒子については、定速ろ過の場合には除去率が 93.7～99.3%であったが、低速スタートろ過の場合には、99.0%以上の高い除去率が得られ、クリプトスポリジウム原虫の除去についても、低速スタートろ過の有効性が確認された。

表1 ろ過水中の濁質粒子数(個/mL)及び除去率(%)
(ろ過0～1時間の平均、ろ速 120m/日の場合)

	PAC (mg/L)	濁度 (mg/L)	粒子の径(μm)			
			0.5～ 1.0	1.0～ 3.0	3.0～ 7.0	>7.0
定速ろ過	0	0.387 (73.9)	—	24,511 (62.1)	6,389 (59.3)	128 (64.3)
	1	0.176 (88.1)	—	10,351 (84.0)	1,813 (78.2)	34 (90.5)
	3	0.074 (95.0)	64,945 (96.1)	4,985 (92.3)	671 (91.9)	5 (98.6)
低速ろ過	0	0.057 (96.1)	36,089 (97.9)	1,132 (98.2)	113 (98.6)	1 (99.7)
	1	0.033 (97.8)	21,028 (98.8)	987 (98.5)	92 (98.9)	0 (100.0)
	3	0.015 (99.0)	8,415 (99.5)	352 (99.5)	30 (99.6)	0 (100.0)

表2 ろ過水中の濁質粒子数(個/mL)及び除去率(%)
(ろ過4～5時間の平均、ろ速 120m/日の場合)

	PAC (mg/L)	濁度 (mg/L)	粒子の径(μm)			
			0.5～ 1.0	1.0～ 3.0	3.0～ 7.0	>7.0
定速ろ過	0	0.120 (91.9)	82,988 (95.1)	4,489 (93.1)	521 (93.7)	16 (95.5)
	1	0.058 (96.1)	59,778 (96.4)	3,381 (94.8)	411 (95.1)	9 (97.5)
	3	0.008 (99.5)	8,098 (99.5)	731 (98.9)	60 (99.3)	0 (100.0)
低速ろ過	0	0.029 (98.0)	16,257 (99.0)	918 (98.6)	85 (99.0)	0 (100.0)
	1	0.011 (99.3)	6,931 (99.6)	576 (99.1)	48 (99.4)	0 (100.0)
	3	0.001 (99.9)	2,329 (99.9)	85 (99.9)	2 (99.9)	0 (100.0)

(主) 括弧内の除去率 (%) は原水中の粒子数を基準

3. 2 低速スタートろ過におけるピーク濁度と PAC 注入率

図 4 及び表 3 は、ろ過水濁度が 0.1mg/L 以下になるために必要な過開始から 40 分間の PAC 供給量を示している。

ろ速 120m/d における定速ろ過の場合には、PAC 供給量 100.8mg (6mg/L の濃度で 40 分間した量に対応) でピーク濁度は 0.077mg/L となった。これに対し、低速スタートろ過を採用した場合には、PAC 供給量 5.6mg (1mg/L の濃度で 40 分間ろ過した量に対応) でピーク濁度が 0.056mg/L となり、後者における PAC 供給量は定速ろ過の 1/18(注入率では 1/6)であった。さらに、PAC 注入量 16.8mg の場合にはピーク濁度が完全に抑えている。

すなわち、ピーク濁度を 0.1mg/l 以下に抑える PAC 量の約 3 倍を供給すれば、ピーク濁度を完全に抑えることができる。

ろ速 240 と 360m/d の場合にも、低速スタートろ過は 28.0 (1.7mg/L の濃度で 40 分間ろ過した量) と 89.0mg (3.2mg/L の濃度で 40 分間ろ過した量) で、定速ろ過の 378.0mg (11.3mg/L の濃度で 40 分間ろ過した量) と 831.6mg (16.5mg/L の濃度で 40 分間ろ過した量) の 1/13.5 (同 1/6.6) と 1/9.3 (同 1/5.2) となっている。

これらの結果はろ層全体に供給した PAC で計算したものであるため、つぎの表 4 に PAC で作ったフロック (pH7) を 40m/d のろ速で通過させ、ろ層上部だけ短時間に改善させた状況で、各ろ速のろ過結果を示した。

ろ層上部を改善させた場合には、ろ速 120m/d では僅か 3.0mg の PAC 供給量でピーク濁度は 0.1mg/L 以下となり、240 と 360m/d の場合には 12.0mg と 24mg の PAC 供給量で 0.1mg/L 以下となった。これらにおける PAC 供給量は、表 3 の定速ろ過に比べ、それぞれのろ速において 1/67.2、1/31.5、1/34.7 に減少している。

以上の結果、低速スタートろ過は損失水頭を増加させず、ろ過初期及び安定期におけるろ過水濁度の抑制効果が大きいことが分かった。また、ろ過水中の粒子の除去においても、高い効果を発揮することを確認した。

3. 3 低速スタートろ過におけるろ過性能の改善

図 5 は、ろ過開始から 40 分間におけるろ速の変動と時間とを変えた場合のろ過水濁度の動きを示している。

まず、ろ速の変動と時間を 20 分 (40m/d) → 20 分 (80m/d) にした場合にはろ過水のピーク濁度は完全に消失しているが、最初のろ速 40m/d を 20 分から 10 分にすると、ろ過水濁度のピークが現れている。また、2 段目の時間を 10 分と 15 分にした場合にもろ過水濁度のピークが現れ、ろ速 120m/d、PAC 注入率 3mg/L の場合には、20→20 分相当の時間が必要となることが分かった。

これは、ろ過開始時にろ過筒内にある逆洗水をろ速 120m/d でろ過するのに必要な時間が 20 分程度であるため、1 段目の時間を短くすると 2 段目のろ速における実質的なろ層の熟成が進行しないことによると考えられる。

低速スタートろ過ではろ過初期の短時間でろ層上層の薄い層に集中させることによりろ過水濁度の抑制効果が発揮されるため、時間を短くする代わりに PAC 注入量を増加させてもほぼ同じ効果が出るものと考えられる。そこで、低速スタートろ過の時間を短縮させるとともに

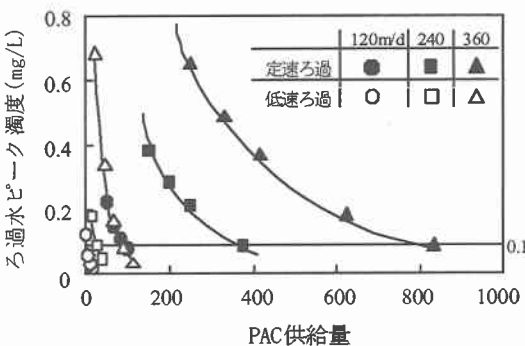


図4 ろ速別の供給 PAC 量とろ過水ピーク濁度

表3 ろ速別の供給 PAC 量とろ過水ピーク濁度(ろ層全体)

	120m/d		240m/d		360m/d	
	PAC 供給量 (mg)	ピーク 濁度 (mg/L)	PAC 供給量 (mg)	ピーク 濁度 (mg/L)	PAC 供給量 (mg)	ピーク 濁度 (mg/L)
低速スタートろ過	0	0.122	0	0.352	22.3	0.690
	5.6	0.056	14.0	0.177	44.5	0.345
	11.2	0.026	28.0	0.089	66.8	0.172
	16.8	0.012	42.0	0.045	89.0	0.086
	—	—	—	—	111.3	0.043
定速ろ過	50.4	0.224	151.2	0.380	249.5	0.655
	67.2	0.146	201.6	0.280	332.6	0.494
	84.0	0.106	252.0	0.206	415.8	0.373
	100.8	0.077	378.0	0.096	831.6	0.091

表4 ろ速別の PAC 供給量とろ過水ピーク濁度 (PAC フロックを 40m/d で通過した後)

120m/d		240m/d		360m/d	
PAC 供給量 (mg)	ピーク 濁度 (mg/L)	PAC 供給量 (mg)	ピーク 濁度 (mg/L)	PAC 供給量 (mg)	ピーク 濁度 (mg/L)
1	0.129	9	0.138	15	0.160
3	0.067	12	0.081	18	0.135
9	0.030	21	0.063	24	0.087
—	—	27	0.049	45	0.048

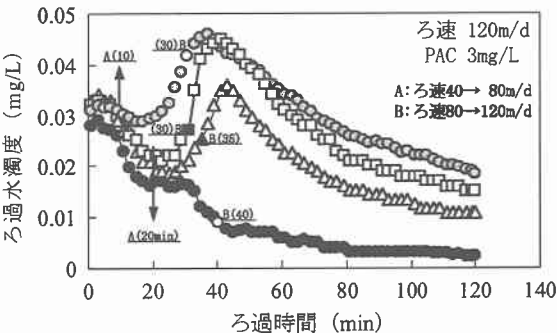


図5 低速スタートろ過の適用時間とろ過水ピーク濁度

PAC 注入率を増加させた実験を行い、結果を図 6 に示した。

ろ速 120m/d の場合には、最初のろ速 40m/d においてはろ過筒内の逆洗水を通して必要な時間が 20 分程度であるため、つぎのろ速 80m/d の時間 20 分を 10 分、及び PAC 注入量を 3mg/L から 6mg/L にしてろ過した。予想通りピーク濁度も完全に消失しており、その場合とほぼ同一の効果が現れている。この傾向は、高ろ速の

360m/dにおいても、第1段目は逆洗水を通過させる時間（ろ速 120m/d）の残り 13 分を 6 分にして PAC 注入を 2 倍してろ過、第2段目の 20 分（240m/d）についても、これを 10 分にして PAC 注入を 2 倍にしてろ過してろ過しているが、ほぼ同じ結果が得られた。

これらの結果から、同じろ速においてはろ過時間を短くするためには PAC 注入率を増加させる、すなわち、供給 PAC 量が同じ場合には、ほぼ同程度の効果が現れることがわかった。

図7は、ろ速 120m/d 及び 360m/d において、低速スタートろ過の時間（40 分：20-20 分）の後、PAC 注入率を減少させたときのろ過水濁度と損失水頭の動きを示している。

ろ速 120m/d の場合、PAC 注入率を 3mg/L から 1mg/L に減らしてもろ過水ピーク濁度は現れなかった。PAC を 9 mg/L 注入した場合、ろ過 40 分～5 時間までの平均ろ過水濁度は 0.0031mg/L であったが、PAC 注入率を 3mg/L にした場合には 0.0069mg/L となって 0.0038mg/L 増加しているが、両方とも非常に低い値であった。

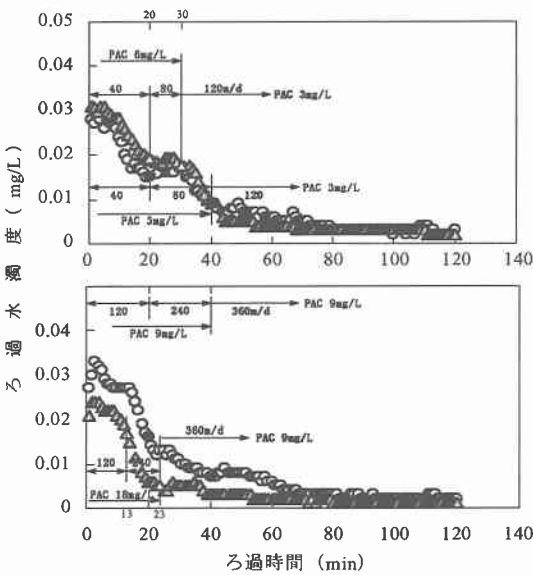


図6 低速スタートろ過の継続時間とPAC 供給量

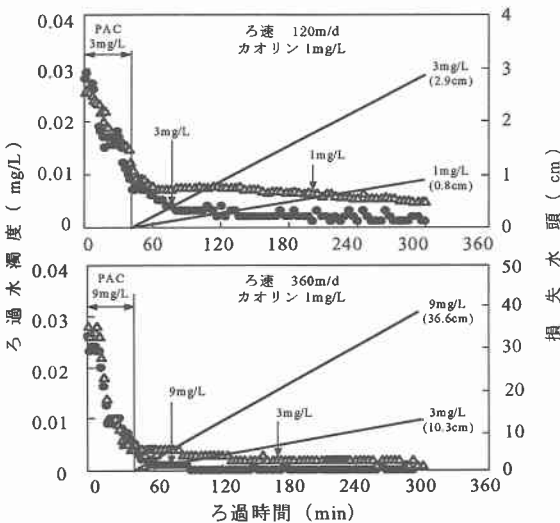


図7 PAC 注入率に伴うろ過水濁度と損失水頭

また、ろ速 360m/d の場合にも、ろ速 120m/d と同じ傾向が認められ、PAC 注入率 9mg/L、3mg/L の両方においてもピーク濁度は消失している。ろ過 40 分～5 時間までの平均ろ過水濁度は、PAC 注入率 9mg/L、3mg/L においてそれぞれ 0.0025mg/L、0.0005mg/L となった。

各ろ速及び PAC 注入率における損失水頭を見ると、ろ速 120m/d の場合、PAC 注入率を 3 から 1mg/L にすると損失水頭は 2.9cm から 0.8cm に 72.4%減少し、360m/d の場合にも 36.6cm から 10.3%に 71.9%減少した。

これらの結果から、低速スタートろ過の場合、ろ過初期（40 分間）に高濃度の PAC 注入率でろ層上部を改善すると、その後は低濃度の PAC 注入でもろ過水を大幅に改善することができること、さらに、PAC 注入率が低濃度であるため、損失水頭の低減化にも有効な技術であることが確認された。

4. ま と め

本研究で得られた知見は以下の通り。

- 1) 低速スタートろ過の採用は、損失水頭をほとんど増加させずに初期漏出濁度の抑制に有効であること、また、その効果は安定期にも繋がることを明らかにした。
- 2) ろ速 120m/d、PAC 注入率 3mg/L の低速スタートろ過の場合、クリプト原虫などと関係する径 3.0～7.0 μm、7 μm 以上の粒子の除去率は、ろ過初期（0～1 時間）はそれぞれ 99.6%、100%、安定期（4～5 時間）には 99.9%、100%となることを示した。
- 3) ろ過水濁度を 0.1mg/L 以下に抑制できる PAC 注入量は、ろ速 120m/d の場合には 5.6mg（注入率 1mg/L）、ろ速 360m/d の場合には 89.0mg 程度であった。さらに、これらの約 3 倍を注入すれば、ピーク濁度を完全に抑えることができた。
- 4) ろ速が同じ場合には、低速スタートろ過の継続時間を短くする代わりに PAC 注入量を増加させれば、ほぼ同じ効果が出ることを明らかにした。
- 5) ろ過初期（40 分間）に高濃度の PAC 注入率でろ層上部を改善されれば、その後は低濃度の PAC 注入でも非常に低い値のろ過水を生産することができる。この方法は損失水頭の低減化にも有効である。

＜ 参 考 文 献 ＞

1) 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.）

2) 海老江 邦雄・渋谷 真祐：直接砂ろ過における初期漏出濁度の抑制に関する研究、水道協会雑誌、第 63 巻、第 8 号（第 719 号）、pp.10～20（1994.8.）

3) 海老江 邦雄・土井 克哉：定速砂ろ過における凝集性フロックのろ層内挙動とろ過水水質の改善、水道協会雑誌、第 769 号、pp.25～35（1998.10.）

4) A. Amirtharajar and D. P. Wetstein：Initial degradation of effluent quality during filtration, Jour. of AWWA, Vol.79, No.9, pp.518～524（1980）