

## 2. 自主研究結果

### 2.1 自主研究概要

#### (1) 自主研究

##### 1) 研究名称

実証研究と同様

##### 2) 実施者

実証研究と同様

##### 3) 実施期間

平成 26 年 4 月 1 日～令和 2 年 3 月 31 日

##### 4) 実施場所

熊本市東部浄化センター（所在地：熊本市東区秋津町秋田 536）

##### 5) 処理対象

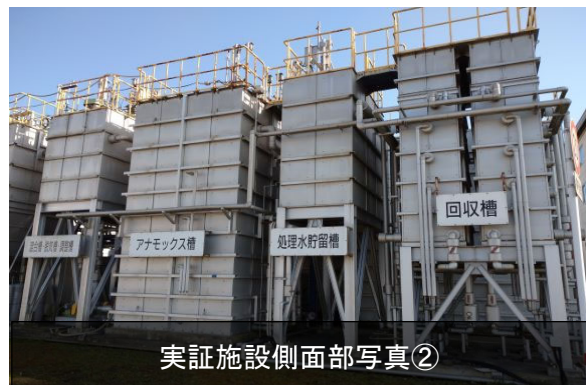
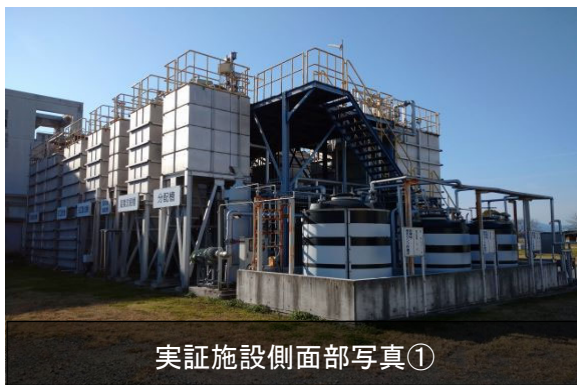
実証研究と同様（図資 1-1）

##### 6) 処理水量

処理水量は脱水ろ液 50～72 m<sup>3</sup>/日とした。

##### 7) 実証施設フロー

実証研究と同様（図資 1-2, 1-3）。図資 2-1 に自主研究完了時の実証施設の写真を示す。



図資 2-1 実証施設写真（令和 2 年 2 月撮影）

## 8) 実施工程

表資 2-1 に自主研究の全体工程を示す。

表資 2-1 自主研究の全体工程

実証項目	H26	H27	H28	H29	H30	H31 (R1)
①窒素除去性能の評価						
・長期運転による評価	●→					→
②運転条件の最適化						
・水温低下試験	●→	→		●→		
・中期停止試験	●→	→				
・長期停止試験			●→			
・高負荷試験				●→	→	●→
・計装機器点数削減試験				●→	→	●→
・アナモックス細菌活性向上試験					●→	

## (2) 設定目標

実証研究と同様 (表資 1-2)

## (3) 結果まとめ

表資 2-2 に自主研究の結果を示す。なお、各試験では運転条件を変化させて運転状況や処理性能の変化を検証したため処理性能が低下する状況もあったが、高負荷試験にて運転条件をほぼ一定とした運転においては、設定目標をほぼ達成している。

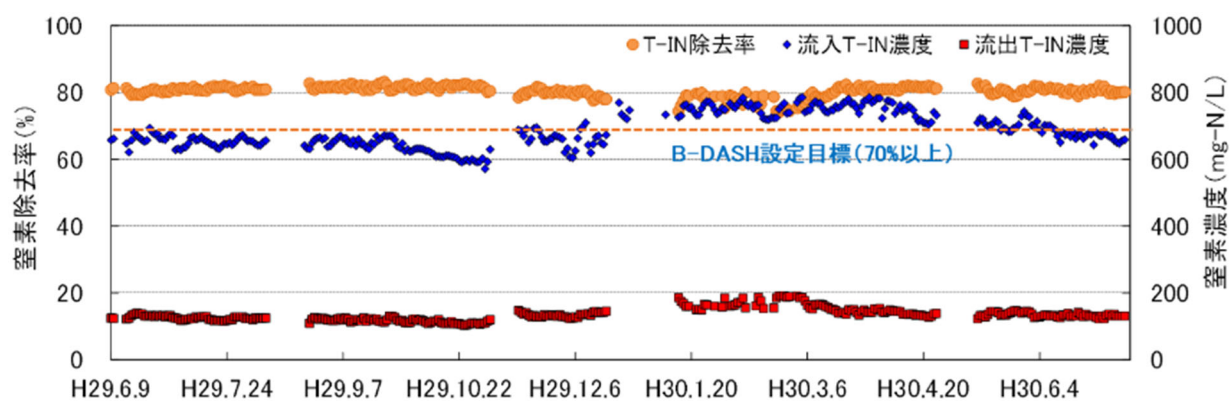
表資 2-2 自主研究の結果まとめ

実証項目	結果
①窒素除去性能の評価	
・長期運転による評価	・流入窒素濃度・負荷が変動・上昇しても窒素除去率は80%程度を維持した。この時、亜硝酸化槽では亜硝酸生成率 80%以上、硝酸生成率 5%以下を維持した。アナモックス槽では窒素転換率 90%以上を維持した。
②運転条件の最適化	
・水温低下試験	・亜硝酸化槽では運転水温 35℃から 30℃に低減できた。 ・亜硝酸化処理を安定して維持するためには水温 30℃以上の条件が適正であった。 ・アナモックス槽では水温 22℃まで低下したが安定した運転が維持できた。
・中期停止試験	・最大 17 日間の停止でも速やかに立上げできることを確認した。
・長期停止試験	・約 1 ヶ月の停止でもアンモニア酸化細菌、アナモックス細菌の活性は保持できることを確認した。
・高負荷試験	・亜硝酸化槽およびアナモックス槽では最大窒素転換速度はそれぞれ 2.24, 5.71kgN/m <sup>3</sup> -担体・日が得られ、実証研究時の 2.6 倍, 2.7 倍であった。
・計装機器点数削減試験	・計装機器点数を削減した運転を実施し実証研究時とほぼ同等の挙動を示し、この運転方法が有効であることが示された。
・アナモックス細菌活性向上試験	・アナモックス細菌の活性低下時の回復方法は低濃度連続運転が有効であることが示された。

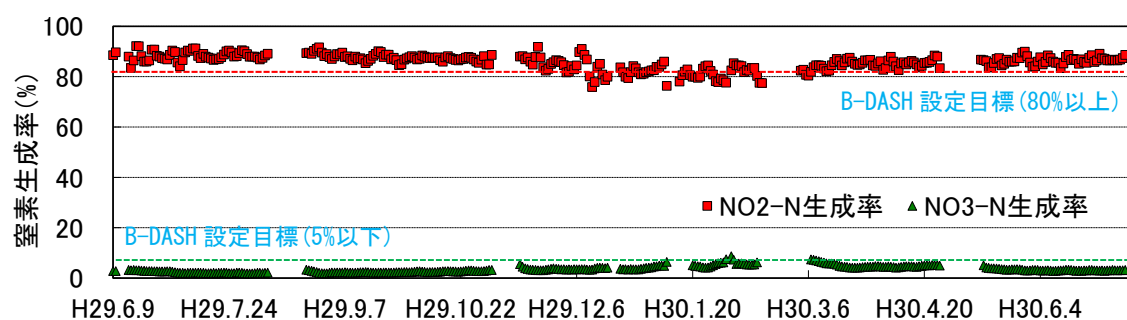
## 2. 2 自主研究詳細

### (1) 長期運転による窒素除去性能の評価

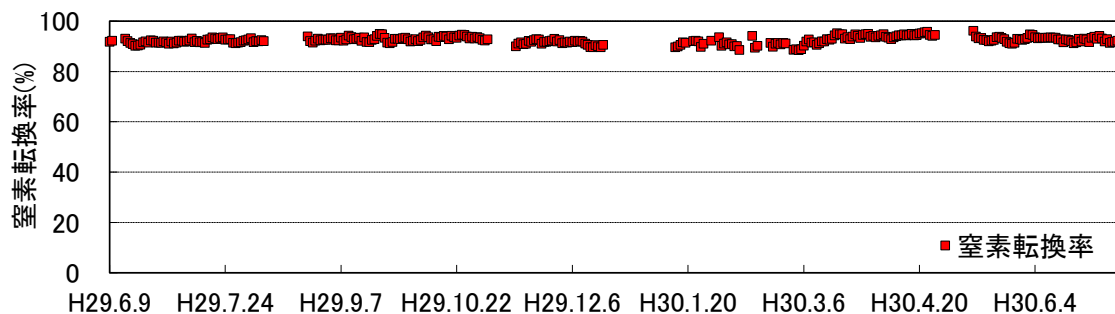
長期運転による窒素除去性能の評価は、後述する高負荷試験にて運転条件をほぼ一定とした状況でのデータを用いて行なった。図資 2-2 に長期運転におけるプロセス全体の窒素除去率、窒素濃度の推移を示す。期間中、流入原水の窒素（アンモニア性窒素）濃度は 571～785mg-N/L（平均 687mgN/L）で、流入窒素濃度・負荷が変動・上昇しても本技術の窒素除去率は 80%程度を維持した（74～83%，平均 80%）。この時、亜硝酸化槽では亜硝酸生成率 80%以上、硝酸生成率 5%以下を維持した（図資 2-3 ※一部水温低下の影響により、亜硝酸生成率及び硝酸生成率の変動が見られた）。アナモックス槽では窒素転換率 90%以上を維持した（図資 2-4）。



図資 2-2 プロセス全体の窒素除去率、窒素濃度の推移



図資 2-3 亜硝酸化槽の窒素生成率の推移



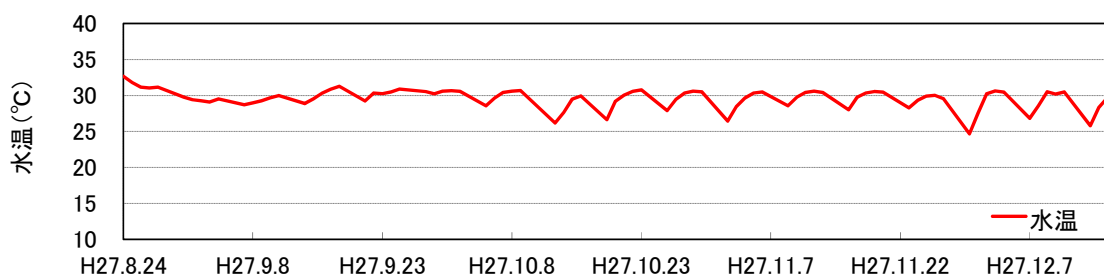
図資 2-4 アナモックス槽の窒素転換率の推移

## (2) 水温低下試験

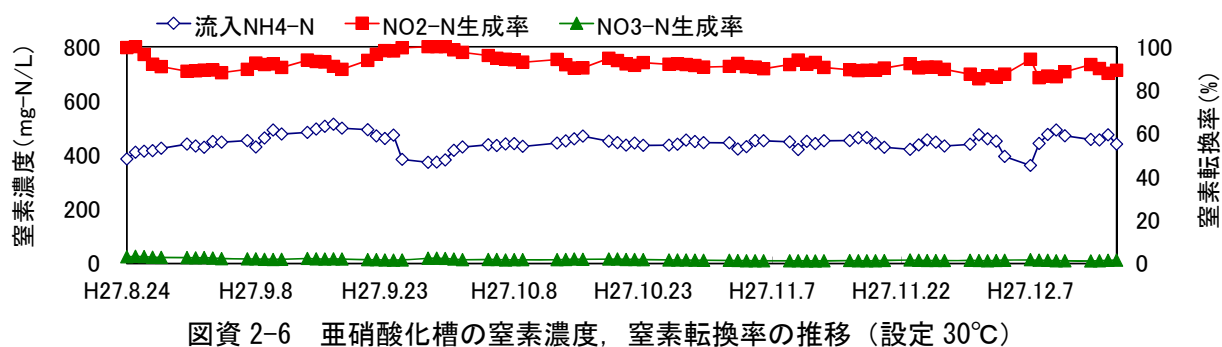
### 1) 亜硝酸化槽

本プロセスの運転および設備に係るコスト低減を図るため、平成 27 年度には亜硝酸化槽における水温を従来の 35℃から 30℃に低下させた条件での運転、平成 29 年度には 25℃に低下させた条件での運転を実施して処理の安定性を実証した。

平成 27 年 8 月から 12 月の約 5 ヶ月間、水温 30℃での連続運転によるデータ採取を行なった。原水の  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度は 362～514 mg-N/L であった。なお、当該期間では週末に脱水機が停止することを想定して本プロセスへの原水流入を停止する試験を実施しており、週末は加温も停止するため特に外気温低下時は水温が低下する状況での試験であった。8 月から 10 月の期間はほぼ水温 30℃を維持しており、11、12 月には週末の停止時に水温は一時的に 24℃まで低下することもあったが（図資 2-5）、当該期間を通して  $\text{NO}_2\text{-N}$  生成率、 $\text{NO}_3\text{-N}$  生成率はそれぞれ 85～100%（平均：92%）、1～3%（平均：2%）で（図資 2-6）、安定した亜硝酸化処理が維持できた。



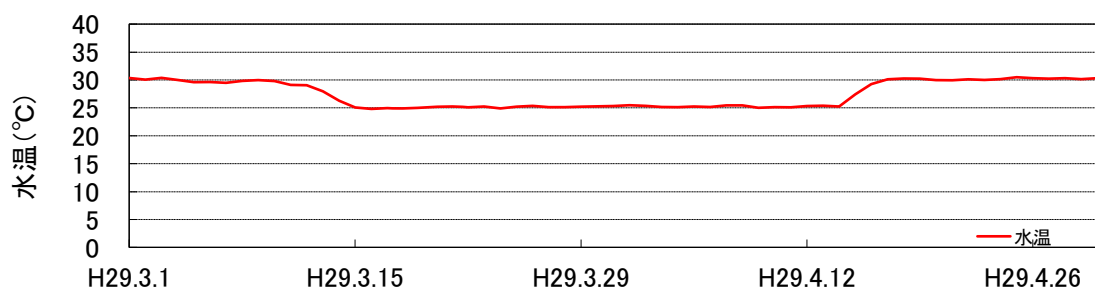
図資 2-5 亜硝酸化槽の水温（設定 30℃）



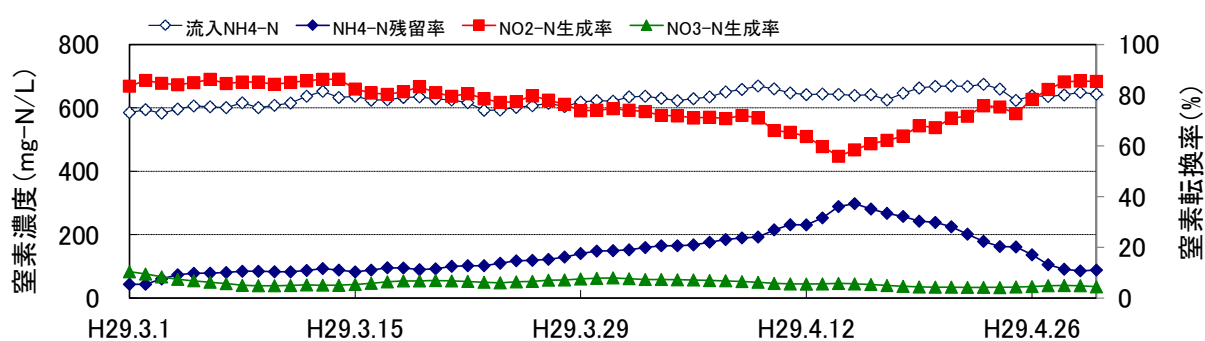
図資 2-6 亜硝酸化槽の窒素濃度、窒素転換率の推移（設定 30℃）

平成 29 年 3 月から 4 月の約 1 ヶ月間、さらに水温 25℃に低下させた条件で運転を行なったが図資 2-7、図資 2-8 に示すように NO<sub>3</sub>-N の生成はなかったものの残留する NH<sub>4</sub>-N 濃度が上昇し、NO<sub>2</sub>-N 生成率が低下した。これは水温低下によりアンモニア酸化細菌の活性が低下したものと推察され、水温を再度 30℃に戻すと NO<sub>2</sub>-N 生成率は上昇した。

以上より、亜硝酸化処理を安定して維持するためには水温 30℃以上の条件が適正であった。

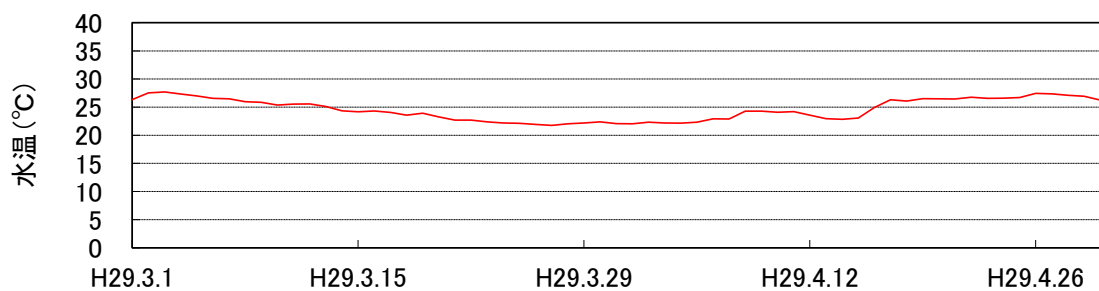


図資 2-7 亜硝酸化槽の水温（設定 30℃→25℃→30℃）

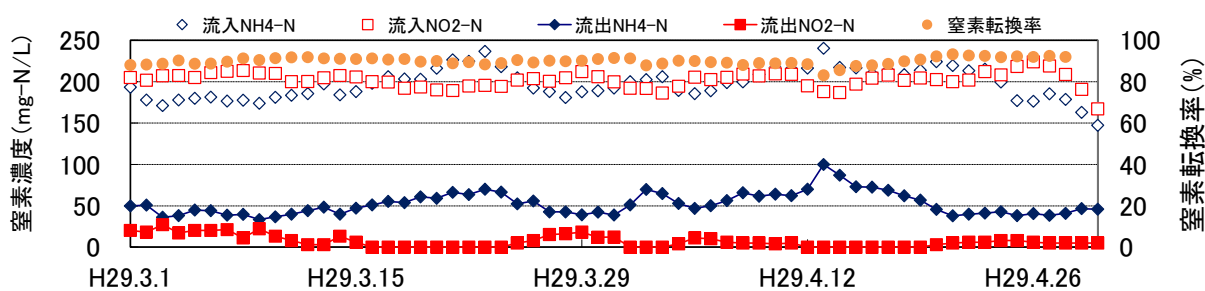


図資 2-8 亜硝酸化槽の窒素濃度、窒素転換率の推移（設定 30℃→25℃→30℃）

前述した亜硝酸化槽にて水温を低下させて期間のアナモックス槽の水温及び窒素濃度、窒素転換率の推移を図資 2-9、図資 2-10 に示す。アナモックス槽では水温の影響よりも、亜硝酸化槽にて NH<sub>4</sub>-N 濃度が上昇した影響により、流入する NH<sub>4</sub>-N 濃度が上昇しそれに伴い処理水 NH<sub>4</sub>-N 濃度も上昇する結果となった。



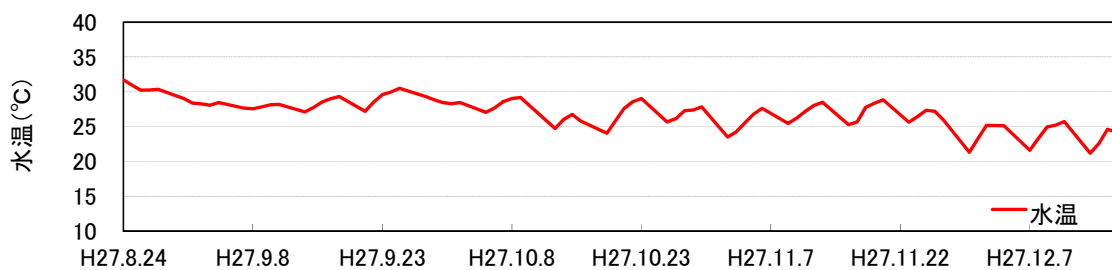
図資 2-9 アナモックス槽の水温



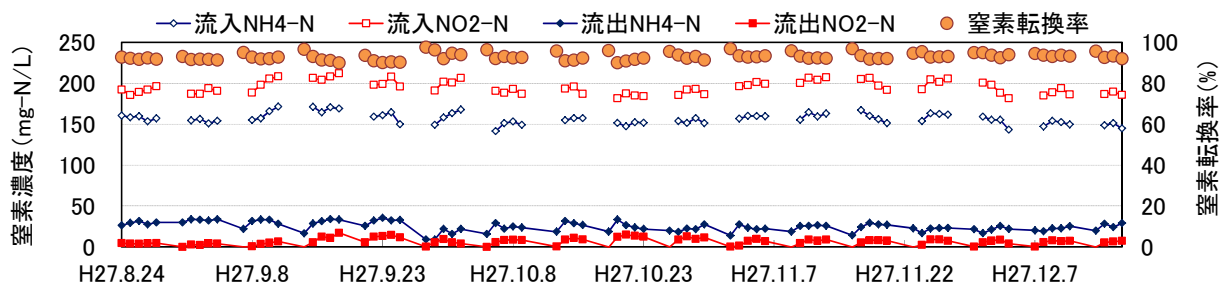
図資 2-10 アナモックス槽の窒素濃度，窒素転換率の推移

## 2) アナモックス槽

平成 27 年 8 月から 12 月の約 5 ヶ月間，アナモックス槽の水温は 11，12 月の週末の停止時は 22℃まで低下したが（図資 2-11），水温低下時も含めてアナモックス槽では 90%以上の窒素転換率が得られ（図資 2-12），安定した運転が維持できた。



図資 2-11 アナモックス槽の水温



図資 2-12 アナモックス槽の窒素濃度，窒素転換率の推移

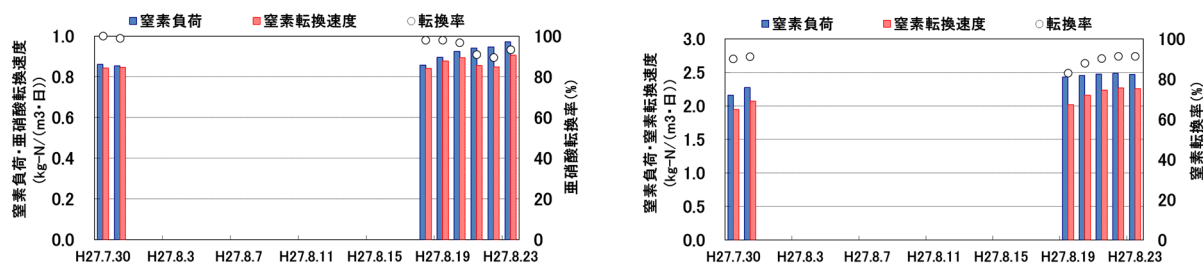
### (3) 中期停止試験

長期休暇時等の脱水機の停止を想定し、最大 17 日間の中期的な停止試験（以下、中期停止試験）を行なった。夏季休暇時、冬期休暇時に定期的実施し、表資 2-3 に試験における停止条件の概要および立上げ時の状況の代表例（中期停止試験①、②）を示す。中期停止試験では、原水供給設備や加温設備等を停止して処理を停止させ、亜硝酸化処理を担うアンモニア酸化細菌の活性維持のために亜硝酸化槽でタイマによる間欠曝気運転（1 分 ON/60 分 OFF）を行なった点を除き、アナモックス槽を含めて全ての機器の運転を停止した。中期停止後の立上げでは、亜硝酸化槽、アナモックス槽ともに、ほぼ停止前の原水供給量（窒素負荷量）にて処理を再開させた。冬季の立上げでは、停止時に水温が 10℃前後まで低下したため、原水供給設備の稼働前に加温設備を稼働させて亜硝酸化槽の水温を 25℃程度まで上昇させた後に亜硝酸化槽への原水供給を再開させた。

本試験では、最大 17 日間の停止期間において、夏季、冬季における停止時の水温の変化に関わらず、原水供給を再開させた直後には、各槽ともに停止前の転換速度に速やかに復帰できることを確認した（図資 2-13, 2-14）。立上げ前の亜硝酸化槽は、停止前とほぼ同様の状態で、原水供給再開直後から 80%以上の NO<sub>2</sub>-N 生成率を確認した。アナモックス槽では、停止中に槽内の NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N はほとんど消費されたが、原水供給再開直後からアナモックス反応による窒素除去を確認し、窒素転換率は速やかに 80%以上に復帰した。

表資 2-3 停止条件の概要および立上げ時の状況

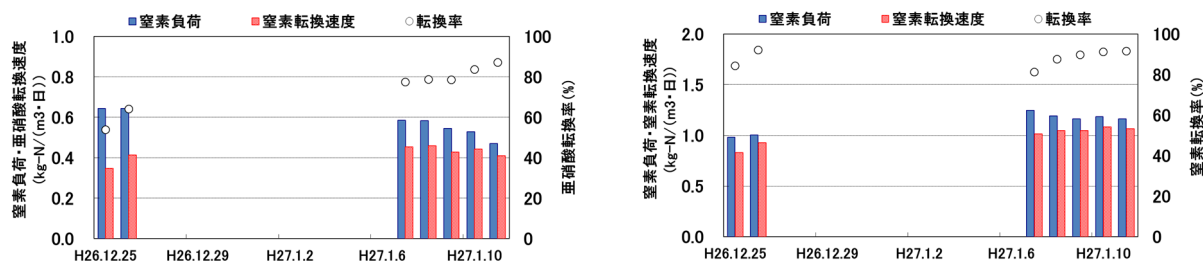
	中期停止試験①		中期停止試験②	
	亜硝酸化槽	アナモックス槽	亜硝酸化槽	アナモックス槽
停止期間	H26. 8. 9～8. 18 H27. 8. 1～8. 17 10、17 日間	H26. 8. 9～8. 18 H27. 8. 1～8. 17 10、17 日間	H26. 12. 27～ H27. 1. 6 11 日間	H26. 12. 27～ H27. 1. 6 11 日間
停止時の対応	間欠曝気	—	間欠曝気	—
停止時の水温	30～36℃	30～35℃	30→12℃	25→11℃
立上げ時の状況	直後に亜硝酸生成 80%以上に復帰	直後に窒素転換 80% 以上に復帰	直後に亜硝酸生成 80%以上に復帰	直後に窒素転換 90% 以上に復帰



図資 2-13 中期停止試験①の各槽における窒素転換速度の変化

(左：亜硝酸化槽，右：アナモックス槽)





図資 2-14 中期停止試験②の各槽における窒素転換速度の変化  
(左：亜硝酸化槽，右：アナモックス槽)

#### (4) 長期停止試験

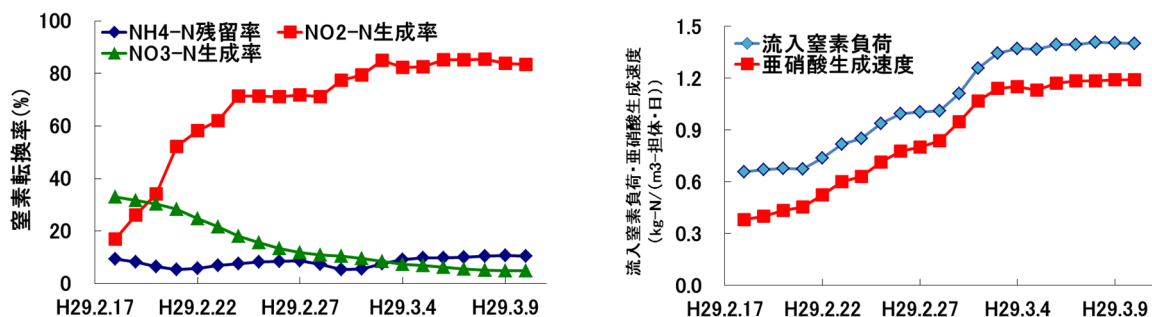
平成 28 年 4 月に発生した熊本地震，平成 29 年 1 月に実施した機器メンテナンスに際して，ともに約 1 ヶ月程度の長期停止を余儀なくされたため，これらを長期停止試験（以下，長期停止試験①，②）と位置付けた。表資 2-4 に試験における停止条件の概要および立上げ時の状況を示す。長期停止試験の操作は概ね中期停止試験時と同様としたが，微生物の活性状況を考慮して，亜硝酸化槽では原水供給量と曝気風量を調整し，早期の立上げを図った。

長期停止試験①では，32 日間の亜硝酸化槽の停止中に，硝酸化が進行して槽内の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ， $\text{NO}_2\text{-N}$  はともに  $10\text{mg-N/L}$  未満となった。亜硝酸化槽の立上げは，長期停止による微生物の活性低下を考慮して，定格量の約 60%の窒素負荷量で原水供給を再開させた。立上げ当初，一旦は硝酸化が進行して亜硝酸化処理が不安定となったが，曝気風量等を調整して硝酸化は抑制された。亜硝酸化槽の立上げ開始から 15 日経過の時点でアナモックス槽への原水供給を再開させた。この結果，アナモックス槽の停止期間は 47 日となった。アナモックス槽では，停止中に槽内の  $\text{NH}_4\text{-N}$ ， $\text{NO}_2\text{-N}$  がほとんど消費された状態であったが，原水供給再開後速やかに  $\text{NH}_4\text{-N}$ ， $\text{NO}_2\text{-N}$  の消費が見られ，アナモックス細菌の活性が保持されていたことを確認した。

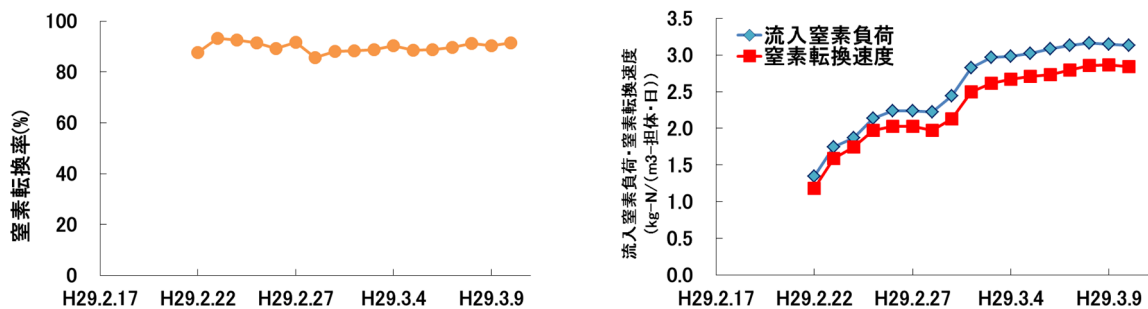
長期停止試験②では，停止後の各槽の状態は長期停止試験①とほぼ同様であった。亜硝酸化槽における停止後の立上げ状況を図資 2-15 に示す。亜硝酸化槽では，前述のとおり，原水供給再開前に水温を  $25^\circ\text{C}$  まで上昇させ，その後，定格量の約 50%の窒素負荷量で原水供給を再開させた（停止期間は 29 日）。長期停止試験①では立上げ当初に硝酸化の進行が生じたため，曝気風量を負荷上昇に合わせて適正に調整することで，硝酸化を抑制しつつ， $\text{NO}_2\text{-N}$  生成率および亜硝酸生成速度を上昇させた。立上げ開始から 15 日経過の時点でほぼ定格処理水量に達し，以降， $\text{NO}_2\text{-N}$  生成率が 80%以上の安定した亜硝酸化処理が維持できた。アナモックス槽における停止後の立上げ状況を図資 2-16 に示す。アナモックス槽の停止期間は 34 日で，定格量の約 50%の窒素負荷量で原水供給を再開させて立上げを実施したところ，立上げ直後から 87%程度の窒素転換率が確認され，アナモックス細菌の活性が保持されていることを確認した。その後，負荷を上昇させ，負荷上昇にも追従してアナモックス反応による窒素除去が安定して維持された。

表資 2-4 停止条件の概要および立上げ時の状況

	長期停止試験①		長期停止試験②	
	亜硝酸化槽	アナモックス槽	亜硝酸化槽	アナモックス槽
停止期間	H28. 4. 15～5. 17 32 日間	H28. 4. 15～6. 1 47 日間	H29. 1. 18～2. 16 29 日間	H29. 1. 18～2. 21 34 日間
停止時の対応	間欠曝気	—	間欠曝気	—
停止時の水温	25→19℃	24→19℃	30→7℃	27→8℃
立上げ時の状況	亜硝酸化上昇後硝 酸化進行	直後に窒素転換 70% 以上に復帰	亜硝酸化上昇 (硝酸化抑制)	直後に窒素転換 85% 以上に復帰



図資 2-15 亜硝酸化槽における停止後の立上げ状況（長期停止試験②）



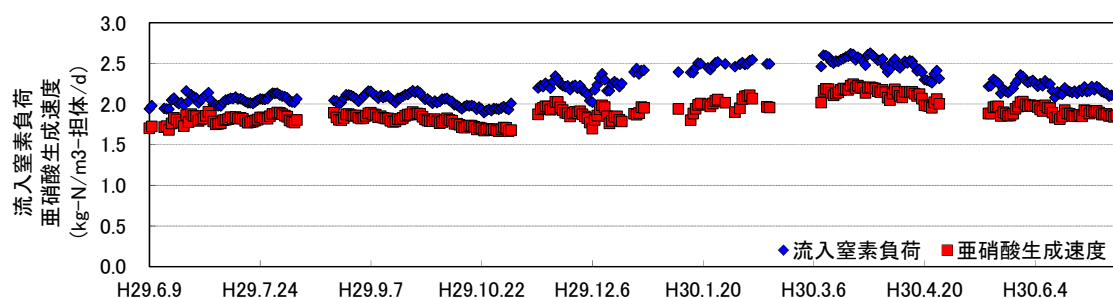
図資 2-16 アナモックス槽における停止後の立上げ状況（長期停止試験②）

### (5) 高負荷試験

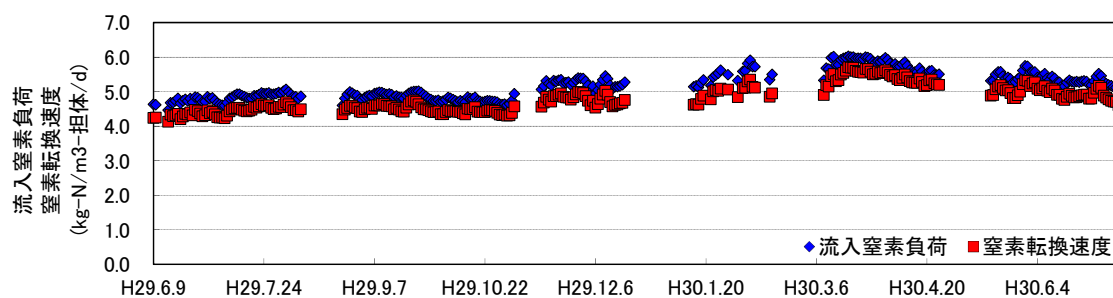
設計諸元となる窒素負荷および窒素転換速度のデータ取得を目的に、平成 29 年 6 月から平成 30 年 7 月にかけて、流入水量を当初の 50 m³/日から最大 72 m³/日に増加させ、プロセス全体の流入窒素負荷を高めて高負荷運転を行なった。本期間の原水の NH<sub>4</sub>-N 濃度は 571～785 mg-N/L (平均 687) であった。高負荷運転時における各反応槽の流入窒素負荷および重要な窒素転換速度の推移を図資 2-17, 2-18 に示す。亜硝酸化槽では、この期間、流入窒素負荷 1.89～2.63 kg-N/(m³-担体・日) (平均 2.20) に対し、亜硝酸生成速度 1.67～2.24 kg-N/(m³-担体・日)

(平均 1.90) が得られ、流入窒素負荷の引上げに追従して亜硝酸生成速度が増加することが確認された。同様に、アナモックス槽では、流入窒素負荷 4.46～6.02 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日) (平均 5.18) に対し、窒素転換速度 4.13～5.71 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日) (平均 4.79) が得られた。実証研究時の同施設での取得データでは、亜硝酸化槽における最大亜硝酸生成速度は 0.86 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日)、アナモックス槽における最大窒素転換速度は 2.05 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日)であり、この結果はこれらに対してそれぞれ 2.6 倍、2.7 倍であった。これは、これまでの検討により、各反応槽の運転条件および運転方法を適正化したことで、アンモニア酸化細菌、アナモックス細菌の活性が向上したためと考えられた。これについては、各反応槽の汚泥量は、高負荷運転時と設計負荷運転時では亜硝酸化槽で 2,000～3,000mg/L、アナモックス槽で 12,000～15,000mg/L と、ともに大きな差異はなく汚泥量の顕著な増加は見られなかったが、反応に関わるそれぞれの細菌数（総細菌数に占める割合）の増加が考えられ、これが活性向上に寄与していると推察された。

本試験結果より、亜硝酸化槽では流入窒素負荷 1.89～2.63 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日)の範囲で亜硝酸生成率 80%以上の目標性能をほぼ満足しており、平均値 2.20 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日)から余裕を見て亜硝酸化槽窒素負荷の設計諸元は 2.0 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日)とする。同様に、アナモックス槽では流入窒素負荷 4.46～6.02 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日)の範囲で窒素転換率 85%以上の目標性能を十分に満足しており、平均値 5.18 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日)から余裕を見てアナモックス槽窒素負荷の設計諸元は 5.0 kg-N/(m<sup>3</sup>-担体・日)とする。



図資 2-17 亜硝酸化槽の流入窒素負荷および窒素転換速度の推移

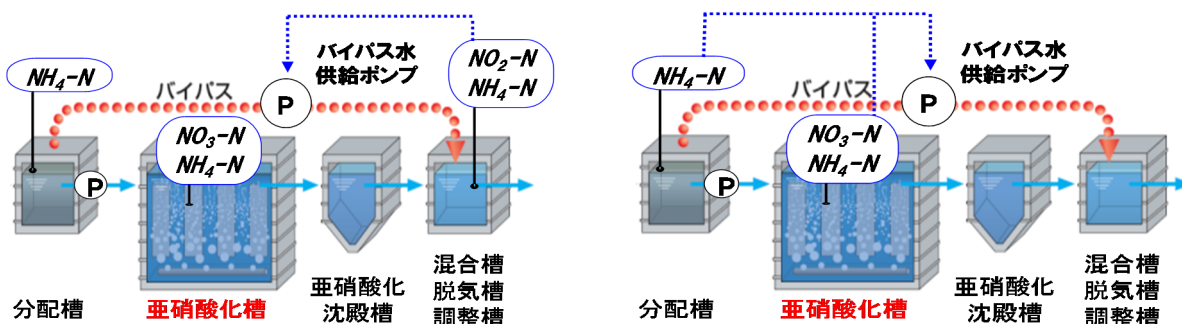


図資 2-18 アナモックス槽の流入窒素負荷および窒素転換速度の推移

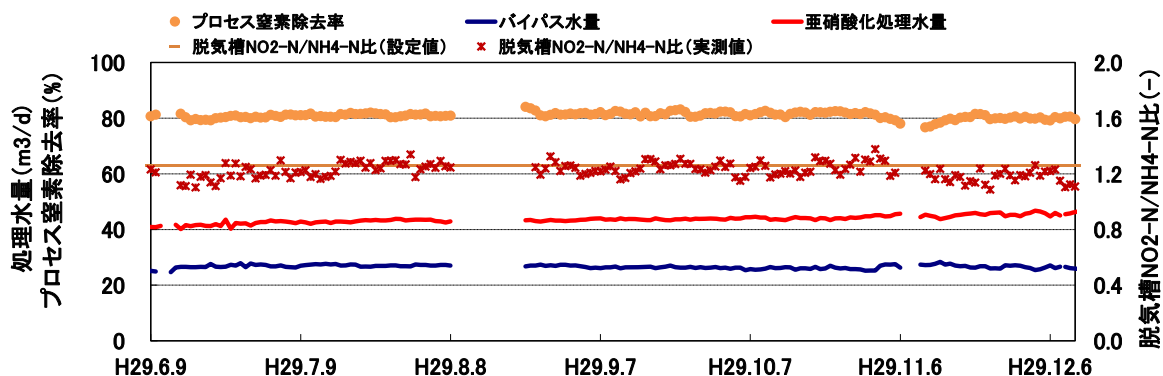
## (6) 計装機器点数削減試験

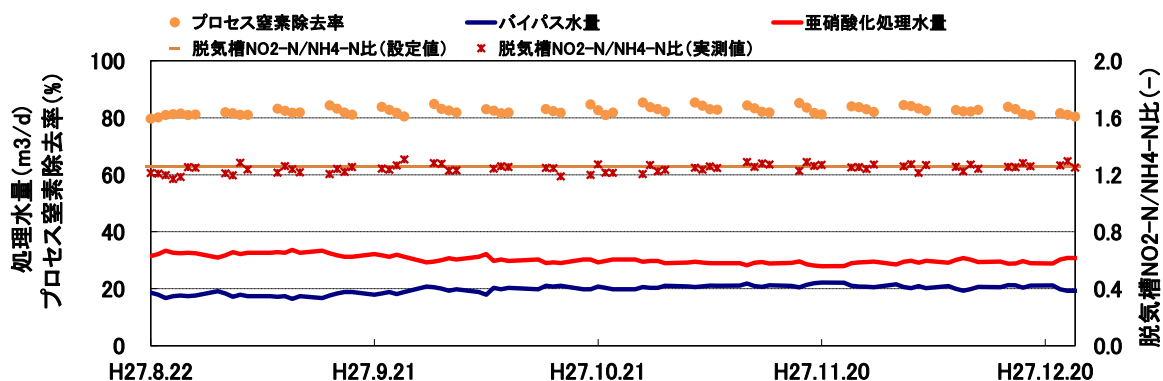
実証研究時は、アナモックス槽流入原水の  $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比調整および水量制御方法として、脱気槽に設置した  $\text{NO}_2\text{-N}$  濃度計、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度計を用いて直接計測した  $\text{NO}_2\text{-N}$  濃度と  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度より脱気槽の  $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比を算出し算出値が設定した範囲内に維持されるように分配槽からのバイパス水量を自動で制御していた（図資 2-19）。そこで、本試験では、プロセスの効率化を目的に、計装機器を削減した制御方法を検証した。具体的には、脱気槽の  $\text{NO}_2\text{-N}$  濃度計、 $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度計は使用せず、分配槽および亜硝酸化槽にて直接計測した  $\text{NH}_4\text{-N}$  濃度と  $\text{NO}_2\text{-N}$  濃度より脱気槽の  $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比を算出して同様の水量制御を行なった。

図資 2-20、2-21 に水量制御における  $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比の挙動とプロセス窒素除去率の推移を示す。本試験にて水量自動制御運転を行なった結果、バイパス水の水量は  $25\sim 29\text{ m}^3/\text{日}$ 、亜硝酸化槽の処理水量は  $40\sim 47\text{ m}^3/\text{日}$  の範囲で制御され、この時の脱気槽における  $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比は設定値 1.26 に対して  $1.10\sim 1.38$  となった。これは、実証研究時の水量自動制御運転時の結果（ $1.17\sim 1.31$ ）とほぼ同等の挙動を示し、この運転方法が有効であることが示された。ただし、脱気槽に計装器を設置して直接測定・制御することと比べるとプロセス窒素除去率に多少のバラつきは生じるため、目標性能が厳しい場合は考慮が必要である。

図資 2-19  $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比調整および水量制御方法

(左：実証研究時，右：本試験時)

図資 2-20 本試験の  $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比の挙動とプロセス窒素除去率の推移



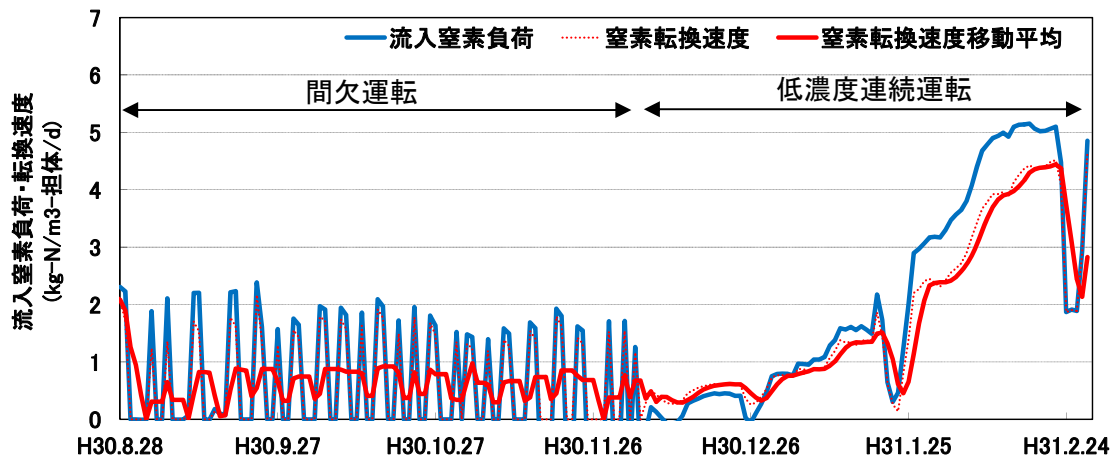
図資 2-21 実証研究時の  $\text{NO}_2\text{-N}/\text{NH}_4\text{-N}$  比の挙動とプロセス窒素除去率の推移

#### (7) アナモックス細菌活性向上試験

平成 30 年 8 月に実施した中期停止試験後の立上げにおいて、アナモックス槽における窒素転換率が低下しアナモックス細菌の活性低下が見られた。原因としては、中期停止試験時の長時間の基質不足（※停止前は高負荷運転中でアナモックス細菌の活性が高く、かつ停止中は水温が高かったこともあり、基質枯渇による影響があった可能性がある）とともに、停止後立上げ時の高亜硝酸濃度の阻害等、複合的な要素が考えられた。そこで、アナモックス細菌の活性が低下した場合の活性向上方法について 2 つの方法を検証した。

図資 2-22 に本試験における流入窒素負荷および窒素転換速度の推移を示す。平成 30 年 8 月から 12 月までの期間、アナモックス槽へ原水を供給し処理水の  $\text{NO}_2\text{-N}$  濃度が  $50\text{mg-N/L}$  を超えた時は原水供給を停止して濃度低下後に供給を再開する「間欠運転」を実施した。その結果、窒素転換速度はほぼ横ばいで活性向上は認められなかった。平成 30 年 12 月以降、二次処理水を用いて原水を希釈し濃度を低減させた原水をアナモックス槽へ連続供給する「低濃度連続運転」を実施したところ、開始時の窒素転換速度は  $0.3\sim 0.6\text{ kg-N}/(\text{m}^3\text{-担体}\cdot\text{日})$  であったが開始から約 3 週間で徐々に上昇し、約 2 ヶ月で活性低下前と同等の窒素転換速度  $4.63\text{ kg-N}/(\text{m}^3\text{-担体}\cdot\text{日})$  まで回復した。

以上より、アナモックス細菌の活性向上方法として、「低濃度連続運転」による方法の有効性が示された。



図資 2-22 アナモックス槽の流入窒素負荷および窒素転換速度の推移