

第 3 回 島地川ダム水質改善検討委員会

委員会資料

平成21年3月18日

国土交通省 中国地方整備局 山口河川国道事務所

目 次

第1章	第2回委員会までの決定事項と課題	1
1.1	委員会での決定事項と課題	1
1.2	水質目標の設定根拠	2
1.2.1	ヒ素	2
1.2.2	鉄・マンガン	2
第2章	水質改善対策の検討	5
2.1	水質改善対策検討フロー	5
2.2	深層曝気・高濃度酸素溶解施設の比較検討	6
2.2.1	深層曝気の原理	6
2.2.2	高濃度酸素溶解装置の原理	8
2.2.3	深層曝気・高濃度酸素溶解施設の比較	10
2.2.4	深層曝気・高濃度酸素溶解施設の必要台数の検討	13
2.3	島地川ダム水質改善設備の総合検討	28
2.4	島地川ダム底層部の密度について	29
2.4.1	密度の現況について	29
2.4.2	水質調査結果	31
2.4.3	酸素の供給による密度変化について	32
2.4.4	酸素の供給による境界面低下の可能性	32
2.5	アオコ対策施設との関連性について	34
第3章	水質調査計画（案）	35
第4章	まとめ	36

第1章 第2回委員会までの決定事項と課題

1.1 委員会での決定事項と課題

第2回委員会において、以下のとおり議論された。

【水質目標値】

ヒ素 : 環境基準値 (=0.01mg/L以下) を満足させる
鉄 : 水の呈色を抑える
マンガン : 水の呈色を抑える

ただし、鉄、マンガンについては水の呈色を抑える数値としては目標値設定とせず、各項目事例等による参考値として示した。

鉄 (参考値) : 0.3mg/L以下
マンガン (参考値) : 0.05mg/L以下

【対策工法】

水質目標を満足させるために、二次的な目標としてDO (溶存酸素) の供給が必要であり、他ダム事例から対策工法について、

- ・ 深層曝気装置
- ・ 高濃度酸素溶解装置

の2案が島地川ダムにおける重金属対策として有利な対策工法となることを提示した。

第2回委員会での指摘により、この2工法についてDOの供給量、現状水質改善施設の規模・台数によるコスト等の詳細な比較検討を実施する (今回委員会提示事項)。

1.2 水質目標の設定根拠

1.2.1 ヒ素

第2回委員会の中で、環境基準（0.01mg/L）を目標として設定された。

1.2.2 鉄・マンガン

1) 呈色する濃度

水道水質基準等の基準値において、鉄は0.3mg/L以下、マンガンは0.05mg/L以下となっているが、これは呈色現象を考慮して設定されている。

(1) 鉄について

- ・鉄の濃度が0.3mg/L以上では洗濯物や便器にしみが付く。（WHO, 1996）
- ・我が国では、味覚及び洗濯物への着色の観点から水質基準として0.3mg/Lが設定されている。
- ・鉄の濃度が0.05～0.1mg/L以上では配水管中で濁度や色度が高くなることもある。（厚生労働省：水質基準の見直しにおける検討概要，平成15年4月）

鉄は臭味（カナケ）や色（赤水）をつけたり、配管内に析出（スケール）して水の流れを妨げたりするので好ましくない。鉄の水道水質基準は0.3mg/Lであるが、これは健康上の理由からではなく、これらの利水上の問題を考慮して設定された（「水質調査の基礎知識」（近畿地方整備局近畿技術事務所、平成8年2月））。

WHO飲料用水質ガイドライン第2版においては、鉄の着色による苦情レベルを0.3mg/L、マンガンの着色による苦情レベルを0.1mg/Lとしている。（「水質用語集」（平成19年4月、国土交通省北陸技術事務所）

(2) マンガンについて

- ・基本的には、H4専門委の評価値を維持し、黒水障害の発生防止する観点から0.05mg/L以下とすることが適当である。（厚生労働省：水質基準の見直しにおける検討概要，平成15年4月）

マンガンは鉄と同様、臭味や着色、スケールなどを勘案して水道水質基準は0.05mg/Lが設定されている（「水質調査の基礎知識」（近畿地方整備局近畿技術事務所、平成8年2月））。

2) 島地川ダム湖におけるヒ素溶出・循環メカニズム

1. 溶出

底泥中に水酸化コロイドとして沈積したヒ素は、嫌気的環境下で還元され、鉄が2価態（第一鉄イオン） $[\text{Fe}^{2+}]$ として溶出すると同時に、3価態の亜ヒ酸イオン $[\text{As}^{\text{III}}\text{O}_3^{3-}]$ として溶出し、底層水中に蓄積して底層ヒ素濃度を上昇させる。

2. 酸化

溶出した亜ヒ酸イオン $[\text{As}^{\text{III}}\text{O}_3^{3-}]$ は、水中で拡散し有酸素層に達すると、水中の溶存酸素によって酸化され、5価態のヒ酸イオン $[\text{As}^{\text{V}}\text{O}_4^{3-}]$ となる。一方、第一鉄イオン $[\text{Fe}^{2+}]$ は酸化されると水酸化第二鉄 $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$ となって析出する。

3. 鉄による吸着

酸化された5価態のヒ酸イオン $[\text{As}^{\text{V}}\text{O}_4^{3-}]$ は、鉄の存在があれば水酸化第二鉄 $[\text{Fe}^{3+}]$ に吸着されて水酸化鉄コロイド $[\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{AsO}_4^{3-}]$ を形成する。

4. 沈殿（鉄との共沈）

ヒ素が鉄に吸着されて生成された水酸化鉄コロイド $[\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{AsO}_4^{3-}]$ は凝集・沈殿し、底泥表面に沈積する。（鉄との共沈）

5. 再溶出

底泥表面に沈積した水酸化鉄コロイド $[\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{AsO}_4^{3-}]$ は、嫌気的環境下で再び還元されると、第一鉄イオン $[\text{Fe}^{2+}]$ と亜ヒ酸イオン $[\text{As}^{\text{III}}\text{O}_3^{3-}]$ に遊離し、再溶出が生じる。

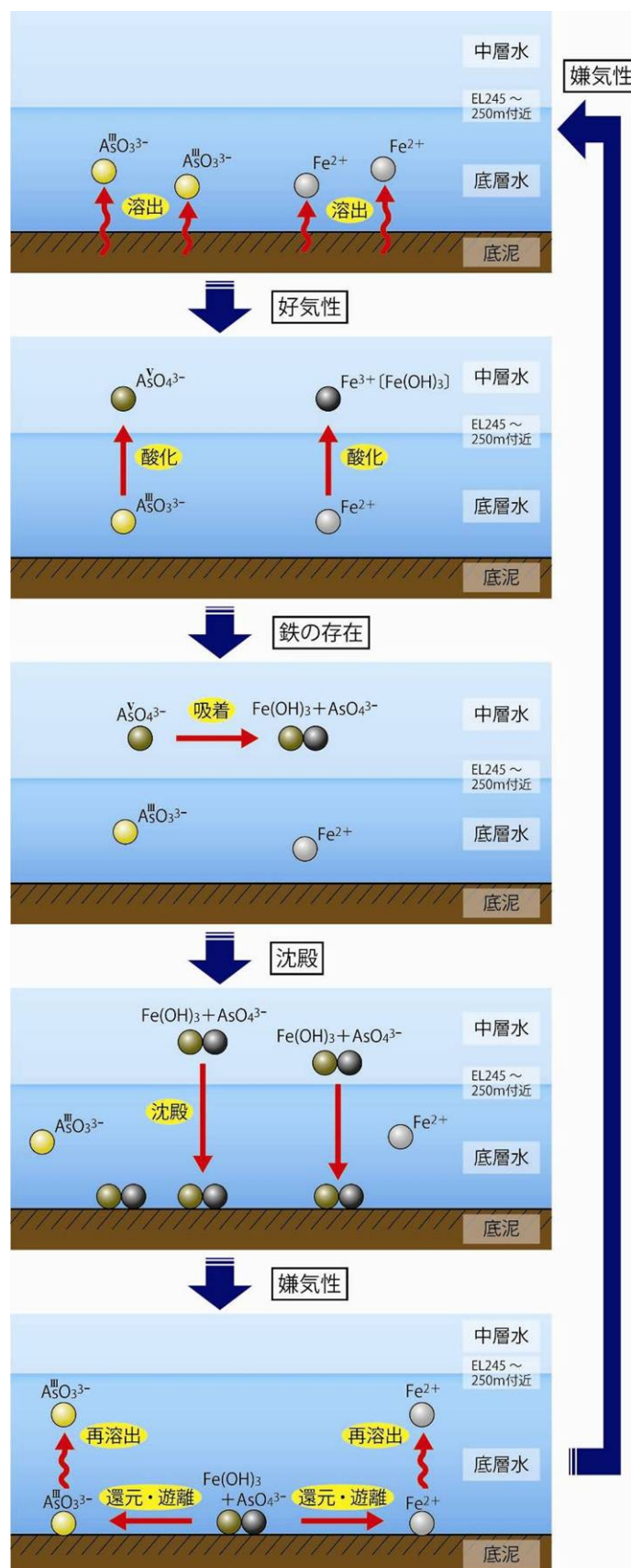


図 1-1 ダム湖底層・底泥におけるヒ素の循環モデル

3) 金属イオンの酸化還元反応について

酸化第二鉄や二酸化マンガンは普通に土壤に含まれるため、好気条件下では、貯水池に存在する鉄やマンガンは酸化されて Fe^{3+} や Mn^{4+} となり、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 MnO_2 として底泥に沈降している。ヒ素も $\text{Fe}(\text{OH})_3$ に吸着され、水酸化鉄コロイド $[\text{Fe}(\text{OH})_3+\text{AsO}_4^{3-}]$ として共沈する。

しかしながら、底層が嫌気条件下である場合、沈降していた $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 MnO_2 は還元されて、それぞれ Fe^{2+} や Mn^{2+} となり溶出する。

これらの反応は、各物質の酸化還元電位の違いにより、以下の順で行われる。

ダムの供用

1. 溶存酸素の減少

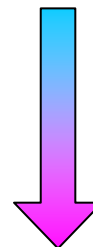
2. 土壤中の二酸化マンガン（不溶性）が還元され、酸化マンガン（可溶性）となり、 Mn^{2+} が溶出



3. 土壤中の酸化第二鉄（不溶性）が還元され、酸化第一鉄（可溶性）となり、 Fe^{2+} が溶出



D0の減少・酸化還元
電位低下の継続



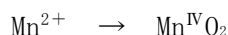
深層曝気施設あるいは高濃度酸素供給溶解の稼働

1. 溶存酸素の回復

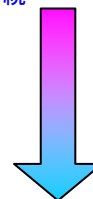
2. 鉄イオンが酸化され、水酸化三鉄が析出



3. マンガンイオンが酸化され、二酸化マンガン（不溶性）になる



D0の増加・酸化還元電位
上昇の継続



鉄とマンガンの酸化還元電位が異なることから、マンガンの方が酸化されにくく、深層曝気などにより酸素を供給した場合にも、鉄よりも遅れるが、酸化反応は進む。これは某ダムで行われた実験でも明らかにされている。

第2章 水質改善対策の検討

2.1 水質改善対策検討フロー

本検討は以下の流れで実施した。

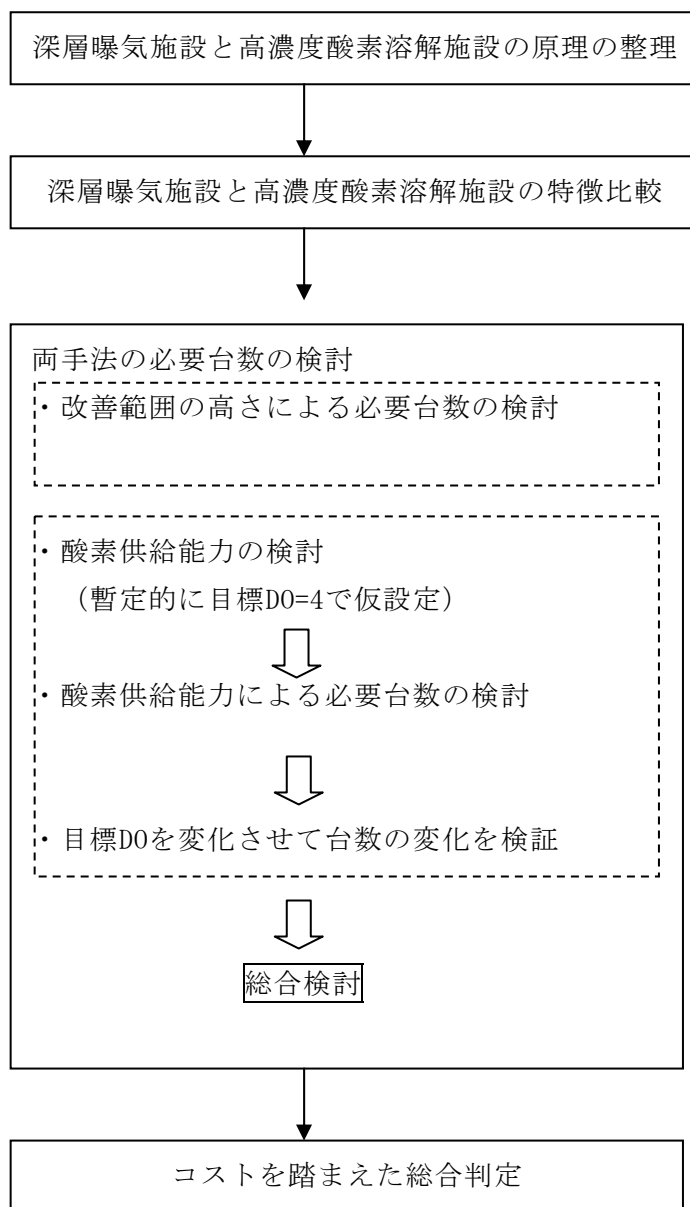
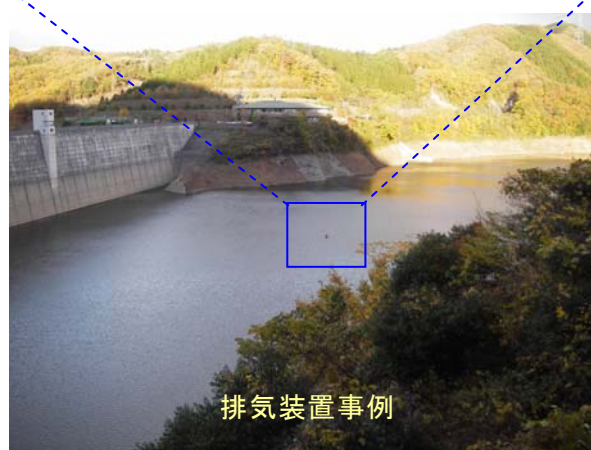
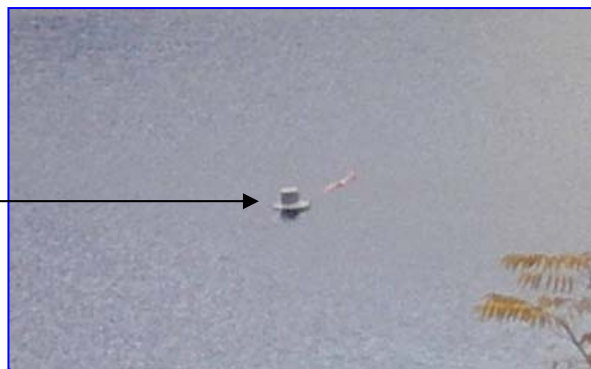
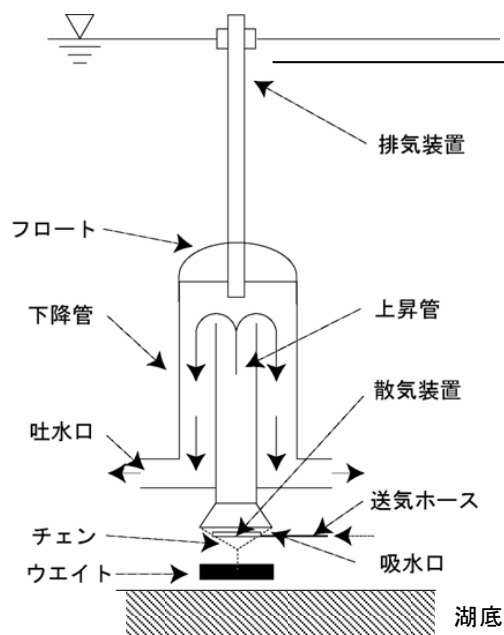


図 2-1 島地川ダム底層のヒ素分布推定結果

2.2 深層曝気・高濃度酸素溶解施設の比較検討

2.2.1 深層曝気の原理



排気装置事例

(構造)

深層曝気装置本体は外筒と内筒の二重管構造となっており、内筒底部には散気ディフューザーが装備され、装置本体の上部にはフロート体が組み込まれている。このため、装置本体は水中フロートにより浮力を有し、底部のシンカーによって固定され、水中で直立した状態となっている。

また、装置本体には排気用ホースがあり、水面上に浮遊している排気用フロートと接続されている。

(原理)

陸上の空気圧縮機から散気ディフューザーに空気が送られ、散気ディフューザーからは小気泡が発生し、この小気泡が上昇することにより、内筒内の水が連行され、底層水が揚水される。このとき、気泡と水の接触により酸素が底層水に供給される。

揚水された底層水は、装置本体の上部で下降流となり、外筒と内筒の隙間を下降し、再び底層へ送水される。



陸上施設の建屋事例 (6m×9mで2台の深層曝気用)



水中への気体と電源の配管事例

(吸込口の設置高さ)

底層堆積物（シルト）の移動限界流速は、細粒分に関しては、岩垣の式が用いて算出できる。このため、シルト分（ $\leq 75 \mu\text{m}$ ）の限界流速と吸い込み口で生じると予測される流速を勘案して、底層の堆積物を直接巻き上げないような高さにする。

これに加えて、将来の堆砂厚も考慮して、底層からの高さが設定される。

第2回委員会で示した他ダム事例では1.0m～3.0mと設定されている。

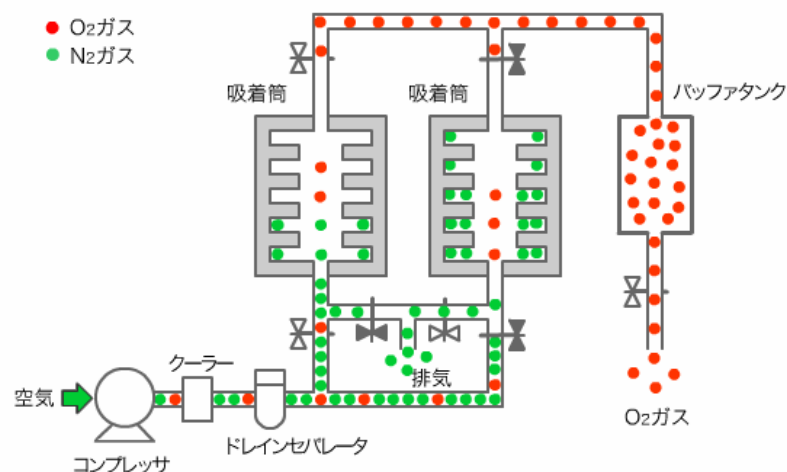
(空気吐出量)

他ダムに聞き取りを行った結果、水質改善対象水量（70万～150万 m^3 ：島地川ダムでは88万 m^3 ）での空気吐出し量は1.2～1.75 m^3 であった。

2.2.2 高濃度酸素溶解装置の原理

1) 酸素発生装置の原理（陸上部）

ゼオライトと呼ばれる吸着剤を用いて、空気中より酸素を選択的に取り出す。吸着剤はアルカリ土類金属を含む結晶性含水アミノ珪酸塩で、多数の細孔を有しており、酸素より窒素を多量に吸着する。



<http://www.sdk-kk.co.jp/prd/gas/O2.html>

図 2-2 酸素発生装置の原理

2) 気液溶解装置の原理（水中部）

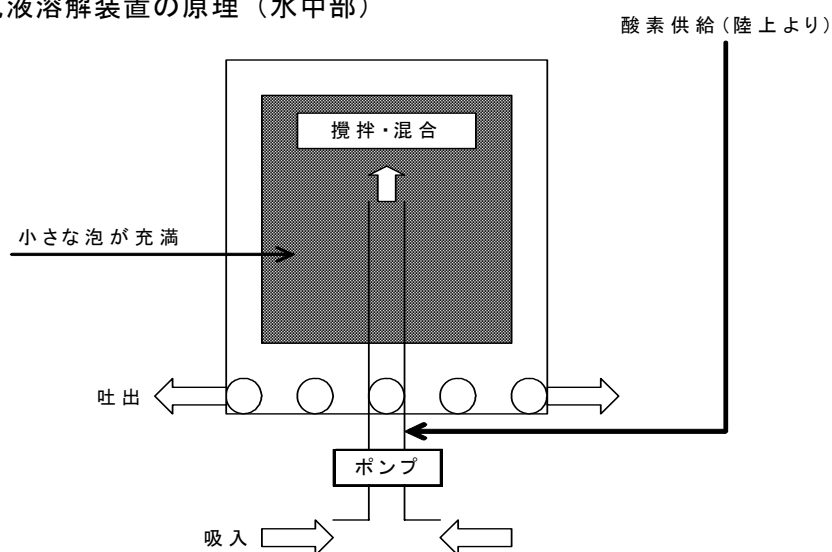


図 2-3 気液溶解装置の原理

- 底層で溶解を行うため、底層の水圧により気体の体積が減少し、より多くの酸素を溶解させられる。
- 高濃度酸素を用いること、構造上気液の溶解効率が低いことにより、小型の気液溶解装置で対応ができる。
- 水の吸込み、吐出しの速度が小さく（水の吐出しの観測値は最大値で4mm/secと小さい）、乱れが小さい。

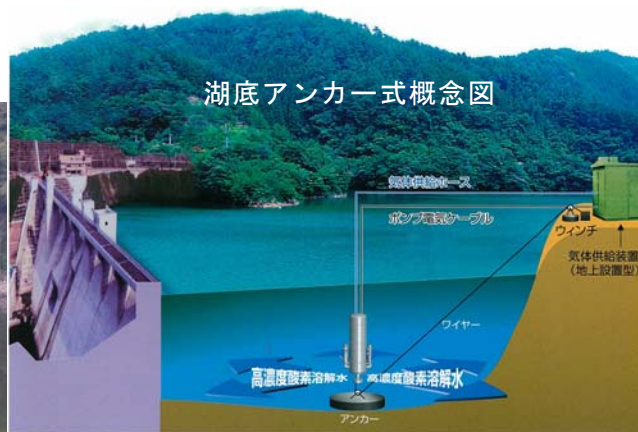
3) 設置方式

高濃度酸素水溶解装置には、湖底アンカー方式とフロート船方式がある。湖底アンカー式は湖面にはウインチにつながるワイヤーのみが存在し、景観に与える影響は小さい。一方、フロート船方式では鉛直方向だけでなく、水平方向にも位置が自由に変えられるというメリットがある。効果・コストには大きな違いはない。

湖底アンカー方式



上下運動のためのウインチ



- 湖底アンカー式特徴
- ・湖面の景観変化が少ない

図 2-4 湖底アンカー方式の特徴

フロート船方式



- フロート船式特徴
- ・上下だけでなく左右にも移動可

図 2-5 フロート船方式の特徴

2.2.3 深層曝気・高濃度酸素溶解施設の比較

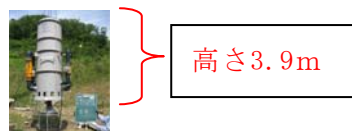
1) 大きさの比較

深層曝気施設は、国内でよく使用されている標準サイズであり、島地川ダムでの適用の際の候補となっているタイプだと、高さが16mとなる。

一方、高濃度酸素溶解施設では高さが3.9mと、深層曝気施設に比べて1/4程度である。この特徴により、上下運動が可能となっている。



深層曝気施設



高濃度酸素溶解施設

図 2-6 大きさの違い

2) 改善範囲の比較

深層曝気施設は、国内ダムの事例を元にとすると、高さ方向の改善範囲は10m、高濃度酸素溶解施設の改善高さは島地川ダムでの実証実験結果より、4 m程度となっている。ただし、高濃度酸素溶解施設は上下移動が可能であり、要注意水域である250 (EL. m) から、改善しながら徐々に下に降ろすことで広い範囲に適用できる。

なお、水平方向については、深層曝気で1 kmまで広がるという報告があり、高濃度酸素でも1km広がると報告されているが、どちらも改善範囲が地形により制限されるまで効果が及んでおり（地形に沿って酸素水塊が斜面を上ることはない）、本来はもっと広く効果が及ぶと考えられる。よって、M0～M3の長さ方向600mに効果を及ぼすことが可能であると考えられる。

吐き出し口での溶存酸素濃度は水深によって変化するが、水深約20m程度の時に深層曝気施設では10mg/L程度（某ダム結果）、高濃度酸素施設では30 mg/L程度（某ダム結果）である。

表 2-1 改善範囲の比較

	深層曝気	高濃度酸素
装置規模(標準)	空気吐出量 1.2～1.75 m ³ /min	送水量90～120m ³ /h
高さ方向の移動	×	○
水平方向の効果	○ (M0～M3の距離=600mは1基で効果が及ぶ)	○ (M0～M3の距離=600mは1基で効果が及ぶ)
水平方向の移動	×	×/○ (フロート船式であれば移動可能、p. 9参照)
高さ方向の効果	約10m	約4m
改善効果(他ダム事例)	吐き出し部でDO=10mg/L程度（水深約20m）：某ダム	吐き出し部でDO=30mg/L程度（水深約20m）：某ダム
	600mの距離で2mg/L程度（水深約20m）	600mの距離で6mg/L程度※（水深約20m）

※水質調査地点は吐き出し口からの距離が500mか700mに設置されており、600mの距離での観測値は500mと700mの値を参考に大まかな値を推定した。

3) 主要な装置の比較

深層曝気では、水中部の溶解装置に加え、陸上部にコンプレッサーが必要である。
対して、高濃度酸素では、水中部の溶解装置に、コンプレッサー、酸素発生装置が必要となる。

表 2-2 必要な電力量の比較

	深層曝気	高濃度酸素
装置の規模	空気吐出量 1.6 m ³ /min	送水量 120m ³ /h
システム全体	15 k W	22.5 k W (内、酸素発生装置10.0 k W)

2.2.4 深層曝気・高濃度酸素溶解施設の必要台数の検討

1) 酸素供給範囲による検討

深層曝気施設の場合、国内実績より深さ方向の改善範囲は10m程度である。要注意水域は222～250 (EL. m) であるが、240～250 (EL. m) は環境基準値よりもヒ素濃度が低いことから、要注意水域のうち222～240 (EL. m) を対象として、最低でも2台の深層曝気施設が必要となる。

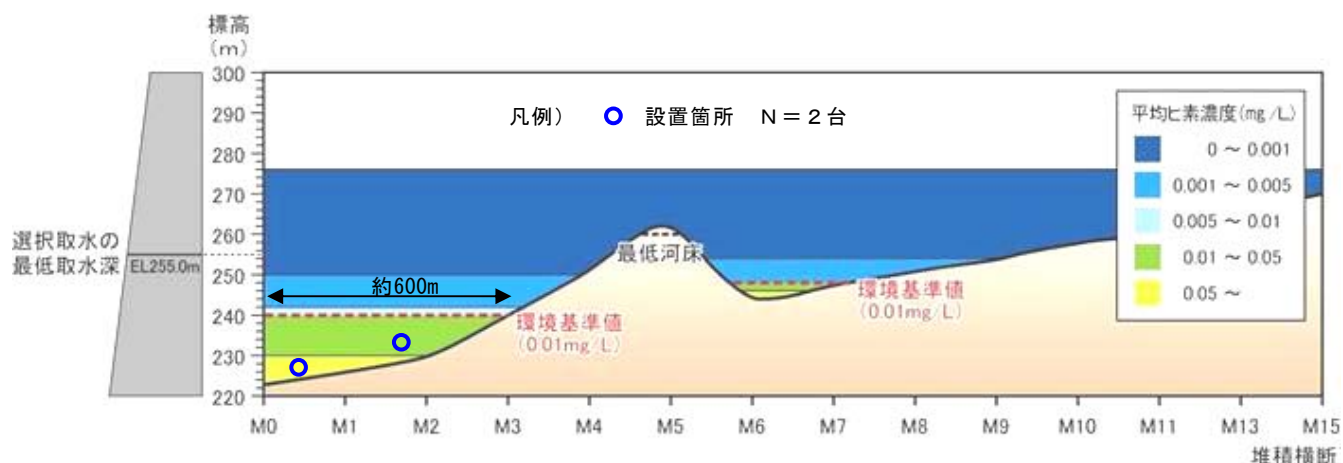


図 2-7 深層曝気施設の施設配置 (案)

一方、高濃度酸素施設は上下運動が可能であることから、必要な酸素量が供給できるのであれば、1台で要注意水域全てをカバーできることになる。

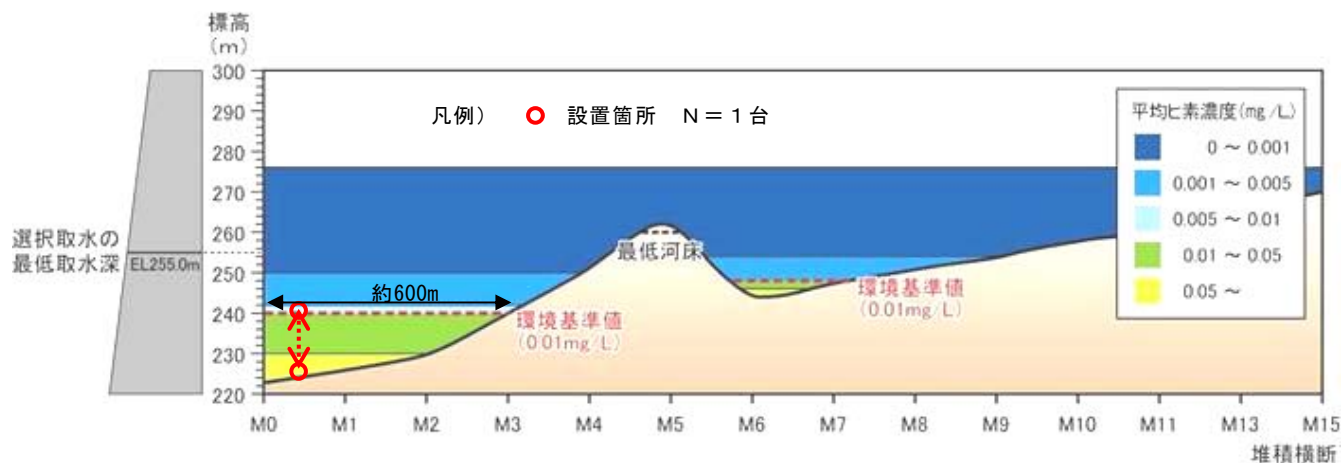


図 2-8 高濃度酸素施設の施設配置 (案)

酸素供給範囲の条件より、深層曝気施設は最低でも2台、高濃度酸素施設は最低1台の施設が必要である。

これに加え、施設からの酸素供給能力や、島地川ダム底層水・底質における酸素消費量によって施設の必要な台数が変化する。これについては次節以降で検討する。

2) 曝気施設の酸素供給能力の検討

ここでは、深層曝気装置と高濃度酸素溶解装置1台から供給される酸素量を検討した。

(1) 目標とするD O値の仮設定

深層曝気装置と高濃度酸素溶解装置からの酸素供給量は改善地点のD Oによって変化する。このため、ヒ素対策の観点から暫定的にD0=4 mg/Lを仮目標値として検討を行い、後ほどD0を変化させた場合に酸素供給能力や必要台数の算定結果がどのように変化するかを検証することとする。

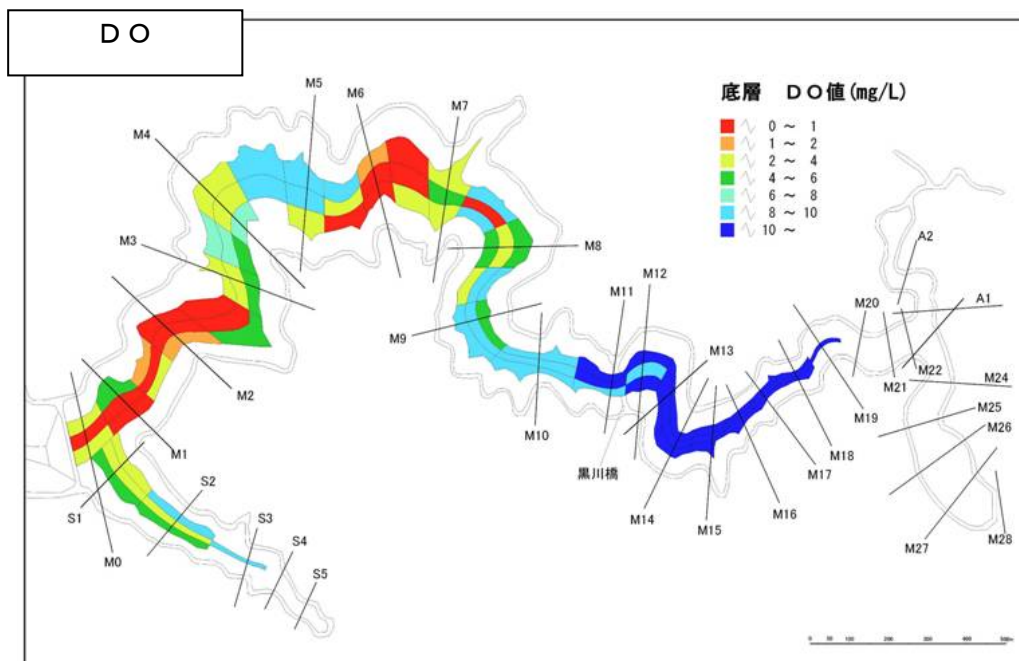


図 2-9 島地川ダム底層のD O分布推定結果

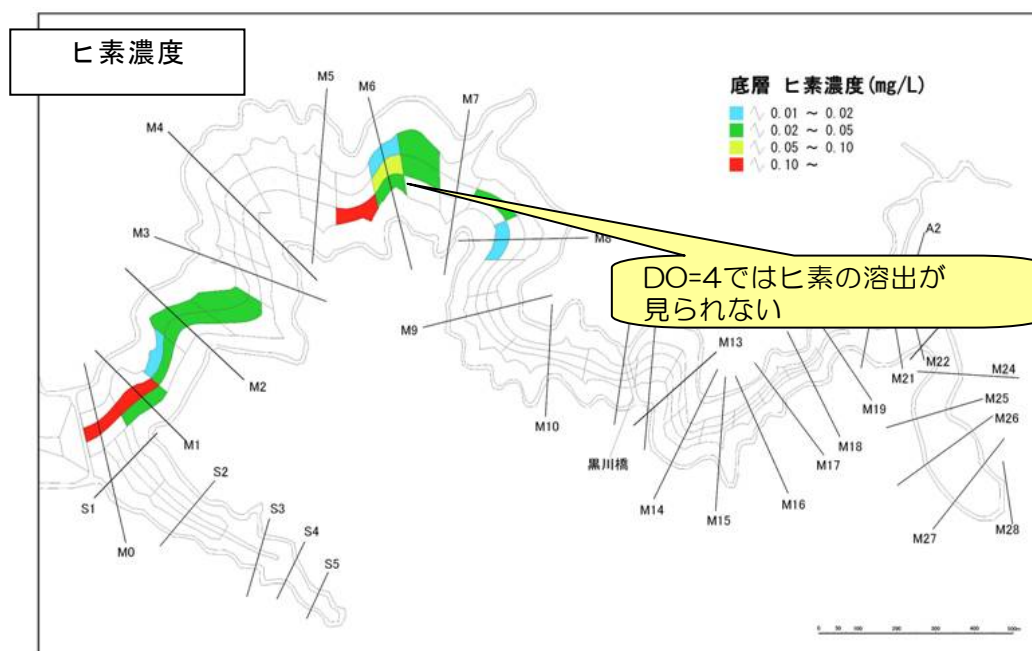


図 2-10 島地川ダム底層のヒ素分布推定結果

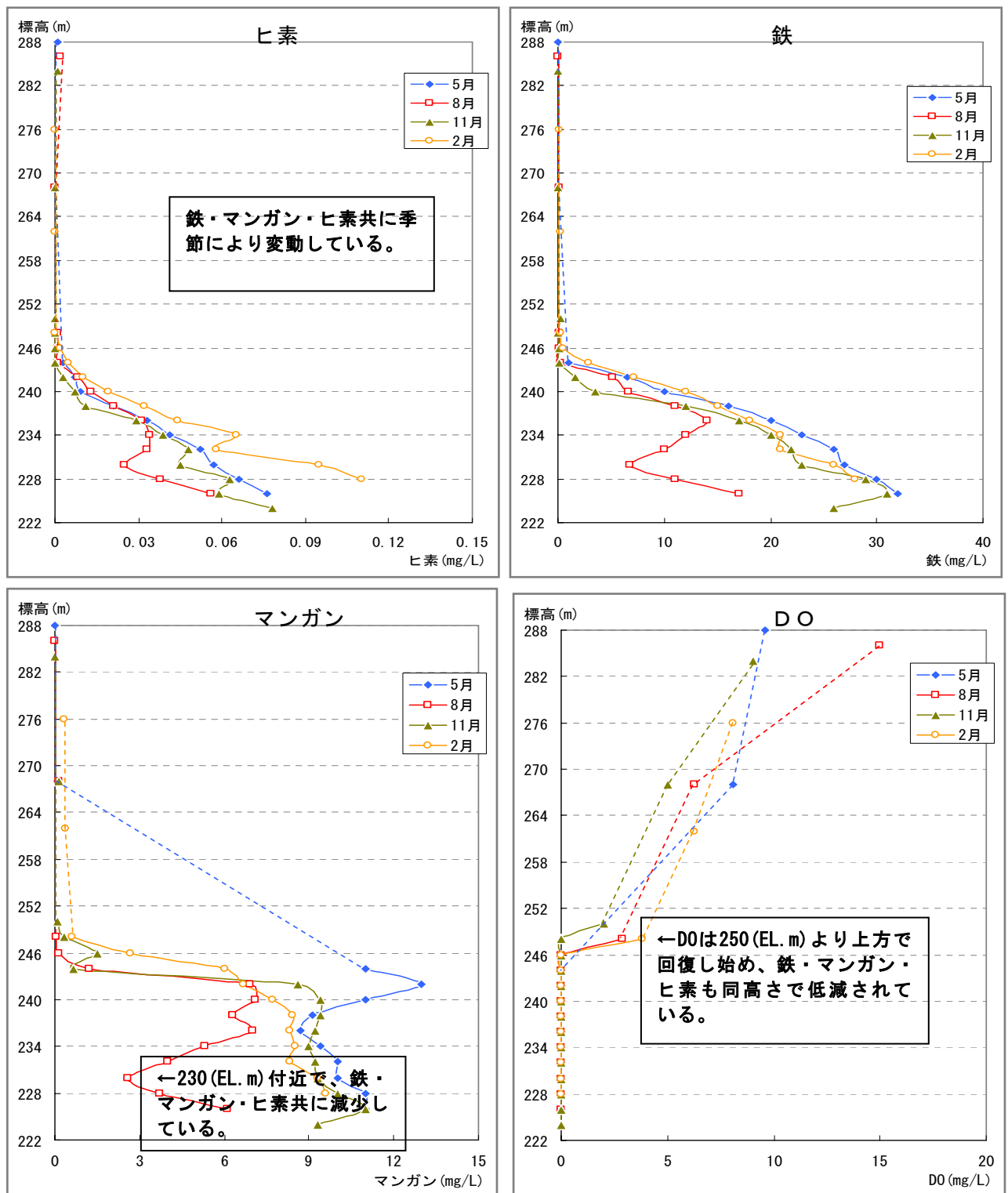


図 2-11 水質の鉛直分布（平成 18 年度，M1）（項目：ヒ素，Fe，Mn，DO）

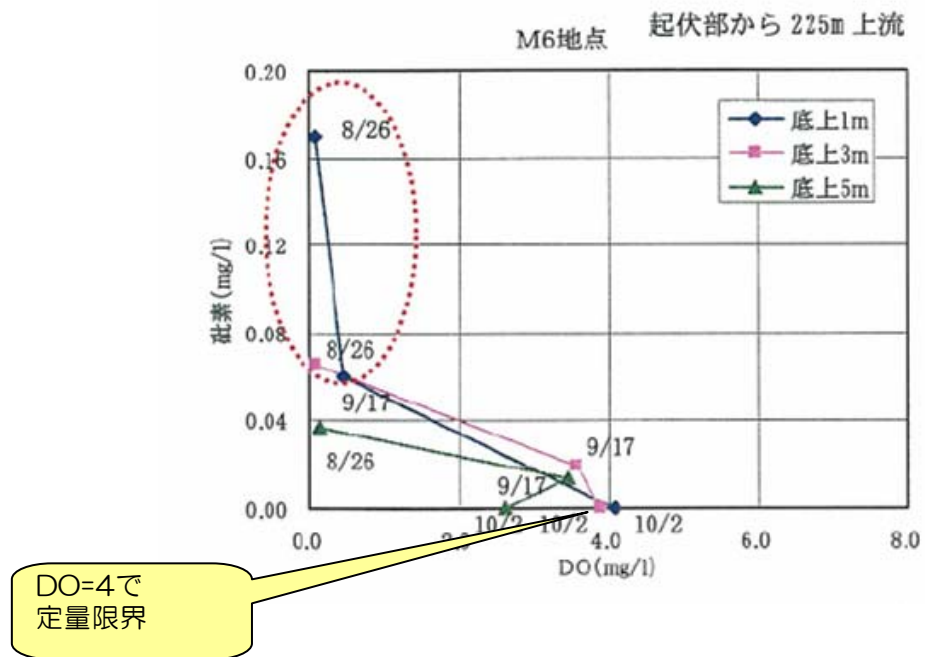


図 2-12 島地川ダム：マイクロバブル実証実験時のヒ素の挙動

以上より、ヒ素とDOは密接な関係にあり、かつDO=4になれば環境基準値0.01mg/Lを満足できると考えられる。

仮の設定値として、DO=4 mg/Lとして以後の検討を行い、その後、DOを変化させた時の違いを検証する。

(2) 深層曝気装置の酸素供給能力

深層曝気装置の空気吐出し量は $1.6\text{m}^3/\text{min}$ 程度までであるとされており（メーカー聞き取りによる）、水深 50m （常時満水位では、要注意水域は水深 $40\text{m}\sim 60\text{m}$ となることから中心で試算）では、 $220\text{ kg}/\text{日}$ 程度の酸素供給量であると算定される。

表 2-3 深層曝気1基から供給される O_2

算定法	備考
1台当たりの送気量は $1.6\text{m}^3/\text{min}$ 程度	メーカー内部資料
酸素溶解効率 $E = -0.039479 \times 10^6 \times L/V + 0.51053$ $= 0.353$ L =底層水の DO 量(t)、 V =底層水の貯水量であり $L/V = 4 \times 10^{-6}$ ($\text{DO} = 4\text{mg}/\text{L} \rightarrow 4 \times 10^{-6} \text{ t}/\text{m}^3$)	上記資料より（水深 30m での実験値） L/V は底層部の DO 濃度に相当し、この値が高いほど溶解効率は下がる。
酸素溶解効率は水深の 0.72 乗に比例することから、 酸素溶解効率 $E' = 0.353 \times (50/30)^{0.72} = 0.51$	上記資料より（水深 50m^* に換算）
$N = 1.6 \text{ m}^3/\text{min} \times \text{酸素溶解効率} E' (0.51) \times \text{大気} 1 \text{ m}^3 \text{ 中の酸素量 } 0.28\text{kg}/\text{m}^3 \times 1440 (60\text{min} \times 24\text{h}) = 329.0\text{kg}/\text{日}$ 安全率 5 割を見込むことから、運用上は <u>$220\text{ kg}/\text{日}$</u> 程度の供給量と算定	上記資料より（酸素溶解効率に他ダムのデータを用いることから安全率を 5 割見込む）

※水深 50m で試算した。

(3) 高濃度酸素溶解装置の酸素供給能力

島地川ダムでH16年に実施した送水量90m³/hでの実験から、今回検討する120m³/hの装置の能力を推定する。

この実験では、水深40mのM6において、90m³/hの送水量に対し、7.2Nm³/h（標準状態で送水量の8%）の酸素で実験を開始した。この際に供給した酸素の理論値は以下のとおりである。なお、この実験時には92%の酸素濃度であった。

陸上から供給された酸素の理論値

$$7.2(\text{m}^3/\text{h}) \times 92\% \times 32(\text{g}/\text{mol}) \div 22.4(\text{L}/\text{mol}) \times 10^3(\text{m}^3 \rightarrow \text{L}) = 9,462(\text{g}/\text{h})$$

$$9,462(\text{g}/\text{h}) \div 90\text{m}^3/\text{h} = 105.1(\text{g}/\text{m}^3) = 105.1(\text{mg}/\text{L})$$

一方、吐き出しD0の実測結果は以下のようになる。水深40mにおいて、酸素供給を8%で行った場合には81.3/105.1=77%が溶解したと想定される。

表 2-4 島地川ダムにおける吐出しD0（実測値と理論値）

水深 (m)	水温 (℃)	原水D0 (mg/L)	吐出D0（実測）	吐出D0（供給理論値）
			7.2Nm ³ /h (8%) (mg/L)	7.2Nm ³ /h (8%) (mg/L)
10	14.4	6.0	52.3	105.1
20	6.0	4.3	63.0	
30	5.4	0.6	76.3	
40	6.7	0.1	81.3	

注：吐出D0は溶解装置吐出口近傍に設置したD0センサーによる実測値

水深50m、水深60mの時の吐出しD0を外挿により推定すると、表 2-5のとおりとなる。8%の酸素供給の場合、水深40m（常時満水位の時に240～250EL. mの範囲に相当）では酸素供給量の77%が溶解してD0=81.3mg/L、水深60m（常時満水位の時に220～230EL. mの最深部に相当）では98%が溶解し、103.3mg/Lになっていたと考えられる。

表 2-5 島地川ダムにおける深さごとの溶解効率

水深 (m)	吐出D0（実測） (mg/L)	吐出D0（供給理論値） (mg/L)	溶解効率
	7.2Nm ³ /h (8%)	7.2Nm ³ /h (8%)	7.2Nm ³ /h (8%)
10	52.3	105.1	50%
20	63.0		60%
30	76.3		73%
40	81.3		77%
50	93.3		89%
60	103.3		98%

凡例) 赤字は外挿による推定値

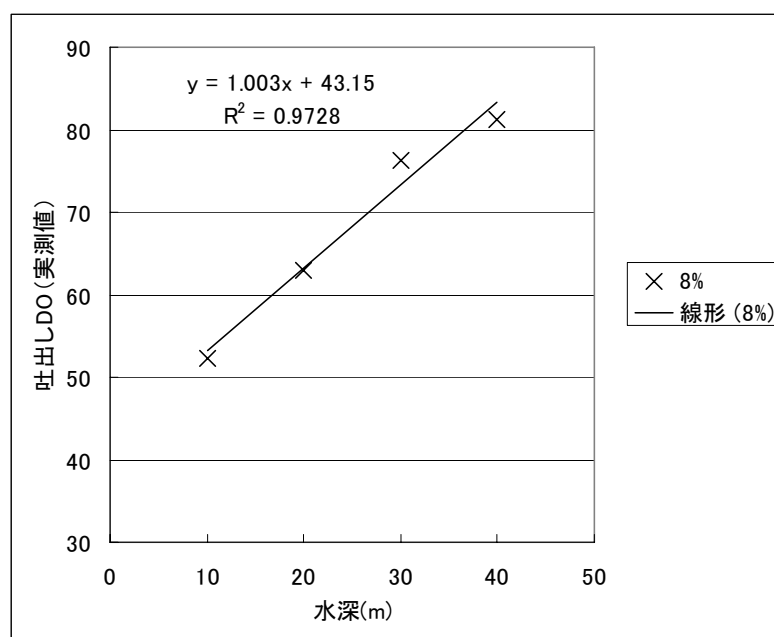


図 2-13 島地川ダムの水深と吐出し D0（実測値）

次に、今回導入する高濃度酸素溶解装置は、国内実績のある送水量は最大で120m³/h、酸素供給装置は9.6 m³/h（標準状態で送水量の8%）の気体供給能力が想定される。また、酸素供給装置は最低でも90%は酸素供給が可能であることから、陸上部からは296 kg／日程度の酸素供給がなされ则认为られる。

表 2-6 高濃度酸素1基に供給されるO₂（陸上部）

算定法	備考
$9.6 \text{ m}^3/\text{h} \times 90\% \times 32 \text{ g (酸素1mol重さ)} \times 1000/22.4 \text{ (L} \rightarrow \text{m}^3)$ $\times 24 \text{ (h)} / 1000 \text{ (g} \rightarrow \text{kg)}$ $= \boxed{296 \text{ kg} / \text{日 (陸上からの送気量)}}$	

深層曝気施設と同様に水深50mを想定すれば、89%の溶解効率であることから、水中では $296 \times 89\% = \boxed{263 \text{ kg} / \text{日}}$ 程度の酸素供給がなされ则认为られる。

表 2-7 高濃度酸素1基から供給されるO₂（水中部）

算定法	備考
$296 \text{ kg} / \text{日} \times 89\% = \boxed{263 \text{ kg} / \text{日}}$	

※水深50mで試算した。

次に、目標とするD0が酸素溶解効率に影響を与えるかどうか検討した。

平成16年に行われた高濃度酸素溶解装置の実験により、以下の結果が得られている。これによれば、気圧とD0増加の間には相関係数の高い正比例の関係があり、気体の溶解度は圧力に比例するというヘンリーの法則どおりの結果であった。

これにより、高濃度酸素溶解装置の溶解効率は、水深（気圧）により影響されるが、目標とするD0（＝定常運転時の初期D0）は影響しないことがわかる。

平成16年7月10日 酸素供給実験

水温 (℃)	水深 (m)	気圧 (atm)	初期D0 (mg/L)	吐き出し濃度 (mg/L)			D0 増加 (mg/L)		
				5%	8%	10%	5%	8%	10%
14.9	10	2	14.9	43	52.3	56.5	28.1	37.4	41.6
6	20	3	6.9	48.5	63	77	41.6	56.1	70.1
5	30	4	3.1	59	76.3	90	55.9	73.2	86.9
6	40	5	0.2	62	81.3	112	61.8	81.1	111.8

平成16年10月14日 空気供給実験

水温 (℃)	水深 (m)	気圧 (atm)	初期D0 (mg/L)	吐き出し濃度 (mg/L)			D0 増加 (mg/L)		
				5%	8%	10%	5%	8%	10%
14.4	10	2	6	11.7	12.8	13	5.7	6.8	7
6	20	3	4.3	10.4	14.2	16.4	6.1	9.9	12.1
5.4	30	4	0.6	9.8	16.4	19	9.2	15.8	18.4
6.7	40	5	0.1	11.4	17.9	20.6	11.3	17.8	20.5

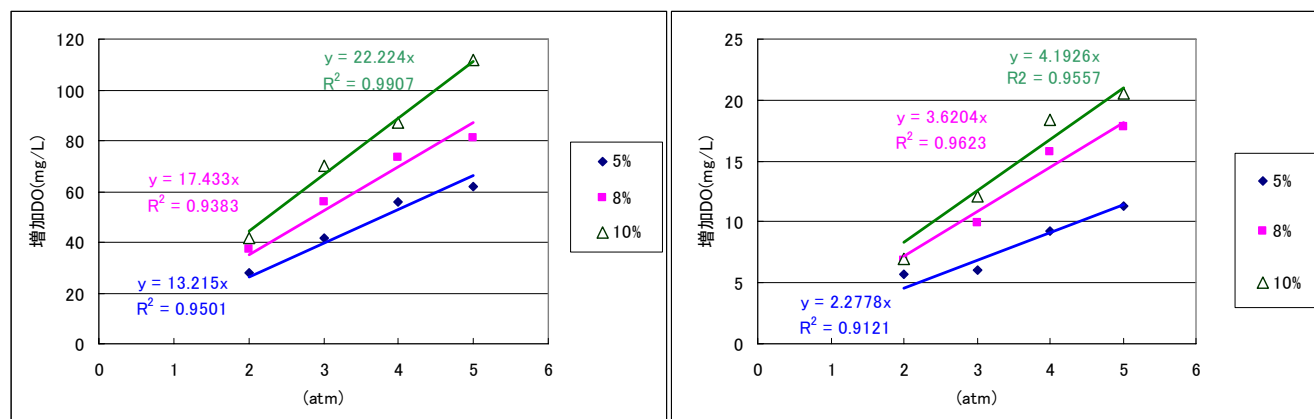


図 2-14 気圧と D0 増加の関係（左：酸素供給時、右：空気供給時）

この現象は「酸素濃度が高く、構造的に気体をよく溶解させられるため、溶解効率が初期D0に依存しない。」と感覚的に表現することができる。

(4) 水質対策施設の比較

上記の検討結果を整理すると、以下のとおりとなる。

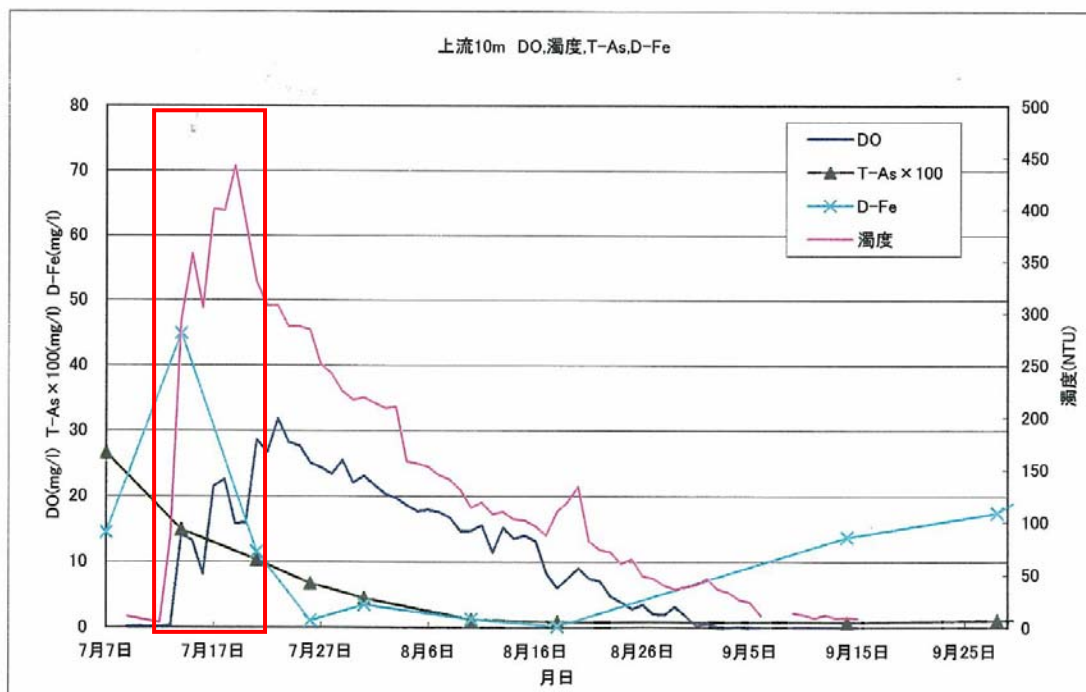
表 2-8 比較する水質対策施設(1基当たり)の諸元

諸元		深層曝気装置	高濃度酸素溶解装置
送水量		—	120 m ³ /h (国内事例最大クラス)
送気量 (陸上)	空気	1.6 m ³ /min(標準クラス)	—
	酸素	—	0.16Nm ³ /min (9.6Nm ³ /h (送水量の8%))
設定水深(本表の計算条件)		50m	50m
酸素溶解効率		0.51	0.89
設定水深への日当り酸素供給量		220kg/日	263kg/日
上下運動の可否		上下運動は不可能	上下運動が可能

3) 島地川ダムの酸素消費量の算出

ここでは、施設の必要台数検討に必要なデータとして、島地川ダムの酸素消費量を算出した。

島地川ダムにおける高濃度酸素実験(H16.7.12～H16.7.22)の結果を以下に示す。



実験期間

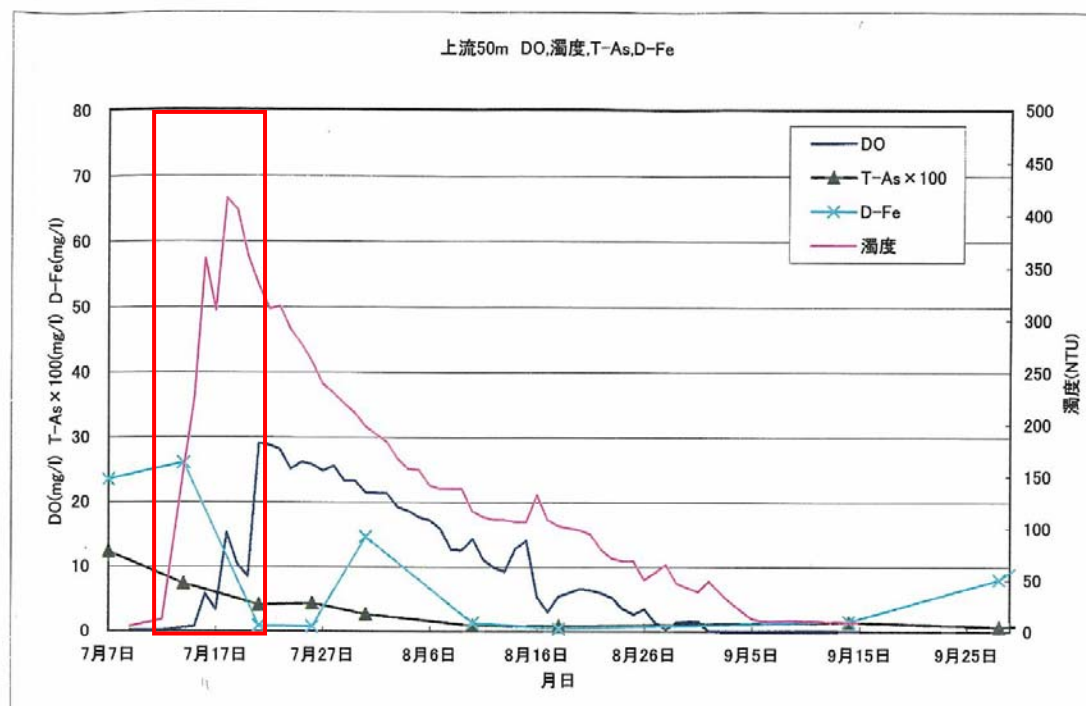
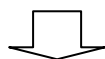


図 2-15 DO・ヒ素・鉄・濁度の状況（高濃度酸素実験：H16.7.12～H16.7.22）

島地川ダムにおいて、高濃度酸素実験（H16.7.12～H16.7.22）より供給された酸素量は以下のとおり、1,375kgである。

日時	時間	供給酸素量
H16.7.12 9時～H16.7.16 15時	102 h	7.2Nm ³ /h
H16.7.16 15時～H16.7.22 15時	114 h	4.5Nm ³ /h



供給酸素量 (m ³ /h)	1mol当たりの酸素の重さ (g/mol)	時間 (h)	標準状態での1 m ³ 当たりのmol数 (mol/m ³)	総供給酸素量 (kg)
7.2×92%×77%	32	102	1,000/22.4	743
4.5×92%×94%※	32	114	1,000/22.4	634
				計 1,377

※表 2-5と同様に、4.5Nm³/h、水深40mでは94%が溶解すると試算される

このとき改善された範囲はM6の底層～251 (EL. m) の109千m³であり、7/12～9/4の54日間で全て消費されてD0=0に戻ったことから、

$$1,377 \text{ kg} / 109 \text{ 千m}^3 / 54 \text{ 日} = 0.23 \text{ g} / \text{m}^3 \cdot \text{日}$$

となる。

なお、島地川ダムでの実験値を既往の報告値と比較すると、表 2-9のとおり整理される。島地川ダムでの高濃度酸素の実験結果では、それまでD0=0の状態が長く続いている時に単発的に酸素を付加したものであり、曝気装置が定常的に運転されている状態よりも酸化される物質ははるかに多いと考えられる。

このため、過大な施設の導入を防ぐためには、島地川ダム以外の実験結果も踏まえることが重要である。

表 2-9 底層水の酸素消費速度

酸素消費量	算定根拠	要注意水域に必要な酸素量※	出典
0.23g/m ³ ・日	H16_7月 島地川ダムM6 高濃度酸素実験後のDO 変化より	202.4 kg/日	島地川ダム実験値
0.12 g/m ³ ・日	某ダムDO消費速度試験 結果（10℃、泥＋水）： ダムサイトの泥	105.6 kg/日	他ダム事例より
0.0752 g/m ³ ・日	某ダム実験値：貯水池 中央部平均	66.2 kg/日	他ダム事例より
0.0563 g/m ³ ・日	某ダム実験値：ダムサ イト平均	49.5 kg/日	他ダム事例より

※要注意水域＝880,000m³

4) 必要台数検討結果

以上の検討の結果、M1に導入する際に必要な施設の台数を表2-10に示す。底層水の酸素消費量の値によらない結果となった。

深層曝気施設は、酸素供給能力の観点からは底層水の酸素消費量の最大値を採用しても1台となるが、p.13の条件（酸素供給範囲が高さ20mである）より、2台となる。

一方、高濃度酸素溶解施設(120m³/h)を導入する場合、いずれの観点からも1台でよいと算定された。

なお、高濃度酸素溶解施設の場合、1ランク下の施設(90m³/h)を使うと、2台必要になってしまうことから、これまでの検討どおり送水量120 m³/hを選定することが必要である。

酸素供給能力の条件ではいずれも1台で足りると考えられたが、酸素供給範囲によって必要とされる台数の条件より、深層曝気施設は2台、高濃度酸素施設は1台必要であると算定された。

表 2-10 要注意水域に必要な曝気施設の台数

底層水の 酸素消費量	要注意水域に 必要な酸素量	深層曝気台数		高濃度酸素 (120m ³ /h) 台数		(参考値) 高濃度酸素 (90m ³ /h) 台数	
		220kg/ 日より※	最低 台数	263kg/日 より※※	最低 台数	197kg/ 日※※	最低 台数
0.23 g/m ³ ・日	202.4 kg/日	0.92	2	0.77	1	1.03	1

※水深50m、目標DO=4.0mg/Lで試算した。 ※※水深50mで試算した。

最低台数は酸素供給範囲によって必要とされる台数

5) 目標を変化させた場合の台数検証

(1) 深層曝気施設の場合

深層曝気施設の目標を変化させた場合にどれだけ必要台数が変化するかを検討した。その結果、目標DO=1mg/L～6mg/Lのいずれに設定しても、必要な台数は2台であり、変化はなかった。

深層曝気の酸素溶解効率

Do(mg/L)	E'(水深50m)
1	0.68
2	0.62
3	0.57
4	0.51
5	0.45
6	0.40

1台からの酸素供給量

kg/日	Do(mg/L)	E'(水深50m)
	1	439.0
	2	402.2
	3	365.4
	4	328.6
	5	291.8
	6	255.0

安全率を見込んだ場合

kg/日	Do(mg/L)	E'(水深50m)
	1	293
	2	269
	3	244
	4	220
	5	195
	6	171

深層曝気必要台数詳細

202.4 kg/日より	Do(mg/L)	E'(水深50m)
	1	0.69
	2	0.75
	3	0.83
	4	0.92
	5	1.04
	6	1.18

(2) 高濃度酸素溶解施設の場合

高濃度酸素溶解施設の場合は目標とするDOは酸素溶解効率に影響しないため、必要な台数は1台のみである。

2.3 島地川ダム水質改善設備の総合検討

表 2-11 水質改善設備の比較

装置形式		深層曝気装置		高濃度酸素溶解装置	
原 理		底層に設置した装置へ底層水を取込み、取込んだ水に地上から引き込んだ空気を気泡状にして混合、D Oを溶け込ませた水を再度底層へ返送する		底層に設置した底層水を気体溶解装置に取込み、取込んだ底層水に酸素発生装置からの酸素を水压により高濃度に溶解させ、酸素改善を行う場所へ返送する。	
装置の規模		空気吐出量 1.6 m³/min （15kW）		送水量 120m³/h （22.5kW：内、酸素発生装置10.0kW）	
1 台当たり酸素供給量		220kg／日 （水深50m時）		263kg／日 （水深50m時）	
必要台数		2 台		1台	
効果・効率		◎比較的簡単に鉄・ヒ素の除去が可能であり、マンガンにおいても、時間遅れを伴うが、同様の処理効果が期待できる。 ◎国内実績が多い。		◎比較的簡単に鉄・ヒ素の除去が可能であり、マンガンにおいても、時間遅れを伴うが、同様の処理効果が期待できる。 ◎上下方向の移動が可能である。	
問題点		△吐出し高さが、運用上変更できないため、対象範囲全体に効果を持たせるためには複数台の設置が必要。		△酸素発生装置と酸素溶解装置の両方が必要で、コストが割高になる。	
事例における水質目標		底層の溶存酸素濃度＝4～5mg/L		そもそも高い濃度で吹き出されるため、目標とする水質事例はない。 1台を移動させて対象範囲全体を改善させること、無駄な電力を抑えるため、酸素が溶けきれぬ濃度での運転を行うこと、が目標となる。	
維持管理項目		・コンプレッサーの整備点検 ・エアホースの交換 ・装置本体の維持管理		・コンプレッサーの整備点検 ・酸素発生装置の整備点検 ・気体溶解装置の整備点検 ・エアホースの交換	
係留及び景観		◎係留はシンカとワイヤーのみであり、かつ沈水式のため、景観上の障害にはなりにくい。		○船上式の場合は貯水池の景観障害となる。湖底アンカー式の場合、ワイヤーなどの係留設備が必要であり、若干貯水池の景観障害となりうる。	
概 算 費 用	LCC (30年)	△：2台必要なためコストで劣る	310,000千円	○：1台当たりのコストは高いが、1台で済むため、コストで有利である。	213,000千円
	初期コスト	70,000千円／基（制作，据付）	70,000千円×2基 ＝140,000千円	100,000千円／基（制作，据付）	100,000千円
	維持管理費	1,000千円/10年(エアホース交換費) 700千円/年(コンプレッサー保守点検費) 運転費（電気代） ・2,600千円/年(当初の2年間) 15kW×12ヶ月 ・2,000千円/年(3年目以降) 15kW×9ヶ月(3年目以降、循環期である12月～2月は停止)	85,000千円（30年） ×2基 ＝170,000千円	1,000千円/10年(エアホース交換費) 1,500千円/年(コンプレッサー・酸素発生器保守点検費) 運転費（電気代） ・3,900千円/年(当初の2年間) 22.5kW×12ヶ月 ・2,900千円/年(3年目以降、循環期である12月～2月は停止) 22.5kW×9ヶ月(3年目以降)	113,000千円（30年）
総合評価		総合評価：△ ○国内実績が多い △改善高さが10m程度であり、吐出し高さの変更ができないため、改善範囲全体（水深60m）に効果を得るためには2基必要となるため、コストで劣る。 △保守点検に潜水作業が必要。		総合評価：○ ◎D0の供給効果が高い。 ◎改善高さは4 m程度であるが、吐出し高さが自由に変更できるため、1基の曝気効果範囲が深層曝気よりも広い。 ◎効果を見ながら適切な高さに変更するなど、順応的な管理を行うことができる。 ◎保守点検時に潜水作業が不要である（フロート船方式）。 ○保守点検時には水上に移動させることが可能であり、アンカーやウインチ交換時など特殊な状況に限り潜水作業が必要（湖底アンカー式）。	

2.4 島地川ダム底層部の密度について

2.4.1 密度の現況について

島地川ダムにおける250EL. m以下の水温は、水深方向に5℃から徐々に7.5℃まで増加する逆転勾配となっている。

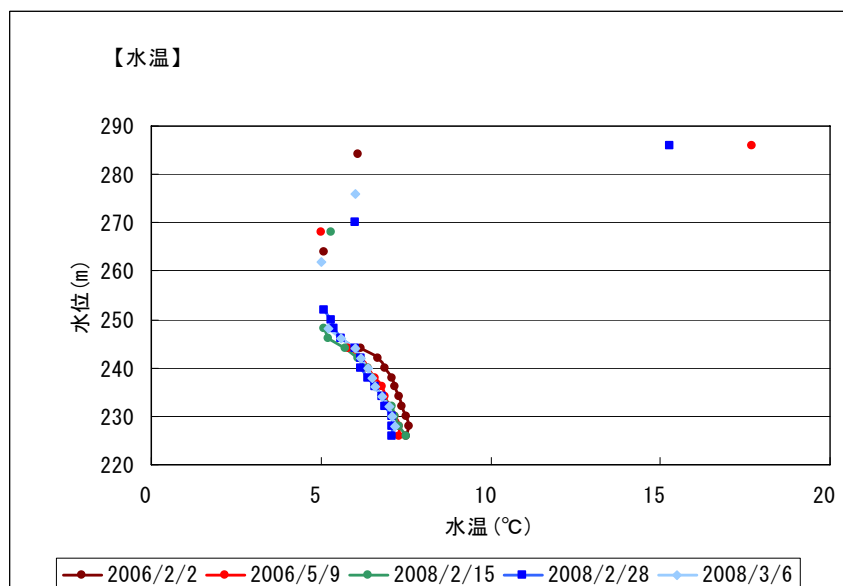


図 2-16 島地川ダムの鉛直水温分布（平成 18 年～平成 20 年）

密度は、5℃の時の水 1 L で999.97g、7.5℃の水 1 L で999.88 g であることから、島地川ダムの底層には、少なくとも

$$0.09 \text{ g} / \text{L} = 90 \text{ mg/L}$$

に相当する何かが溶け込んでいることになる。M 1 底層は現在、鉄=30mg/L、マンガン=10mg/Lであることから、鉄・マンガン以外にも最低でも50mg/Lに相当する何かが溶け込んでいると考えられる。

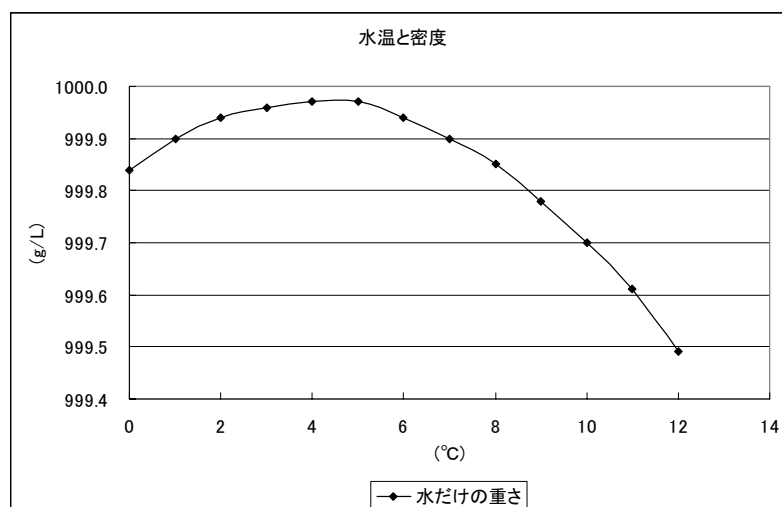


図 2-17 水温と水の密度の関係

表 2-12 水温と密度の関係

℃	水の密度	1L当たりの重さ(g)	1℃当たりの変化
0	0.99984	999.84	-0.06
1	0.99990	999.90	-0.04
2	0.99994	999.94	-0.02
3	0.99996	999.96	-0.01
4	0.99997	999.97	0
5	0.99997	999.97	0.03
6	0.99994	999.94	0.04
7	0.99990	999.90	0.05
8	0.99985	999.85	0.07
9	0.99978	999.78	0.08
10	0.99970	999.70	0.09
11	0.99961	999.61	0.12
12	0.99949	999.49	0.11
13	0.99938	999.38	0.14

密度は理科年表より

2.4.2 水質調査結果

過年度の水質調査結果を検討した結果、鉄・マンガン以外にも塩分成層の形成に寄与している物質があると考えられたことから、平成21年1月に250（EL.m）以深の密度を検討するための水質調査を行った。

表 2-13 水質調査結果（M-1：平成21年1月20日）

貯水位 地 点	283.07m													
	M-1(計器測定)				M-1									
測定水深 EL(m)	水温 ℃	DO mg/l	濁度 度	導電率 mS/m	ヒ素 mg/l	カルシウム mg/l	マグネシウム mg/l	硫酸イオン mg/l	塩化物イオン mg/l	ナトリウム mg/l	鉄 mg/l	マンガン mg/l	リン酸イオン mg/l	蒸発残留物 mg/l
282.77 (0.3)	6.2	9.6	0.5	7.9	0.001	5.7	0.9	7.3	9	5.0	0.04	0.044	< 0.1	44
281.07 (2.0)														
279.07 (4.0)														
277.07 (6.0)														
275.07 (8.0)														
273.07 (10.0)														
271.07 (12.0)														
269.07 (14.0)														
267.07 (16.0)														
265.07 (18.0)	6.0	9.4	0.4	8.0	< 0.001	7.1	1.2	4.3	9	5.6	0.13	0.055	< 0.1	48
263.07 (20.0)														
261.07 (22.0)														
259.07 (24.0)														
257.07 (26.0)														
255.07 (28.0)														
253.07 (30.0)														
251.07 (32.0)	5.6	< 0.5	0.3	8.9	< 0.001	7.5	1.2	4.0	10	5.6	0.04	0.52	< 0.1	62
249.07 (34.0)	5.6	< 0.5	0.3	9.2	< 0.001	7.4	1.2	3.9	11	5.3	0.06	1.0	< 0.1	55
247.07 (36.0)	5.8	< 0.5	0.4	10.5	0.002	8.1	1.3	3.4	10	5.2	0.13	3.1	< 0.1	57
245.07 (38.0)	6.1	< 0.5	0.2	15.6	0.006	12	1.9	1.6	10	5.3	1.4	9.6	< 0.1	88
243.07 (40.0)	6.5	< 0.5	0.4	20.3	0.012	16	2.6	0.3	10	5.6	7.9	11	< 0.1	120
241.07 (42.0)	6.6	< 0.5	0.2	25.0	0.024	20	3.3	0.1	10	5.8	16	9.8	< 0.1	150
239.07 (44.0)	6.7	< 0.5	0.3	26.3	0.032	21	3.5	0.3	10	5.7	19	9.8	< 0.1	160
237.07 (46.0)	6.8	< 0.5	0.7	28.2	0.046	21	3.7	0.1	10	5.6	23	9.4	< 0.1	180
235.07 (48.0)	7.0	< 0.5	0.6	30.5	0.056	23	4.1	< 0.1	10	5.8	28	9.7	< 0.1	190
233.07 (50.0)	7.1	< 0.5	1.1	32.7	0.077	25	4.4	< 0.1	10	5.9	31	10	< 0.1	210
231.07 (52.0)	7.2	< 0.5	1.1	35.5	0.087	27	5.0	0.2	10	6.2	34	10	< 0.1	230
229.07 (54.0)	7.3	< 0.5	1.5	36.2	0.092	28	5.2	< 0.1	10	6.0	35	11	< 0.1	240

水温は247.07m以深で逆転（下層ほど水温が高い）しており、この範囲で塩分成層ができていると考えられる。他の項目と比較して濃度が高く、嫌気状態の底層ほど濃度が高くなる物質は、

- ・カルシウム
- ・マグネシウム
- ・鉄
- ・マンガン

であった。

2.4.3 酸素の供給による密度変化について

深層曝気施設あるいは高濃度酸素溶解施設により、貧酸素化した底層に酸素を供給した場合の水の密度変化は以下のとおり想定される。

項目	状態	密度変化
鉄	すみやかに酸化され、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ となって沈降する。	すみやかな水の密度低下
マンガン	当初は反応しないが、鉄がなくなるとともに MnO_2 となって沈降する	しだいに水の密度低下
ヒ素	鉄と共沈するが、そもそもの量が小さい。	水の密度変わらず
カルシウム	酸化による変化は小さい。	水の密度変わらず
マグネシウム	酸化による変化は小さい。	水の密度変わらず

2.4.4 酸素の供給による境界面低下の可能性

水温から得られる密度と、カルシウム、マグネシウム、鉄、マンガンを含めた密度の鉛直分布を図 2-18に示す。

水温だけでは下層ほど密度が低い逆転現象を説明できなかったが、カルシウム、マグネシウム、鉄、マンガン濃度を勘案すれば、この現象を説明できる（図 2-18の▲）。

また、鉄・マンガンは酸素供給により低減できることから、これらを0にした場合、密度は250(EL.m)以深では下層ほど密度が低くなった（図 2-18の×）。このことから、底層への酸素供給により下層と上層が入れ替わる、言い換えれば冬季の大循環が下層まで回復する可能性があると考えられる。

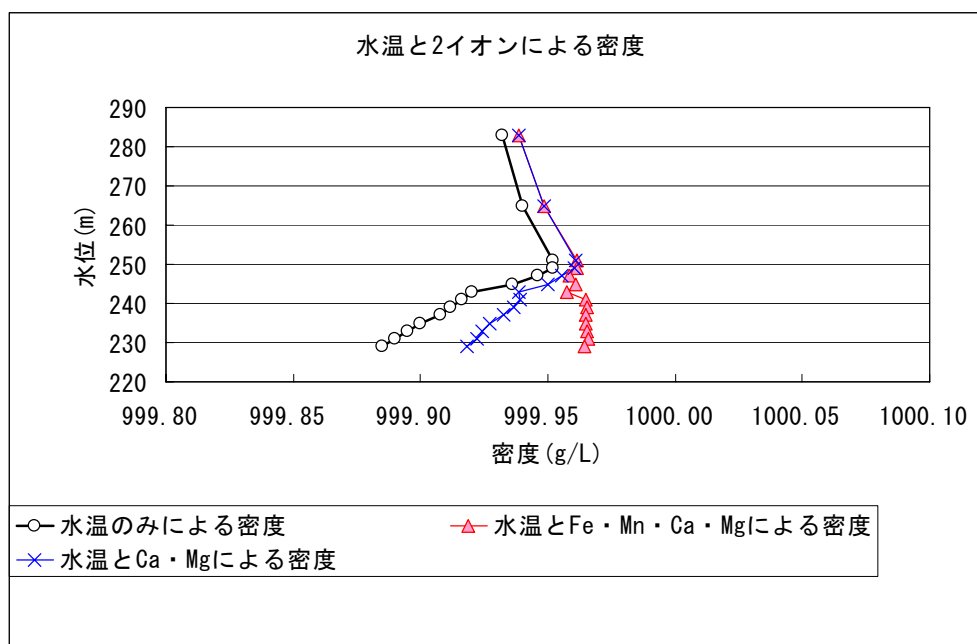


図 2-18 密度の鉛直分布

なお、国内のダムで、マイクロバブル導入により冬季の循環範囲が底層にまで回復した事例もある。冬季の循環に含まれる範囲では、水質改善が一気に進み、以降はその年の春～秋に溶出される金属類のみを対象に曝気を行えばよくなると考えられる。

このため、高濃度酸素溶解施設の吹き出し位置を、現在250 (EL. m) に存在する境界面より徐々に下方に下げていくことで、冬季の循環範囲を徐々に増やしていくことが可能であると考えられる。

循環の回復については、その発生確率や効果の予測が困難であることから、水質改善施設の規模・台数選定の要因とはしないが、導入後、施設の運転時間短縮によるコスト削減の可能性があるため、運用にあたっては導入後の水質改善効果をモニタリングしながら、効率的で最適な運用を検討することとする。

運用（案）は以下のとおりである。

現状水質改善施設の運用（案）

- 要注意水域の上端である、250 (EL. m) から運転を開始し、D O回復が確認されたら、徐々に下降させ、最下層まで到達したら、再度要注意水域上端まで上昇させる。
- 要注意水域のモニタリングを実施
(冬期循環の回復確認、高密度原因物質調査、経過把握)
- 冬期循環の確認された層(水域)は改善運転の対象外とし、改善が見られない層について継続して運転を実施する。

2.5 アオコ対策施設との関連性について

アオコ施設は流入から黒川橋付近で発生するアオコの対策であり、効果範囲は水深方向で262～286.6(EL. m)、水平方向ではせいぜいM9より上流（※設計時の対象範囲はM10～M20であり、平面形状よりM8までは届かない）程度であると考えられる。

一方、高濃度酸素or深層曝気の効果範囲は水深方向で220～250(EL. m)、水平方向でM0～M4であると考えられる。効果範囲が違うことから、お互いを干渉しないと考えられる。

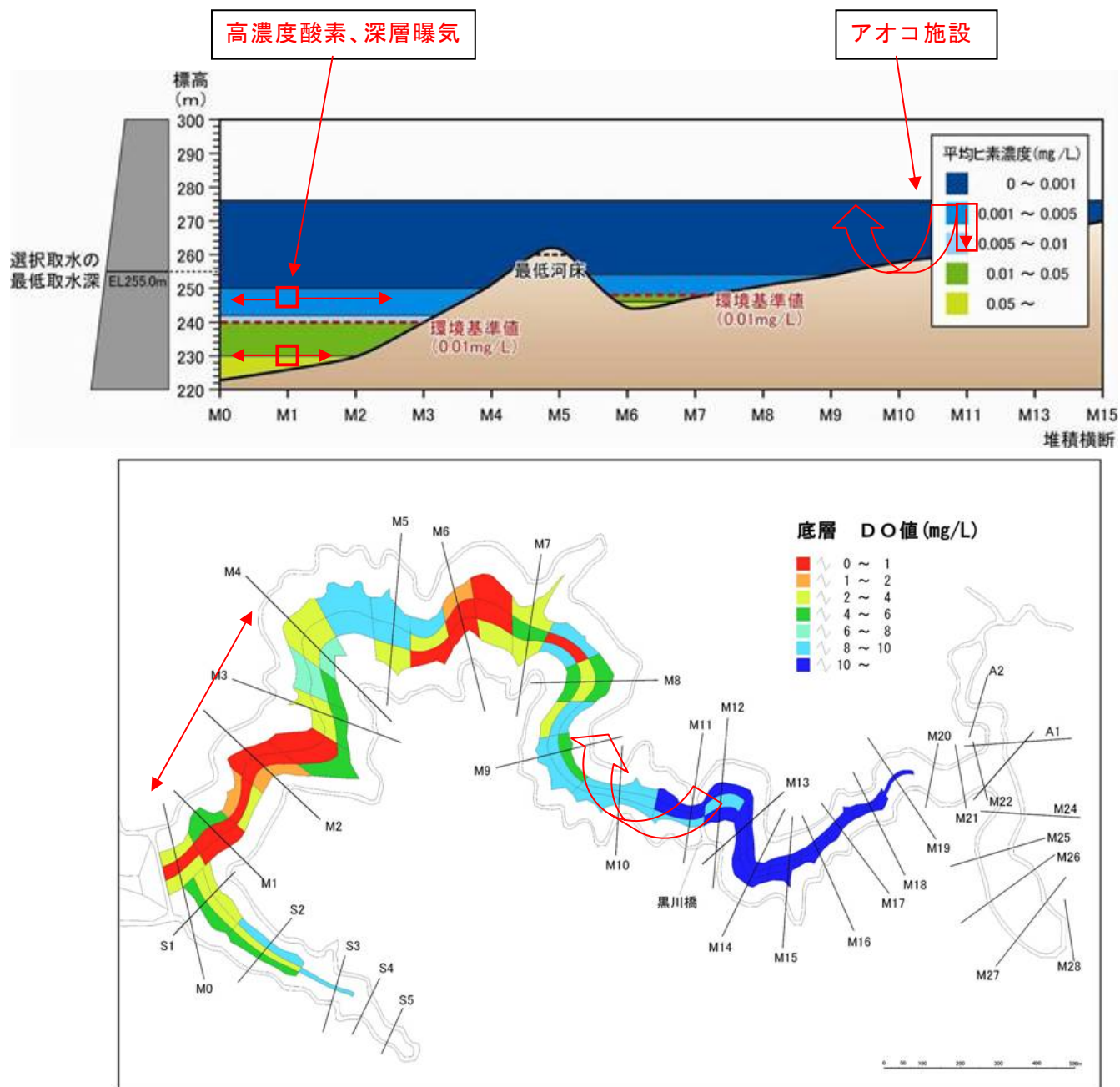


図 2-19 両施設の設置箇所

第3章 水質調査計画（案）

	モニタリング目的	モニタリング項目	形式	モニタリング手法	地点	深度	頻度	モニタリング時期		備考
								施工前・施工中	施工後	
運転管理	ダム管理上必要な基礎データ入手	水温、濁度、EC、pH、D0、クロロフィルa	常時（既設）	センサーによる水深方向の自動計測（表層～240EL.m）	M 0	1m毎	連続監視	毎日	毎日	・継続的な維持管理を適切に実施
事前調査及び運用検証調査	1．施設整備前後の水質改善状況を詳細に把握 2．施設効果の評価運用ルール見直し検討	水温、濁度、EC、pH、D0	常時（仮設）	同上（既設では240EL.m以深を測れないため追加）	M 1	同上	同上	毎日	毎日	・高濃度酸素供給施設の適切な運用検討のために実施 ・検討終了後には撤去
		水温、濁度、D0、EC、pH	小型船舶利用	多項目水質センサーを湖内に投入、深度方向に計測・	M 1、M 2、M 3、M 4、M 6	表層から0.5m、1m、以降2m毎	月1回の定期水質調査時に併せて実施	毎月	毎月	・施工前の1年（12回） ・試験運用中の1年（12回） ・本格運用後の1年（12回）
					M1-R、M1-L	同上	年4回	4，7，10，1月	年4回	・試験運用中の1年（4回） ・本格運用後の1年（4回）
		D0、鉄、マンガンヒ素、カルシウム、マグネシウム	小型船舶利用	・所定の深度から採水し、室内試験を行う。・採水時に透明度、色度、を計測し、試験水の水温、pHを計測	M 1、M 2、M 3、M 4、M 6	・概ねEL. 250m以深に形成される水温逆転層より上層：5m毎、下層2m毎	月1回の定期水質調査時に併せて実施	毎月	毎月	・施工前の1年（12回） ・試験運用中の1年（12回） ・本格運用後の1年（12回）
					M1-R、M1-L	同上	年4回	4，7，10，1月	年4回	・試験運用中の1年（4回） ・本格運用後の1年（4回）

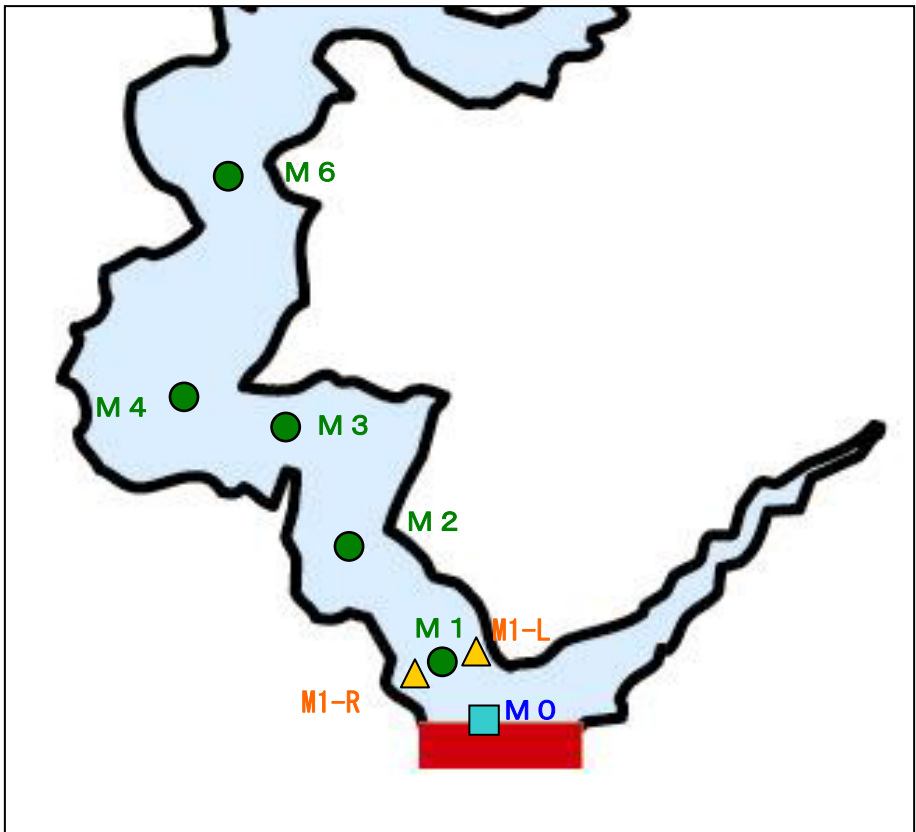
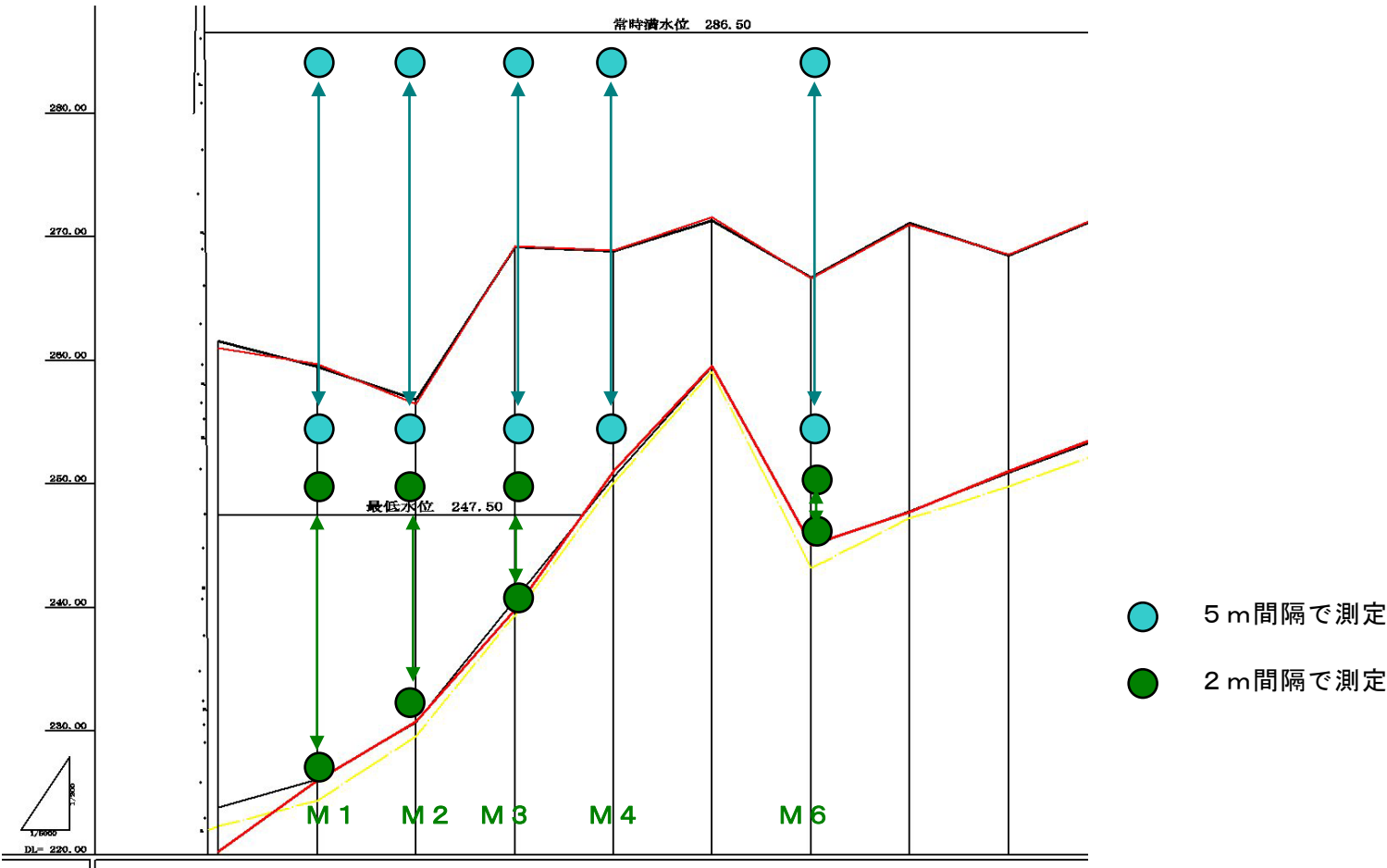


図 3－1 水質調査地点（案）



第4章 まとめ

● 水質改善対策について

水質目標

- ヒ素 : 環境基準値 (=0.01mg/L以下) を満足させる
- 鉄 : 水の呈色を抑える
- マンガン : 水の呈色を抑える

導入施設

導入施設は、高濃度酸素溶解装置とする。

- ・ 機械基数 1基 (M1付近)
- ・ 導入機械能力 送水量は120m³/h

施設の運用 (案)

- ・ 要注意水域の上端250 (EL. m) から運転を開始し、DO回復が確認されたら、徐々に下降させ、最下層まで到達したら、再度要注意水域上端まで上昇させる。
- ・ 要注意水域の水質調査等モニタリングを実施
(冬期循環確認、高密度原因物質調査)
- ・ 冬季の大循環が回復した水域は改善対象外とする。