

表-1 H15 年度収集文献一覧

No.	著者名	所 属	論文タイトル	文献名	Vol.	No.	発行年
27	Z. Bukhari M. LeChevallier	American WaterWorks Service Company, Inc	Assessing UV reactor performance for treatment of finished water	Water Sciences and Technology	47	3	2003
28	R. L. Rajaja, M. Pulkkanen, M. Pessi H. Heinonen- Tanski	University of Kuopio	Removal of Microbes from municipal wastewater effluent by rapid sand filtration and subsequent UV irradiation	Water Sciences and Technology	47	3	2003
29	Markku J. Lehtola Ilkka T. Miettinen Terttu Vartiainen Panu Rantakokko Arja Hirvonen Pertti	National Public Health Institute	Impact of UV disinfection on microbially available phosphorus, organic carbon, and microbial growth in drinking water	WATER RESEARCH	37	5	2003
30	John E. Dyksen Marilyn M. Marshall Arun Gera Jennifer L. Clancy		Cost of advanced UV for inactivating crypto	J. AWWA	Sep		1998
31	Mr. Ben F. Kalisvaart	Berton UV-technik, The Netherlands	Photobiological effects of polychromatic medium pressure UV lamps	Water Science and Technology	43	4	2001
32	Harold B. Wright Yuri A. Layryshyn	Trojan Technologies Inc.	An assesment of the bioassay concept for UV reactor validation	Water Environment Federation			2000
33	Karl G. Linden Gwy-Am Shin Mark D. Sobsey	Department of Civil & Environmental Engineering, Duke University University of North Carolina	Comparative effectiveness of UV wavelengths for the inactivation of <i>Cryptosporidium parvum</i> oocysts in water	Water Science and Technology			2001
34	Marc-Oliver Buffle, Kuang-ping Chiu, Fariborz Taghipour	Trojan Technologies Inc.	UV reactor conceptualization and performance optimization with computational model	Water Environment Federation			2000
35	Gwy-Am Shin Karl Linden Mark D. Sobsey	University of North Carolina	Comparative inactivation of <i>Cryptosporidium</i> <i>parvum</i> oocysts and coliphage MS2 by monochromatic UV radiation	Water Environment Federation	43	12	2000
36	M. Otaki, A. Okuda, K. Tajima, T. Iwasaki, S. Kinoshita, S. Ohgaki	Ochanomizu University, University of Tokyo	Inactivation differences of microorganisms by low pressure UV and pulsed xenon lamps	Water Sciences and Technology	47	3	2003
37	Marilyn M. Marshall, Samuel Hayes, Jackie Moffett, Charles R. Sterling, and Wayne L. Nicholson	Department of Veterinary Science and Microbiology	Comparison of UV Inactivation of Spores of Three Encephalitozoon Species with That of Spores of Two DNA Repair-Deficient <i>Bacillus subtilis</i> Biosimetry Strains	Applied and environmental Microbiology	69		2003
38	W. B. Anderson, P. M. Huck, D. G. Dixon, and C. I. Mayfield	Department of Biology, University of Waterloo	Endotoxin Inactivation in Water by Using Medium- Pressure UV Lamps	Applied and environmental Microbiology	69		2003
39	Wayne L. Nicholson and Belinda Galeano	Department of Veterinary Science and Microbiology, University	UV Resistance of <i>Bacillus anthracis</i> Spores Revisited: Validation of <i>Bacillus subtilis</i> Spores as UV Surrogates for Spores of <i>B. anthracis</i>	Applied and environmental Microbiology	69		2003
40	J. L. Zimmer, R. M. Slawson and P. M. Huck	Department of Biology, University of Waterloo	Inactivation and potential repair of <i>Cryptosporidium parvum</i> following low- and medium- pressure ultraviolet irradiation	Water Research	37	14	2003
41	Ronald Gehr, Monika Wagner, Priya Veerasubramanian and Pierre Payment	Department of Civil Engineering, McGill University	Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater	Water Research	37	14	2003
42	Sigrid Peldszus, Susan A. Andrews, Rosana Souza, Franklyn Smith, Ian Douglas, Jim Bolton, Peter M. Huck		Effect of medium pressure UV irradiation on bromate concentrations in drinking water, a pilot- scale study	Water Research			2004
43	ETV Joint Verification Statement		Medium-pressure ultraviolet radiation technology used in drinking water treatment				2002
44	O. Hoyer		Testing Performance and monitoring UV system for drinking water disinfection	Water Supply	16		1998
45	Y. A. Lawryshyn B. Cairns		UV disinfection of water: the need for UV reactor validation	Water Supply	3	4	2003
46	G. E. Whitby G. Palmateer	Fischer & Porter (Canada) Limited	THE EFFECT OF UV TRANSMISSION, SUSPENDED SOLIDS AND PHOTOREACTIVATION ON MICROORGANISMS IN WASTEWATER TREATED WITH UV LIGHT	Water Science and Technology	27	3, 4	1993
47	James Dallan		Ultraviolet light in TOC reduction	Water Conditioning & Purification			2002
48	Nadia Abboud		Ultraviolet disinfection for small systems	Water Conditioning & Purification			2002
49	Ron Hallett		New Advances in UV water Treatment	Water Conditioning & Purification			2003
50	Eugen Nisipeanu, Muhammad Sami		Computer Simulation Optimizes Design of UV disinfection Reactors	Water Conditioning & Purification			2004

3. 文献のジャンル別分類

平成 15 年度に調査した文献を内容別に分類し、その概要を下記のとおり整理した。

なお、紫外線照射量と原虫類の不活化率のデータに関しては、H14 年度の調査結果も踏まえて表—2 に記載した。

表一2 紫外線による原虫類の不活化率

出典	対象	紫外線量 (mJ/cm ²)	不活化率	評価方法	ランプ
No.1	Cryptosporidium Parvum	123	0.2	DAPI/PI	中圧
		123	0	脱囊	中圧
		246	1.4	DAPI/PI	中圧
		246	2.0	脱囊	中圧
		246	>4.5	感染性	中圧
		19		DAPI/PI	中圧
		19		脱囊	中圧
		19	3.9	感染性	中圧
		66	0	DAPI/PI	中圧
		66	0	脱囊	中圧
		66	>4.5	感染性	中圧
		159	2.0	DAPI/PI	中圧
		159	2.0	脱囊	中圧
		159	>4.5	感染性	中圧
No.2	Cryptosporidium Parvum	3	3.4	感染性	中圧
		3	3	感染性	低圧
No.3	Giardia muris	10	>2.6	感染性	中圧
No.4	Cryptosporidium Parvum	7.5	1	感染性	中圧
		7.5	1	感染性	多色光
		11	2	感染性	中圧
		11	2	感染性	多色光
No.5	Cryptosporidium Parvum	3	3	感染性	低圧
No.6	Cryptosporidium Parvum	45	>4.7	感染性	高出力低圧
No.7	Cryptosporidium Parvum	>25	3	感染性	低圧
		>25	3	感染性	中圧
No.8	G.lamblia	3	>2	感染性	低圧
	G.muris	3	>2	感染性	低圧
No.9	G.lamblia	10~40	0	DAPI/PI	低圧
		10	>2	感染性	低圧
		20~40	>3	感染性	低圧
No.12	Cryptosporidium Parvum	3	3	感染性	低圧
	G.lamblia	1	4	感染性	低圧
No.14	Cryptosporidium Parvum	3	3	感染性	低圧
No.20	Cryptosporidium Parvum	7.5	1	感染性	多色光
		11	2	感染性	多色光
No.22	Cryptosporidium Parvum	1	2	感染性	低圧
		230	2	脱囊	低圧
No.23	G.muris	5.4	2.2	感染性	中圧
		88.2	2.8	感染性	中圧
		88.8	0.43	脱囊	中圧
		88.2	0.14	核酸染色法	中圧
No.26	Cryptosporidium Parvum	120	5.4	感染性	低圧
No.27	Cryptosporidium Parvum	10	1.16	感染性(q-PCR)	中圧
		20	1.24	感染性(q-PCR)	中圧
		40	1.84	感染性(q-PCR)	中圧
		5	>3	感染性(IF)	中圧
		5	>3	感染性(IF)	中圧
No.35	Cryptosporidium Parvum	3	3	感染性	低圧
No.37	Encephalitozoon intestinalis	60	3.2	感染性	低圧
	Encephalitozoon cuniculi	140	3.2	感染性	低圧
	Encephalitozoon hellm	190	3.2	感染性	低圧
No.40	Cryptosporidium Parvum	1	1.5	感染性	低圧
		3	>3.4	感染性	低圧
		1	>3.2	感染性	中圧
		3	>3.2	感染性	中圧

(1)UVの実装置に関する文献

No.27、28、29、41、43、45、46

アメリカの最も大きな水道事業者であるアメリカンウォーターシステムズでは、最終処理水に紫外線を照射する実施可能性調査を長期にわたり行い、さまざまな試みを行った。粒状活性炭でろ過後、直径12インチ(0.3m)の紫外線装置内で紫外線照射し、処理水の流量は600gpm(2,700L/min)であった。12ヶ月にわたって化学的測定(THM、HAA、UV254、DOC、TOC、金属、硝酸塩、亜硝酸塩)および物理的測定(ランプ電圧、流量、センサー計測数値)を実施し、装置性能への影響を検証した。MS2バクテリオファージを用いて、さまざまなランプの形状、様々な稼動時間でのランプによる照射実験を実施した。これらの不活化のデータは、ベンチスケールの不活化データとかなりの相関関係があることを証明している。クリプトスポリジウムオーシストにおいては、ベンチスケールの研究では、HCT-8細胞を用いた感染力評価による検証を実施した。双方の分析結果とも、オーシストイノキュエラが増加し、HCT-8細胞の感染度が高まるにつれ、オーシストに紫外線処理を施すと、著しく異なる感染反応の結果が出た。本研究のデータを踏まえると、試験管感染分析評価は少量の紫外線照射(5mJ/cm²-10mJ/cm²)で、>3 logsの不活化を証明した。(No.27)

都市下水放流水を水道水あるいは農業用水として取水するような場合、下水から如何に微生物を除去するかが問題となっている。近年、フィンランドの4箇所の下水处理場にてパイロットプラントによる実験結果、PACによる凝集+砂ろ過に紫外線処理を組み合わせることにより、好結果が得られることが分かった。砂ろ過での除去効果は、SSが90%、濁度が70~80%、色度が20~50%で、これにより、紫外線透過率を20%まで改善することができた。微生物除去については、90~99%、りんは0.05mg/Lまで除去することができた。UV照射の効率、紫外線照射装置にFRNAファージを添加することにより計測した。パイロットプラントでは、UV照射強度140mWs/cm²にて、99.9%以上のMS2減少が可能であった。なお、砂ろ過および後段でのUV照射により、実験を行った全ての微生物を減じることが可能で、場合によっては検出限界以下まで生物除去が可能であった。この場合、SSおよび濁度は1-2mg/L、1NTU程度まで除去可能であった。

(No.28)

化学物質や微生物の性質に対するUV消毒の効果は水によって異なる。したがって、各水道事業者は飲料水中の化学物質や微生物的な特性に対してUV消毒の効果を明確にさせるための研究をそれぞれ行わなければならない。(No.29)

モントリオール下水処理場にて、*Enterococci*、MS-2 coliphage、*Clostridium perfringens*(CP)を指標菌としたPAA・UV・オゾンによる消毒能力の評価を実施した。

PAA濃度が6mg/Lを越えた場合は、大腸菌を9,000CFU/100mL以下のレベルまで消毒することができる。Enterococciについても同様の結果が得られた。また、CPにおいては全く反応がなかった。しかしながら、PAA濃度が1.5mg/Lを越えた場合はMS-2を初めの1/10とすることができた。

この流出水は、多くのオゾン要求量を必要とし、また、比較的高いUV照射量が必要であることが予想される。その理由として、高濃度のCOD・鉄・SSをUVによる照射により処理できるからである。UV20mJ/cm²に対して大腸菌は、1,000CFU/100mL（光回復が起こらないための目標値）以下の指標菌に対し、特徴的な2段階の減少カーブを示す。これに対し、MS-2、CPは直線的に減少する。CPは指標菌の中で、最も耐久性がある指標菌である。

4種類の指標菌の反応の相違点は、消毒によるものであり、1つの指標菌によるものだけでは不適切であろう。消毒を行うために必要とされる要求量は、採算が合わず、また処理場における早期段階での除去が必要とされる。(No.41)

SandiegoのOtay浄水場内のAqua2000研究センターにてOtay湖の水を凝集、沈殿、二層ろ過したOtay浄水施設の放流水にMS-2を添加し、紫外線による不活化実験を実施した。処理水量は、695gpmであり、紫外線透過率は84%、ランプ出力は設定の81%で実施した。

MS2ウイルスの原水中の初期濃度は、 5×10^4 pfu/100mL $\sim 1.1 \times 10^5$ pfu/100mLであり、処理水中の濃度は 4×10^2 pfu/100mL $\sim 1 \times 10^2$ pfu/100mL以下であり、除去率は2.1 \sim 3log程度である。既に紫外線耐性を定量的に測定されているMS2ウイルスを用いて、*Cryptosporidium*や*Giardia*の不活化率を計測した。用量-反応曲線によりMS2ウイルスを2log不活化する際に必要な紫外線量は42.8mJ/cm²である。本実験では、2.1 \sim 3logの不活化が得られたので、40.3 \sim 67.6mJ/cm²の等価線量である。(No.43)

紫外線技術は、装置が対象に必要な紫外線量を照射でき、操作条件・水質により紫外線量を監視、調整できることを保障しなければならない。分析モデルや数値モデルよりも、バイオアッセイを用いた手法が、紫外線装置の性能検証には適している。分析モデルは、平均計算紫外線量を計算するものであり、不適當である。計算流体力学を用いた数値モデルでは、熟練した専門家ならば、正確に装置性能を予測できるが、バイオアッセイ試験に比べ、多くの検証を必要とする。(No.45)

下水消毒のためにUVを照射した場合、流出におけるSS分と、糞便性大腸菌群数には直線的な関係がみられる。その際、糞便性大腸菌及び大腸菌(NAR)の光回復はガラス容器において発生するが、取水河川においては検出できなかった。これらを踏まえ、UVシステムは、最大流下率での照射寿命の最終段階において低UV照射及び高SS分のため設計されるべきである。(No.46)

(2) UV装置のコストに関する文献 No.30

UV技術は処理された飲料水中の *Cryptosporidium* を効率的に不活化することが示された。既設の水処理プラントでこの技術を応用する費用は、現場での具体的な条件（水処理方法、水質特性、ポンプ揚程、建物の面積及び *Cryptosporidium* の不活化要求レベル等）に依存する。

本プロジェクトで行ったコスト比較では、新型 UV ランプが飲料水の処理への応用に対し費用効果が高く、現場での条件次第ではあるが、従来の薬品処理の代替法として価格競争が可能であることを示している。(No.30)

(3)紫外線による微生物の不活化 No.31、35、36、37、40

紫外線消毒は、塩素に代わる消毒方法として、飲料水やプロセス用水、廃水に用いられている。紫外線照射後の微生物の回復を阻害するために、微生物には、可能な限り、多くの部位に損傷を与える必要がある、殺菌効率の高いランプは、幅広い波長を持ち、特定の波長にて高出力を持つよう改良されたランプである。同線量において、従来の低圧ランプに比べ多色中圧ランプの方が、消毒副生成物を生成することなしに、より高い不活化が、可能であった。(No.31)

Cryptosporidium parvum は単色の紫外線に対して高い感受性を示すことが確認された。254nm は可視光の中で微生物に最も有用であることが示されており、この波長の近辺が中圧ランプによる不活化の際にも大きな役割を占めていると考えられる。

また、MS2 が *Cryptosporidium* より紫外線に対して耐性を持つとの結果が得られた。両者を比較すると、MS2 は、全体の大きさ及びゲノムの大きさが小さく、紫外線照射の対象とはなりにくい可能性が考えられる。事実、水系の腸内微生物の中でも紫外線耐性の強い微生物であり、大腸菌ファージ MS2 は、紫外線消毒の処理性能を評価するのに有用な微生物であるといえる。(No.35)

従来、紫外線消毒は高濁度時においては、濁質による妨害のため、効率の悪い方法と考えられてきていた。さらに、太陽光による光回復による問題も取り上げられていた。近年は、従来の低圧、中圧ランプを異なる広範囲にて高いエネルギーを照射するフラッシュタイプ(例：パルスキセノンランプ)が開発されてきている。本研究では、2種類の大腸菌ファージと3種類の大腸菌に関して、低圧ランプとパルスキセノン(PXe)ランプによる不活化効率の違いに関して検討を行う。パルスキセノンランプでは、光回復が生じず、また、高濁度時においてもテーリングが無いことが確認された。(No.36)

254nm の紫外線を照射した場合、*Encephalitozoon intestinalis*, *Encephalitozoon cuniculi*, *Encephalitozoon hellm* の芽胞は 3.2log の不活化を行うのに、それぞれ、60,140,190J/m² の紫外線量が必要であった。この不活化機構は、紫外線量を測定する際に用い、DNA 回復欠損のある *Bacillus subtilis* 株の内生胞子のそれと類似している。これより、*Encephalitozoon* 種も低線量にて不活化され、紫外線感受性の高い *B.subtilis* 株は、紫外線装置の性能を評価する際の有用な微生物であるといえる。(No.37)

本研究は、*Cryptosporidium parvum* の低圧及び中圧ランプ(1~3mJ/cm²)による不活化及び回復能について検討をおこなった。リン酸塩バッファに懸濁させた *Cryptosporidium parvum* に、紫外線照射を、ベンチスケールにておこなった。オーシストの懸濁液は、5℃若しくは25℃でUV照射後、120時間、明条件、暗条件で培養した。*Cryptosporidium parvum* の感染性は、HCT-8を用いた細胞培養感染法及び抗体染色法により、計測した。低圧、中圧ランプともに、明暗条件での回復は見られなかった。(No.40)

(4)紫外線消毒効果の確認(生物線量計等) No.32、39、44

近年、計算流体力学が、紫外線装置線量の分布を予測できる、最善かつ唯一の方法と言われている。本研究では、様々な装置における紫外線照射線量分布を予測し、不活化が一次反応であると仮定し、文献により得た不活化定数を用いて *Cryptosporidium*、*E.Coli*、*rotavirus*、MS2バクテリアファージ、の不活化率の推定を行った。また、2相性の紫外線の用量—応答曲線を用いて、廃水中の糞便性大腸菌群の不活化の推定を行った。バイオアッセイ法を用いて、装置を評価する場合、評価を行う微生物と実験で用いた微生物が同じような不活化機構を有するかどうかに注意を払わねば、必要紫外線照射量を見誤る可能性もあることが確認され、改良したバイオアッセイ手法を適用する必要がある。(No.32)

B. anthracis Sterne の胞子は、*Bacillus subtilis* の標識株に一般的に使用される株よりも254nmのUVに対して3~4倍の耐性を有しているということが文献レビューで明らかにされている。この報告を確かめるために、*B. anthracis Sterne* の胞子を単離し、UVによる不活化の実験が、*B. subtilis* の2種類の標識株 WN624 と ATCC 6633 を用いて実施したところ、*B. subtilis* の胞子に対して効果的である標準UV処理が、*B. anthracis* の胞子の不活化に対しても十分効果があるということと、標準 *B. subtilis* の株の胞子が、*Bacillus anthracis* の胞子のUV不活化に対する biosimetry モデルとして確実に使用できるということを示している。(No.39)

細菌やウイルスを4log不活化するには、低圧ランプ(253.7nm)で400J/m²の紫外線量が必要であるが、副生成物の問題が生じるため、240~290nmの広波長域での紫外線照射が注目されている。4logの不活化には、装置内の全ての水に対して、均質に400J/cm²以上の紫外線を照射する必要があり、照射面や流れ方式により性能が変化する可能性があるため、計算と実際の性能が異なる場合がある、そのため、400J/m²で4logの不活化の性能を評価するには、紫外線耐性が既知の細菌を用いた生物線量計を用いる必要がある安全な紫外線消毒は、流量調整と標準化された紫外線センサーにより、紫外線量を監視する必要があり、最低必要紫外線量を下回らないようにする必要がある。(No.44)

(5)クリプトスポリジウム不活化と UV 波長に関する文献 No.33

Cryptosporidium parvum の不活化に関して、210～295nm の波長の中圧水銀ランプが効果があることが知られている。本研究では、各波長毎に $2\text{mJ}/\text{cm}^2$ の紫外線照射を行った結果、250～275nm の波長に関しては $2\log_{10}$ 程度の不活化効果が得られたが、その他の波長域に関しては、 $2\log_{10}$ の効果が得られなかった。(No.33)

(6)紫外線消毒シュミレーション No.34、50

紫外線照射装置内における照射量は照射強度と照射時間の積により求められる。しかし、実際には、短絡流等の影響があるので、理論値よりは、少ない値しか得られない。実際に有効な紫外線量を求めるには、詳細な装置内の流動を把握する必要がある。

紫外線の理論消毒モデル(CoDiM)により、様々なタイプの紫外線照射装置が検討され、実際の結果との比較検討が行われている。(No. 34)

CFD (コンピュータによる流体力学) 手法は、異なるレベルの水質を使用することにより、異なる配置・水理条件・エネルギー水位複数の反応槽の比較を行うことができる。技術者によると、プロトタイプとテストによる費用を削減するため、性能に対する詳細情報は、CFDによりプロトタイプ以上に最適にすることとなる。この観点は、従来より多くの設計評価を行うことができる。結果として、技術者は最適化設計を高レベルで行い、短絡的思考を排除し、水頭の縮小化、全エネルギーの削減、経験的理論を用いたものより効果的な消毒システムを構築することができる。

(No.50)

(7)内毒素の不活化 No.38

脱イオン水に様々な濃度の内毒素を注入し、中圧 UV ランプから紫外線を照射してこの内毒素の不活化を評価した。内毒素は実験条件下($100\sim 600\text{mJ}/\text{cm}^2$)で行われた UV に比例して不活化することが明らかにされた。不活化の割合は、照射線量 mJ/cm^2 当たり $\sim 0.55\text{endotoxin unit}/\text{ml}$ であった。

(No.38)

(8)紫外線消毒による臭素酸減少に関する文献 No.42

飲料水の中圧ランプによる照射による臭素酸の生成能に関して研究を実施した。2種類の水源からの水に対して $20\mu\text{g}/\text{L}$ の臭素酸を添加し、76L分のパイロット実験装置にて、最大 $718\text{mJ}/\text{cm}^2$ の紫外線を照射した。片方の水では、臭素酸の減少は確認されなかったが、高線量 ($696\text{mJ}/\text{cm}^2$) の条件下のもう片方の水では 19%までの臭素酸の除去が確認された。両原水の水質の違いは、硝酸濃度 (4 及び $0.1\text{mg}/\text{N.L}$) と、DOC(4.1 及び $3.1\text{mg}/\text{C}/\text{L}$) であった。(No.42)

(9)小規模水道における紫外線消毒 No.48

アメリカの産業は連邦、州及び地方の行政機関によって統制されている。規制に応じて水道事業はしばしば大きなコスト負担を負うこととなる。安全飲料水法（SDWA）の規制を受けている170,000の公共水道事業のうち、小規模水道は最も難しい要求を受けている。

給水人口が500～3,300人と定義された小規模水道は、一般的に少ない顧客をベースとしており、基幹施設の改良に対して州の資本投資が少ない。

しかし、資本の少ない小規模水道でも、大きな地方自治体と同様に、需要者に対して安全な飲料水を造り供給する責任がある。一般に、小規模水道事業者は、より大きな飲料水処理施設で一般的に使用されている浄水技術をスケールダウンして採用している。しかし全てのシステムが同様ではなく、大規模な事業体のシステムを小規模化することが、効果的で経済的とはいえない。大規模な技術力を持たない小規模事業体にとって効果的な消毒方法の選択肢の一つとしてUV消毒がある。

(No.48)

(10)従来の紫外線システムとの比較 No.49

従来のUVシステムはシングルUVランプまたは管の中に格納された形での集合ランプとして設計されており、各ランプは防水の石英ガラス製のカバーで覆われている。また、石英カバーは設計温度で操作されるよう、流水からランプを保護するために用いられている。これらの従来のUVシステムの設計は、維持管理が難しい点があり、いろいろ見直されている。現在のUVシステムは、設計の転換により、チューブの外側の代わりに石英管の内側にポンプで水を注入する。さらに石英管は外から空気で覆われている。

また、高UV線量が、楕円形の反射鏡で連結された二つのランプを用いることにより得られることが発見された。(No.49)

第4編

凝集沈澱・急速ろ過の運転管理技術の開発

凝集沈澱・急速ろ過の運転管理技術の開発に関する研究

財団法人 水道技術研究センター 藤原 正弘

1. 研究目的

Cryptosporidium parvum に代表される原虫類による汚染のおそれがある水道水源から取水している水道事業体においては、浄水処理により原虫類を物理的にかつ効果的に除去することが現在最も必要な対策とされている。適切に管理された急速ろ過システムによる *C. parvum* オーシストの除去率は、一般的に 2~3 log₁₀ 程度であることが知られている。しかしながら、万が一の汚染を考えた場合、*C. parvum* オーシストの除去率をより高めることができる運転管理技術を保有し実践できることが、感染のリスクを低下させるためには重要である。

本研究では急速ろ過システムにおける *C. parvum* オーシスト等の粒子の安定的な除去を目的として、凝集沈澱処理における使用凝集剤の検討、急速ろ過処理における運転操作上の工夫等により、微粒子の除去性を向上させるための運転管理技術を探索するものである。

今年度は、以下に示す課題について実験検討を行ったので、その結果を報告する。

(1) 凝集沈澱工程における凝集操作条件の比較検討

国内で一般的に広く使用されている PAC による凝集沈澱処理において、薬品注入条件（凝集剤注入率、pH）、急速攪拌条件（攪拌強度）が *C. parvum* オーシストの除去性に与える影響について比較検討を行った。

(2) 急速ろ過処理性の改善に関する実験検討

急速ろ過工程において、ろ過池流入水（凝集沈澱処理水）に凝集剤を添加することによる再凝集の効果や凝集剤を添加した水により逆洗を行うことによるろ材の凝集剤被覆効果について、それらの効果の検証を行った。

2. 実験設備

2. 1 実験原水

横浜市水道局西谷浄水場の相模湖系表流水に、粒径、比重、ゼータ電位を *C. parvum* オーシストに類似させた代替トレーサー粒子を 1000 個/mL となるように添加し、実験原水とした。*C. parvum* オーシスト代替トレーサーの性状を表-2.1 に示す。

表-2.1 クリプト代替トレーサー粒子の仕様

材質	PMMA（ポリメチルメタアクリレート）
粒子径	5.0±0.5 μm
真比重	1.19 g/cm ³
かさ比重	0.3~0.4 g/cm ³ （粉体時）
ゼータ電位	-29 mV（pH 6.6）
色	青（UV 励起蛍光下）

2. 2 実験プラント

実験プラントは凝集沈澱池、再凝集混和槽および急速ろ過塔から構成される。各設備の主要な仕様は以下の通りである。

- ・原水槽
 - : 有効容量 0.44 m³
 - 数 量 1 槽
 - 滞留時間 3.8 min (Q = 84 m³/日×2 系列分の時)
- ・急速攪拌槽
 - : 形 式 縦型タービン翼式攪拌槽
 - 数 量 2 段×2 系列
 - 有効容量 0.14 m³×2 段
 - 滞留時間 2.4 min×2 段 (Q = 84 m³/日の時)
 - G 値 215 s⁻¹
 - G T 値 61,920
- ・緩速攪拌槽
 - : 形 式 横型パドル翼式攪拌槽
 - 数 量 3 段×2 系列
 - 有効容量 0.96 m³×3 段
 - 滞留時間 16.5 min×3 段 (Q = 84 m³/日の時)
 - G 値 55 s⁻¹ (1 段目)
 - 11 s⁻¹ (2 段目)
 - 2 s⁻¹ (3 段目)
 - G T 値 67,320
- ・傾斜板沈澱槽
 - : 形 式 横流式傾斜板沈澱槽
 - 数 量 1 槽×2 系列
 - 有効容量 8.05 m³
 - 滞留時間 138 min (Q = 84 m³/日の時)
- ・再凝集攪拌槽
 - : 形 式 縦型タービン翼式攪拌槽
 - 数 量 2 槽
 - 有効容量 0.032 m³×2 段
 - 滞留時間 2.5 min×2 段 (Q = 18.5 m³/日の時)
- ・急速ろ過塔
 - : 形 式 重力式円筒形ろ過塔
 - 数 量 8 塔
 - 形状寸法 φ0.3 m×4.0 mH

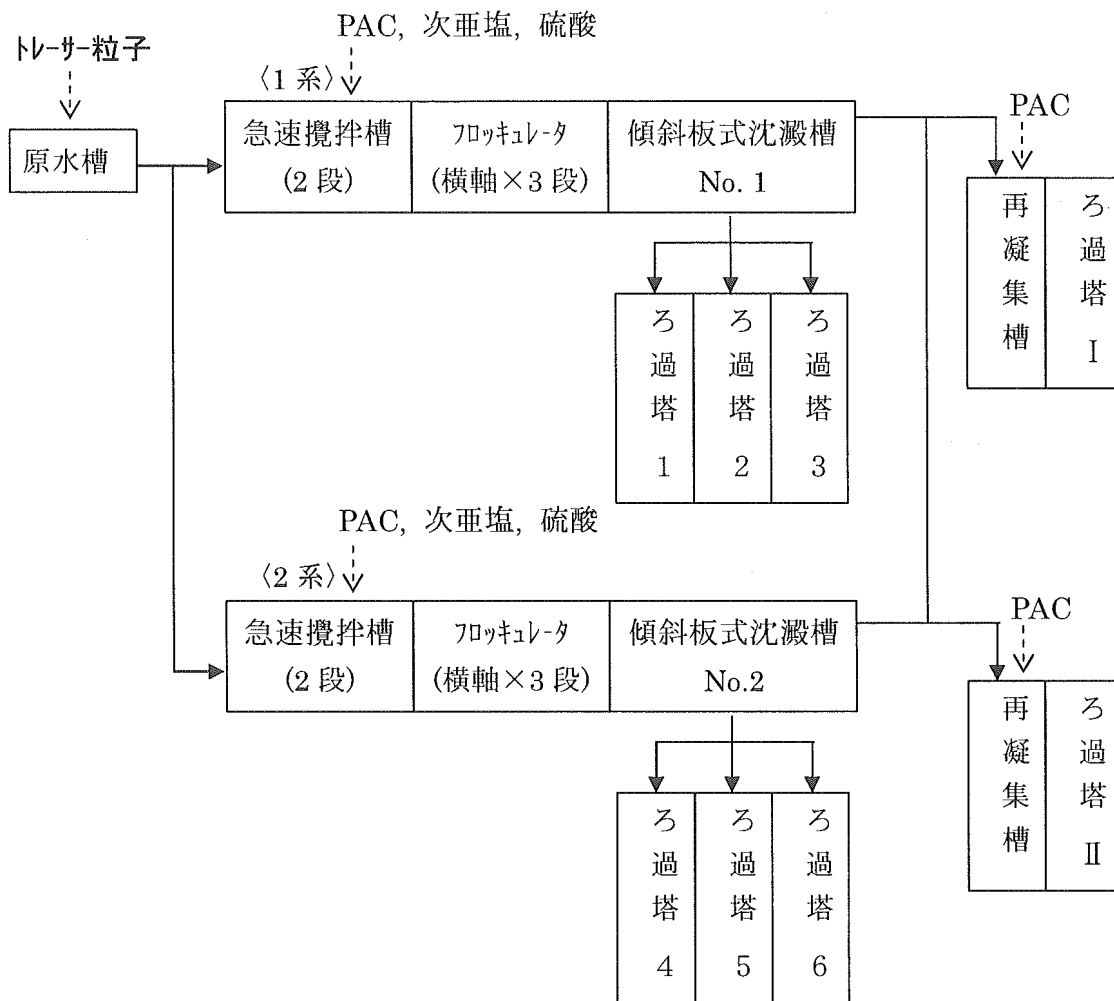


図-2.1 実験プラントの概略フロー

2. 3 急速ろ過塔のろ層条件

1, 2 系共、急速ろ過塔のろ層構成は下表の通りとした。

表-2.2 急速ろ過塔のろ層構成

	単層	2層	3層
	[けい砂] 層厚=600 mm 有効径=0.6 mm	[上層:アンササイト] 層厚=300 mm 有効径=1.4 mm	[上層:アンササイト] 層厚=420 mm 有効径=1.4 mm
		[下層:けい砂] 層厚=500 mm 有効径=0.6 mm	[中層:けい砂] 層厚=230 mm 有効径=0.6 mm
			[下層:ガ-ネット] 層厚=110 mm 90%通過径=1.6 mm
ろ過塔 No.			
1, 4	○		
2, 5		○	
3, 6			○
I, II	○(実験条件による)	○(実験条件による)	

3. 凝集沈澱処理における凝集操作条件の比較検討実験

凝集沈澱処理を効率よく行うためには、薬品注入条件や攪拌条件を適切に管理することが重要である。本実験では、これらの凝集操作条件が *C. parvum* オーシストの除去性に与える影響について、比較検討を行った。

3. 1 検討凝集剤と検討項目

実験に使用する凝集剤は、国内で最も広く使用されている PAC とした。また、実験における比較検討項目および評価手段は下表の通りである。

表-3.1 使用凝集剤と検討項目

検討凝集剤	検討項目 (因子)	評価手段
・ PAC	<ul style="list-style-type: none"> ・ 注入率 ・ 凝集 pH ・ 攪拌強度 	《連続監視》 ・ 濁度 ・ 粒子数 《随時監視》 ・ TV-サ-除去率 ・ ろ過塔損失水頭

3. 2 実験条件

(1) 凝集沈澱処理

実験は、高水温期（平成 15 年 9～10 月）と低水温期（平成 16 年 2～3 月）の 2 期間に分けて行い、水温変化による処理特性の比較も併せて行った。

高水温期及び低水温期の実験条件を下表にまとめる。凝集操作条件として①凝集剤注入率（注入比）、②凝集 pH、③急速混和池の攪拌強度を変化させて、データを収集した。

表-3.2(1) 実験条件(1)

【高水温期】

	原水濁度 (度)	1 系			2 系		
		注入比 (-)	pH (-)	急攪 G 値 (s ⁻¹)	注入比 (-)	pH (-)	急攪 G 値 (s ⁻¹)
Run H-1	14.0	1.0	7.3	100	1.0	7.3	300
Run H-2	18.6	1.0	7.3	300	1.0	7.3	500
Run H-3	18.1	1.0	7.3	200	1.0	無調整	200
Run H-4	16.2	1.0	6.3	200	1.0	6.8	200
Run H-5	12.0	1.2	7.3	200	1.5	7.3	200
Run H-6	11.8	2.0	7.3	200			

表-3.2(2) 実験条件(2)

【低水温期】

	原水濁度	1系			2系		
		注入比(-)	pH(-)	急攪G値(s ⁻¹)	注入比(-)	pH(-)	急攪G値(s ⁻¹)
Run L-1	7.6	1.0	7.3	100	1.0	7.3	300
Run L-2	7.3	1.0	7.3	300	1.0	7.3	500
Run L-3	7.8	1.0	7.3	200	1.0	無調整	200
Run L-4	6.6	1.0	6.3	200	1.0	6.8	200
Run L-5	6.4	1.2	7.3	200	1.5	7.3	200

- 凝集剤注入比は、西谷浄水場の実注入率（高水温期：26～30 mg-PAC/L、低水温期 22～24 mg-PAC/L）に対する倍率。
- 緩速攪拌条件は変化させない。

(2) 急速ろ過処理

- 単層（けい砂×600 mm）
- ろ過速度 LV = 150 m/d

3. 3 実験結果と考察

(1) 凝集剤注入率と沈澱処理性の関係

沈澱処理水の濁度、粒子数（3～10 μm）、トレーサーを指標として凝集剤注入率と処理性の関係を検証した。〔図-3.2～3.4〕

高水温期の実験では凝集剤注入率を西谷浄水場における実注入率（以下、通常注入率と称す）を基準として1.0～2.0倍に変化させた。この結果、濁度、粒子数（3～10 μm）、トレーサー数のいずれについても、注入率増加による効果が認められた。トレーサー除去率で見ると、1.2倍の凝集剤注入率で通常注入率に比して0.3 log₁₀程度、2倍では0.7 log₁₀程度、除去率が向上した。

低水温期の実験では凝集剤注入率を西谷浄水場における実注入率を基準として1.0～1.5倍に変化させた。この結果、高水温期と同様にトレーサー除去率で見ると、1.5倍の凝集剤注入率では通常注入率に比して0.2 log₁₀程度の除去性向上が認められた。

ただし、低水温期と高水温期では通常注入率においてトレーサー除去率に0.5 log₁₀程度の差異があり、注入率増加に伴う除去率の向上効果も低水温期では低調であった。

低水温期は濁度が低いため懸濁質に対して凝集剤の注入率が相対的に高くなり、生成したフロックの密度が小さくなること、水の粘性が大きくなること等によりフロックの沈降速度が小さくなるため、除去率は低下する。従って、低水温期においては、凝集剤注入率を増加させて沈澱処理水質を向上させる方策だけではなく、後段の急速ろ過工程における処理性も加えて評価を行い、最終の浄水処理水質を管理する上で適切な運転管理計画を検討する必要があると考えられる。

一方、凝集剤注入率を増加させると、沈澱池からキャリーオーバーする微フロック

が増加し、後段の急速ろ過池への負荷が増大することが懸念されたが今回の実験では、凝集剤注入率が急速ろ過池の損失水頭に与える影響は、特に認められなかった。〔図-3.1〕

(2) 凝集 pH と沈澱処理性の関係 〔図-3.5~3.7〕

高水温期、低水温期共に、pH = 6.8~7.3 の中性付近で処理性が最も高くなることが確認された、PAC は最適な凝集 pH の範囲が中性域で比較的広いことが知られているが、その中であっても、最適な凝集 pH 条件を探索することは、クリプトスポリジウムに対する安全性を高める上で有用であることが示唆された。

(3) 急速攪拌強度と沈澱処理性の関係 〔図-3.8~3.10〕

今回の実験では、G 値 = 200 s^{-1} で処理性が最も高くなった。

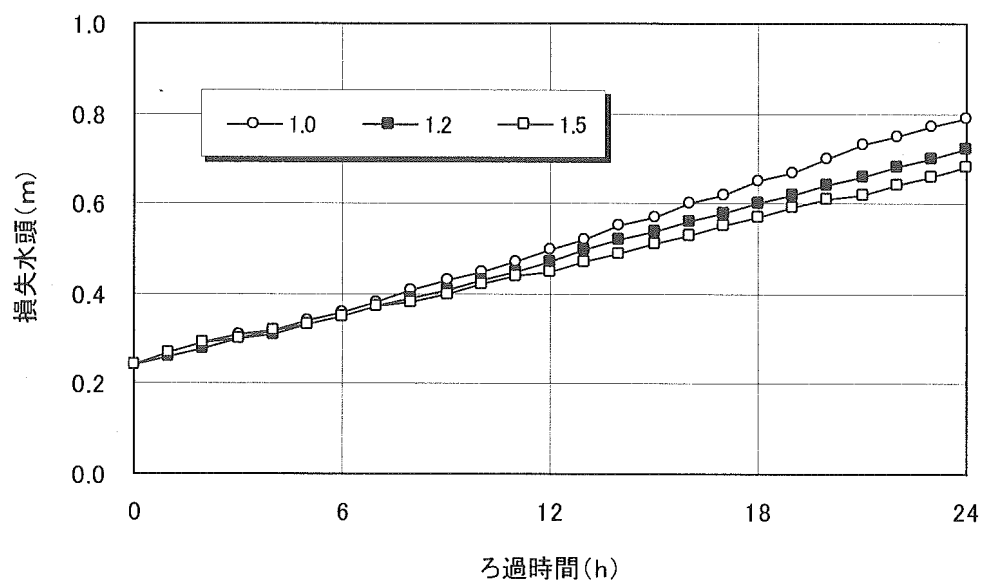


図-3.1 急速ろ過損失水頭と PAC 注入比の関係

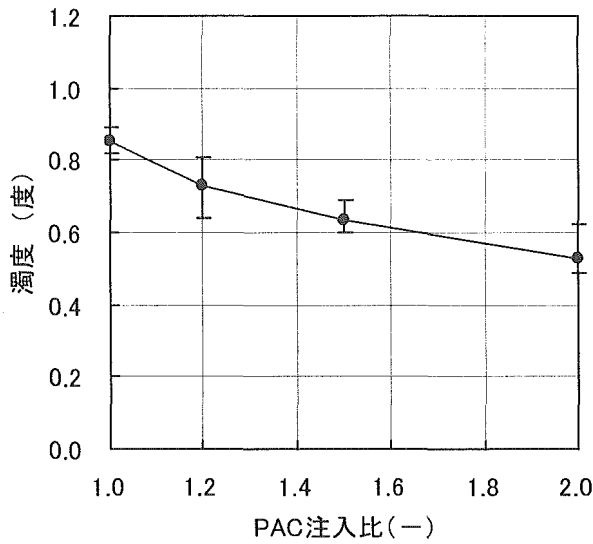


図-3.2H 沈澱水濁度と PAC 注入比(高水温)

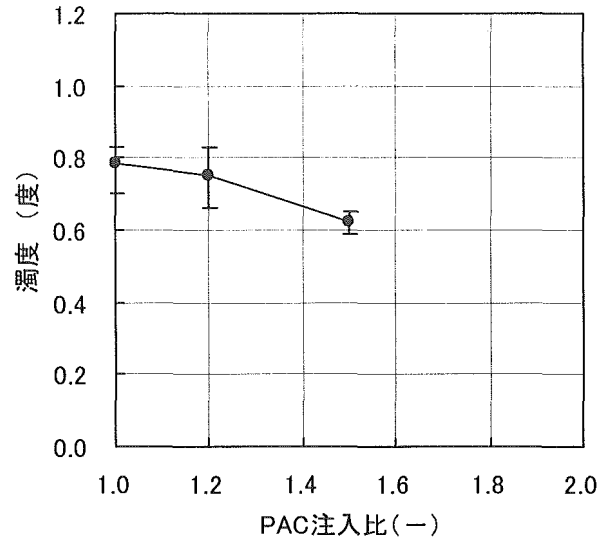


図-3.2L 沈澱水濁度と PAC 注入比(低水温)

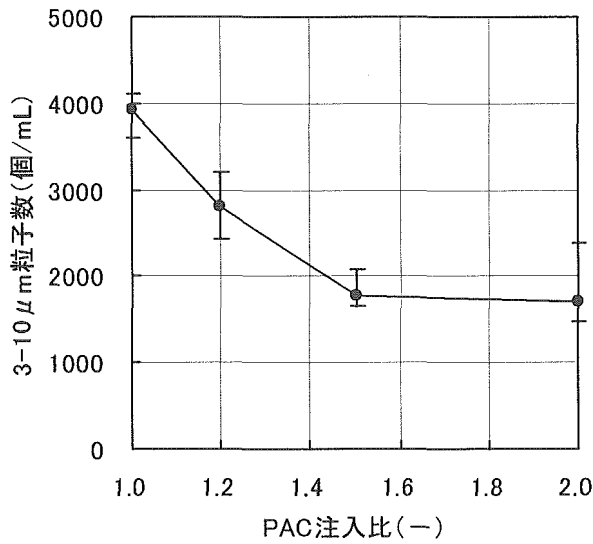


図-3.3H 沈澱水粒子数と PAC 注入比(高水温)

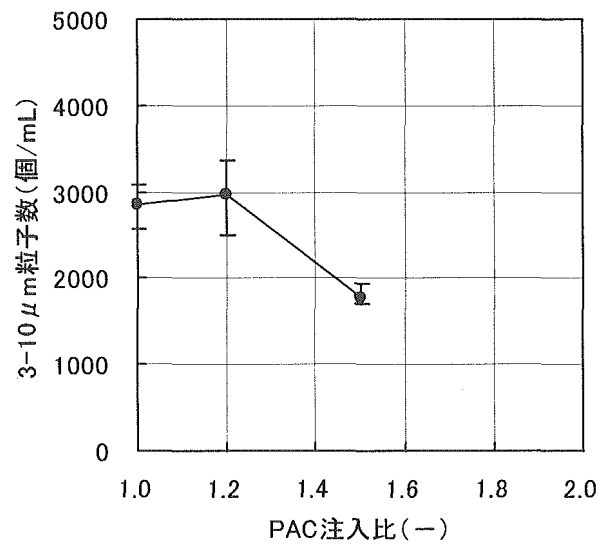


図-3.3L 沈澱水粒子数と PAC 注入比(低水温)

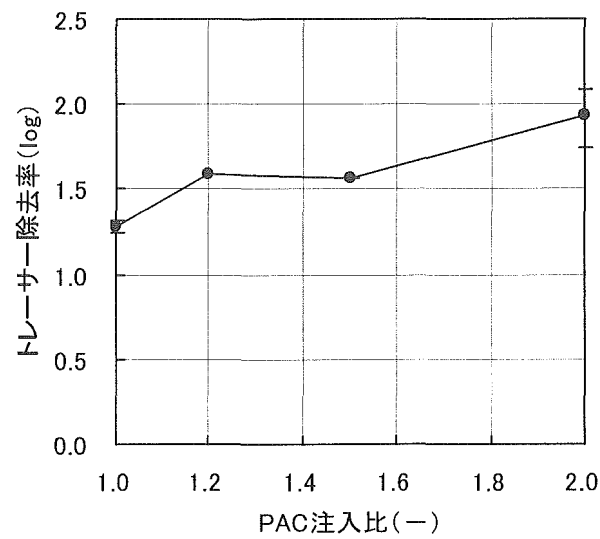


図-3.4H トレーサー除去率と PAC 注入比(高水温)

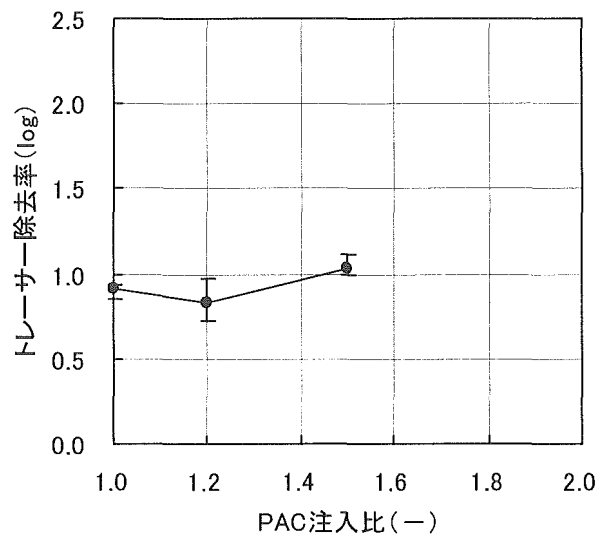


図-3.4L トレーサー除去率と PAC 注入比(低水温)

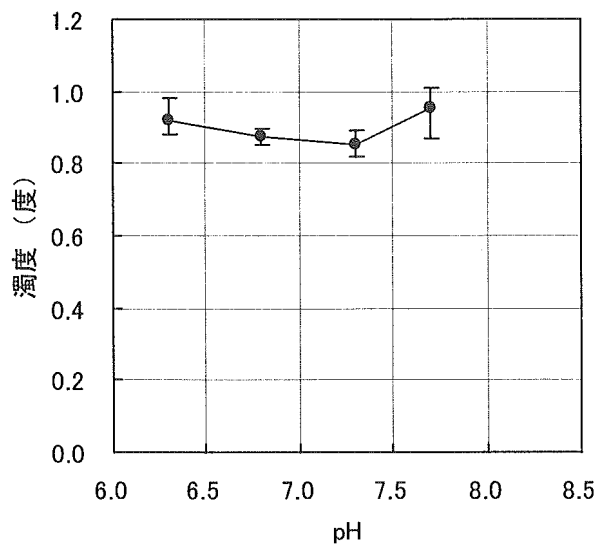


図-3.5H 沈澱水濁度と凝集 pH(高水温)

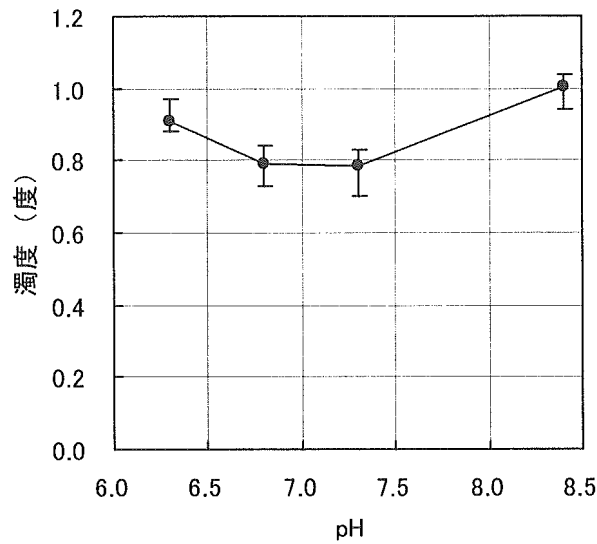


図-3.5L 沈澱水濁度と凝集 pH(低水温)

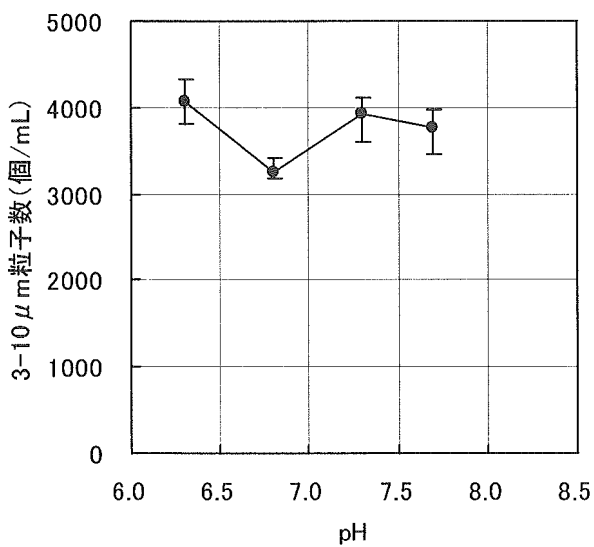


図-3.6L 沈澱水粒子数と凝集 pH(低水温)

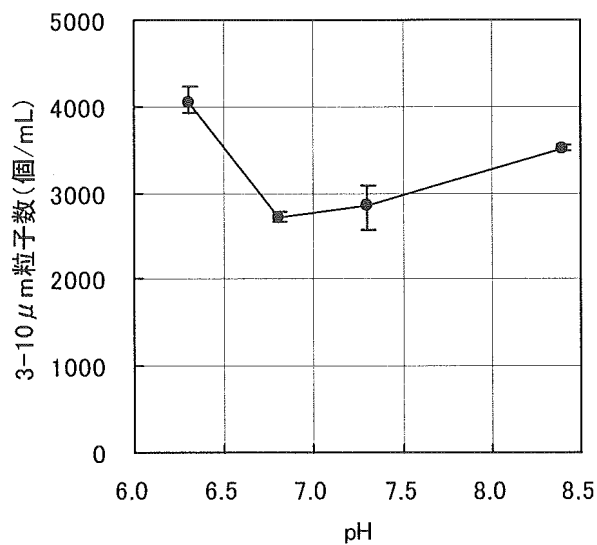


図-3.6H 沈澱水粒子数と凝集 pH(高水温)

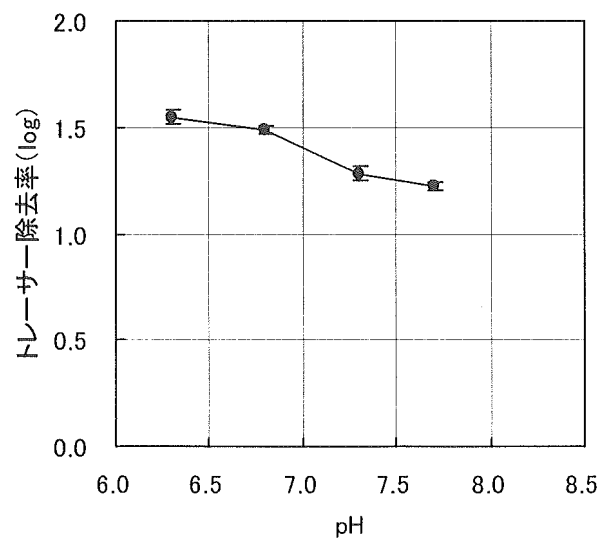


図-3.7H トレーサー除去率と凝集 pH(高水温)

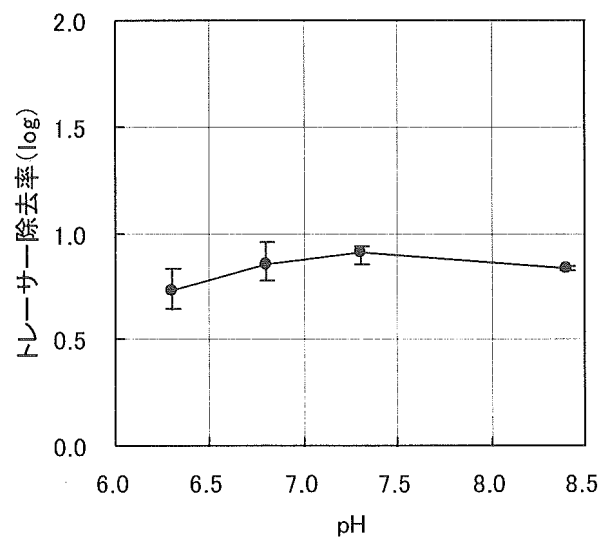


図-3.7L トレーサー除去率と凝集 pH(低水温)

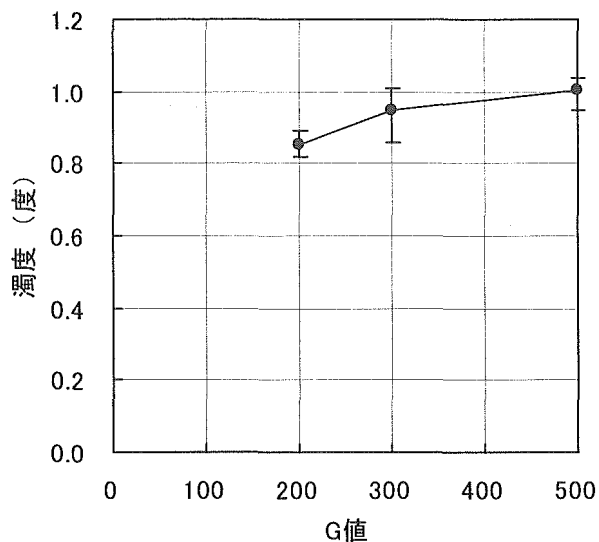


図-3.8H 沈澱水濁度と急攪G値(高水温)

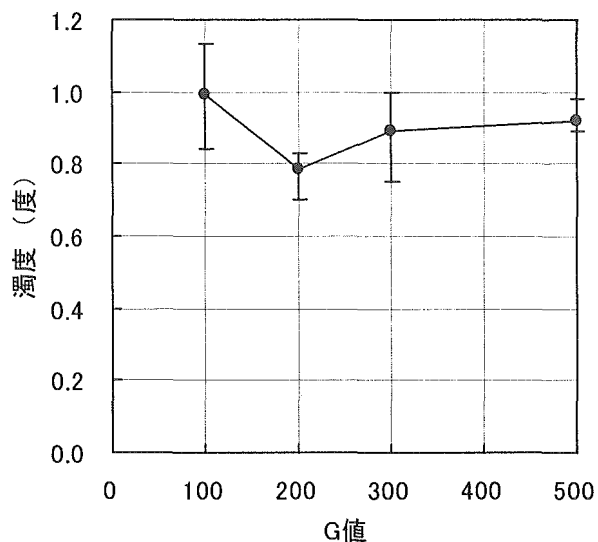


図-3.8L 沈澱水濁度と急攪G値(低水温)

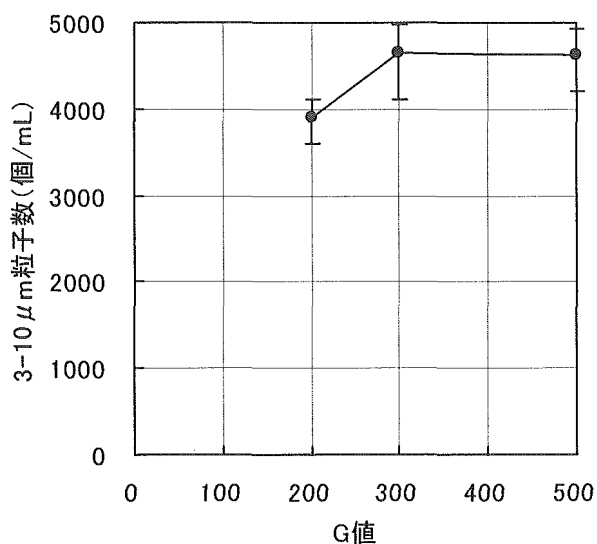


図-3.9H 沈澱水粒子数と急攪G値(高水温)

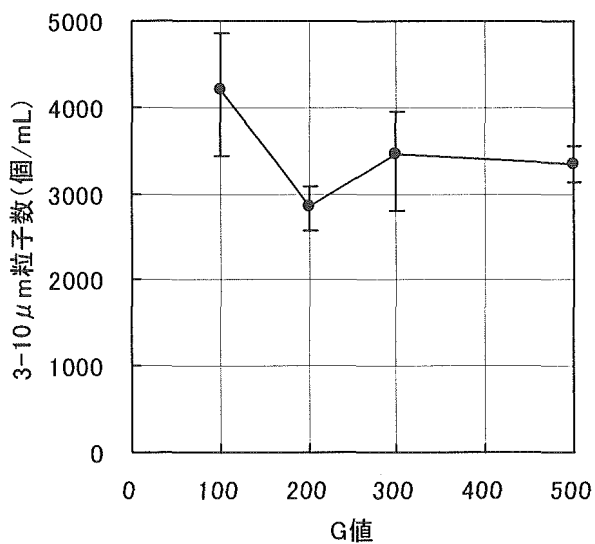


図-3.9L 沈澱水粒子数と急攪G値(低水温)

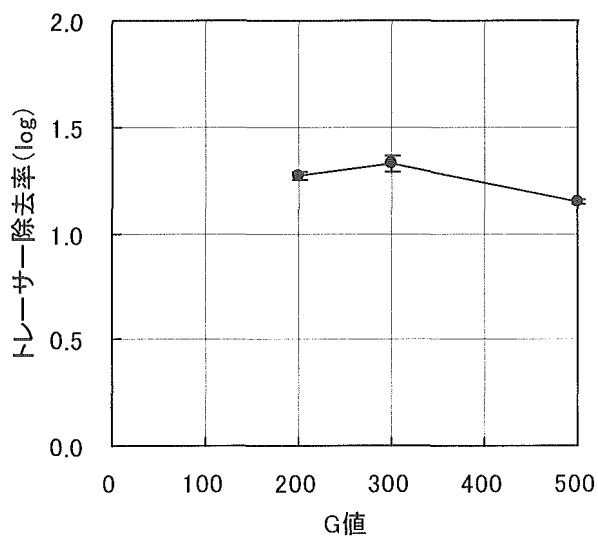


図-3.10H トレーサ除去率と急攪G値(高水温)

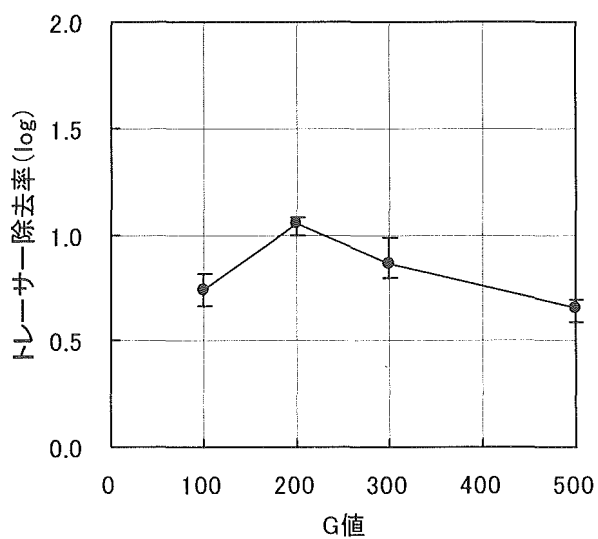


図-3.10L トレーサ除去率と急攪G値(低水温)

4. 急速ろ過処理性の改善に関する実験検討

急速ろ過工程における処理性の改善を目的として、未ろ水への凝集剤添加（再凝集）操作および逆洗工程において逆洗水に凝集剤を添加することによるろ材の凝集剤被覆効果について、実験による検討を行った。

4. 1 検討操作と検討項目

実験は図-4.1 に示すフローで行った。実験における比較検討項目および評価手段は下表の通りである。

(1) 未ろ水への凝集剤添加

① 沈澱処理

PAC 通常処理の沈澱処理水を使用した。

② ろ過処理

検討池（ろ過）	検討項目（因子）	評価手段
高水温期 ・単層 砂ろ過 および ・複層 砂+アスラ 低水温期 ・単層 砂ろ過	・再凝集剤注入率 ・再凝集攪拌強度	《随時監視》 ・濁度 ・粒子数 ・損失水頭 ・ろ過継続時間 ・トレーサ除去率

(2) 逆洗水への凝集剤添加

① 沈澱処理

PAC 通常処理の沈澱処理水を使用した。

② ろ過処理

検討池（ろ過）	検討項目（因子）	評価手段
高水温期 ・単層 砂ろ過 および ・複層 砂+アスラ 低水温期 ・単層 砂ろ過	高水温期 ・凝集剤添加の有無 低水温期 ・凝集剤注入率 ・凝集剤注入時間	《随時監視》 ・濁度 ・粒子数 ・損失水頭 ・トレーサ除去率 ・アルミニウム

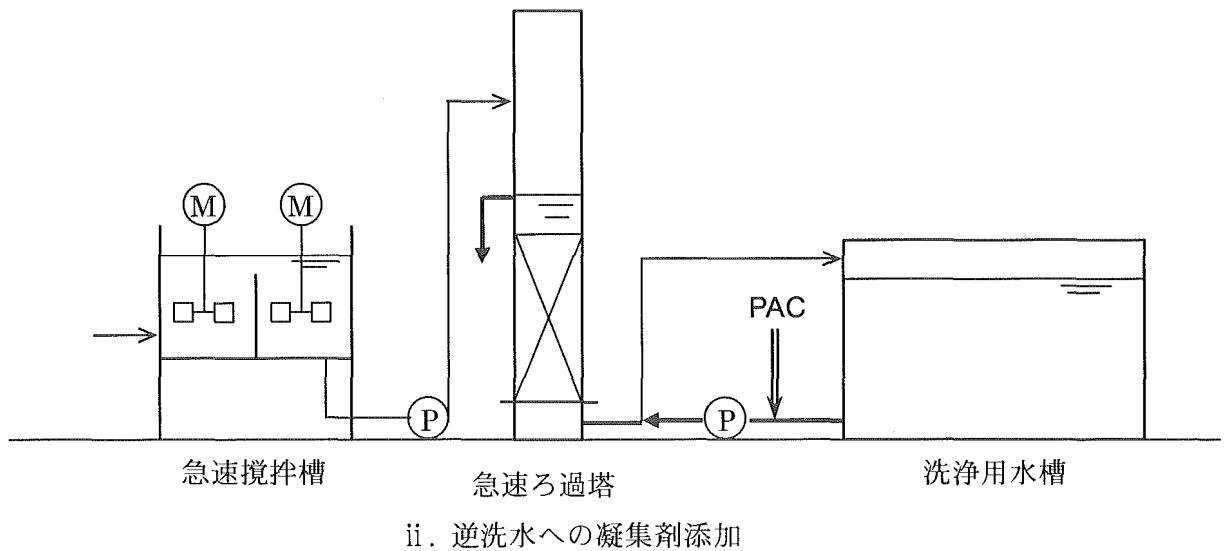
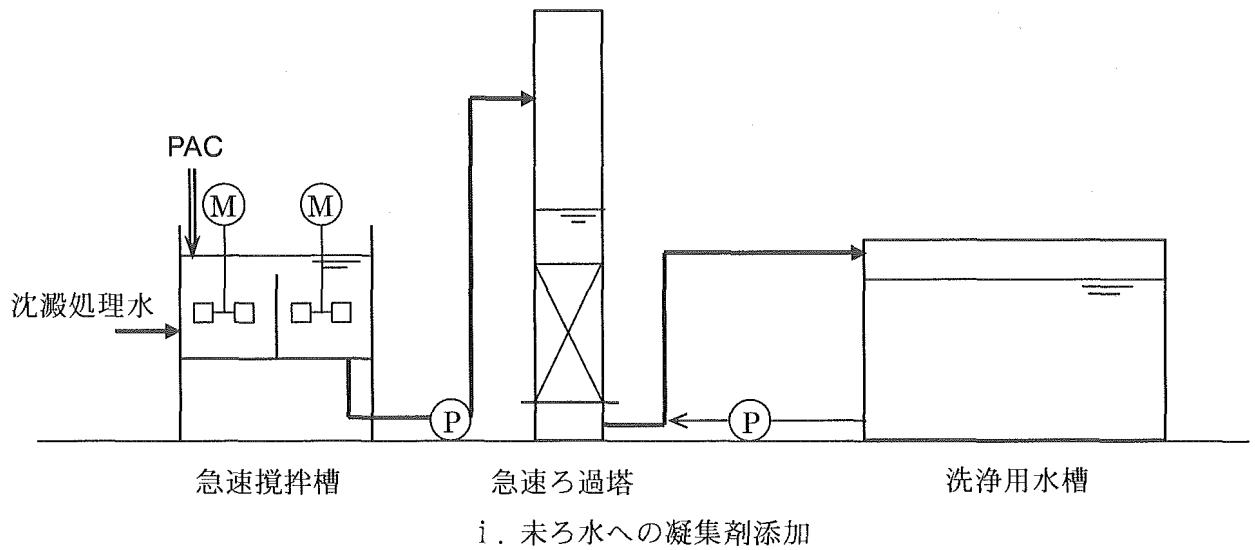


図-4.1 凝集剤添加実験フロー

4. 2 実験条件

(1) 未ろ水への凝集剤添加

実験は、高水温期（平成 15 年 10 月）と低水温期（平成 16 年 3 月）の 2 期間に分けて行った。

高水温期及び低水温期の実験条件を表-4.1 にまとめる。再凝集条件として①再凝集剤注入率、②再凝集混和池の攪拌強度を変化させて、データを収集した。