チタンパネルを用いたコンクリートの保護工法

化学的侵食を受けるコンクリートの耐久性向上技術

木元 明日子*1・大脇 英司*1・新藤 竹文*1

Keywords : concrete, titanium, protective covering, concrete coating, durability, weld
コンクリート，チタン，表面保護，表面被覆，耐久性，溶接

1.　はじめに

コンクリートは基幹材料であり，広範囲に使用されている。使用にあたっては環境に応じて所定の耐久性を満足しなければならない。化学プラントなど化学的な耐久性が必要な構造物，食品プラントなど成分の溶出が制限される構造物，放射性廃棄物処分施設など極めて長期間にわたる健全性を要求される構造物では，高い水準の耐久性が求められる。水道施設の暗渠など維持・管理活動が制限される構造物でも，維持管理が不要となるよう長期の耐久性が期待される。また，水密性を求められる構造物のようにひび割れの発生が望ましくない構造物も多い。高い耐久性を保ったり，ひび割れの影響を排除するため，表面保護層や防水層などを設ける場合がある。

本研究ではチタンが種々の要因に対して高い耐久性を有することに着目し，コンクリートの表面にパネル部材を設置する保護工法（写真―１）を開発した。

写真―１　内面に本工法を適用したボックスカルバート
Picture 1 The box culvert wrapped with titanium panel applied this protection system

*１　技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

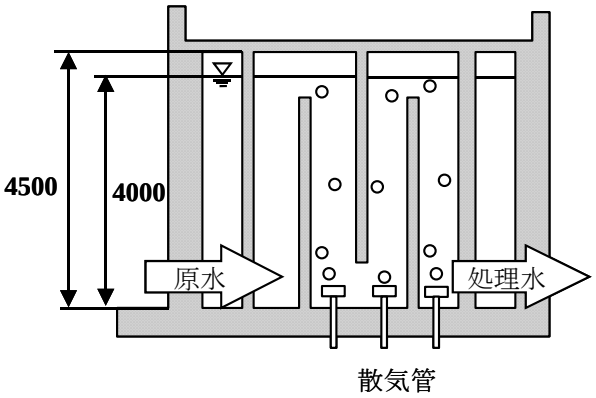
2.　チタンパネルの特徴と構造物への適用

2.1　チタンの一般的特徴と構造物への適用

チタンは緻密な酸化チタンからなる不動態被膜により保護されているため，化学的な耐食性に優れている。一方コンクリート構造物は多様な環境におかれている。例えば水道や下水道施設の高度処理施設ではオゾンにさらされ（図―１），海洋構造物や発電所の取放水路では海水にさらされている。また，食品プラントや化学プラントでは種々の化学成分にさらされることになる。このような環境では，化学的な耐久性に優れるチタンパネルでコンクリートを保護することにより耐久性や水密性の向上が期待される。

また化学的耐久性が高いことから，長期にわたり性能を見込むことができる。このため，一時的な維持管理作業でも操業を停止するのが困難な施設や，放射性廃棄物処分施設のような 1000 年間以上の長期にわたる耐久性が求められる施設への適用が特に期待される。

チタンは人工骨や人工歯根などの生体材料としても利用され，生体安全性に優れることから，食品プラン



図―１　オゾン接触槽の断面図の例 [1)]
Fig.1 Cross section of ozone tank in advanced water treatment facility

トや水道施設等への適用が望ましい材料である。また耐久性が高いことは，化学プラントにおいて，不純物の混入を低減する効果も期待できる。

チタンの密度は 4.5g/cm^3 と小さく，ステンレス（SUS304; 8.0g/cm^3）の半分程度である。当技術に用いるチタンパネルの厚さは 1mm である。ステンレスパネルを用いる類似の保護工法では，その厚さは 2～5mm である。従って，チタンの質量はステンレスのおよそ 10～30%となり，構造物に適用する場合ハンドリングが向上する（表―１）。さらにチタンの線膨張係数は 8.4×10^{-6}/℃であり [2]，コンクリートの線膨張係数（6.8～12.7×10^{-6}/℃）に近く，温度変化による変形に追従できる。

2.2　構造物の要求性能に対するチタンパネルの特長

各構造物における要求性能に対するチタンパネルの特長を以下に示す。

2.2.1　水道施設 [3]・下水道施設 [4]

水道施設や下水道施設では，近年オゾンを用いた高度浄水，高度処理の適用が増加している。しかし，オゾンは酸化力が強く，供用 10 年以内の比較的短期間にコンクリートの表面が軟化するなどの事例が報告されており [5]，表面保護材として高分子材料を用いると分解が懸念されることから，耐オゾン性の高い表面保護材が求められる。

チタンの耐オゾン性を確認するための試験を行った [3]。水道施設で使用実績のある材料を中心に表面保護材を選定し，直径 50mm×厚さ 0.5～1mm の円板状に成形した。各 3 体を平均濃度 1.8mg/L のオゾン水に 4 週間浸せきして厚さと質量の変化を測定した（図―２）。ポリマーセメントや塗膜材料では，表面の剥落（ポリマーセメント A,B），収縮や膨潤（樹脂塗膜 A,B）が生じる場合があり，無機系固化材では表面の粉化現象や臭気の発生が認められた。またポリマーセメント C と樹脂塗膜 C では吸水が認められ，劣化要因の遮断が不十分であることが確認された。一方，チタンは厚さや質量の変化がなく，オゾンに対して安定であった。チタンパネルは水道施設や下水道施設のオゾン接触槽の表面保護材として適用できることが確認できた。

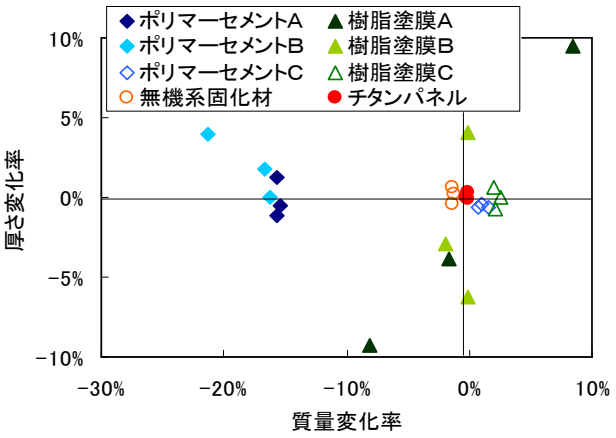
2.2.2　発電所取放水路・海洋構造物

発電所取放水路，海洋構造物や化学プラントでは，構造物が海水や高い濃度の塩化物イオンに接触する場合があり，塩化物イオンに強い表面保護材が求められている。チタンは海水おいて，100℃を境にそれより下の温度であればすきま腐食の可能性はなく（図―３），ステンレスと比較して高い耐食性を持っている。発電所取放水路や海洋構造物，化学プラント等の海水や塩化物イオン濃度の高い環境に接触する施設で保護材として適用が可能である。

表―１　コンクリート保護用パネル(1m×1m)の 1 枚あたりの質量

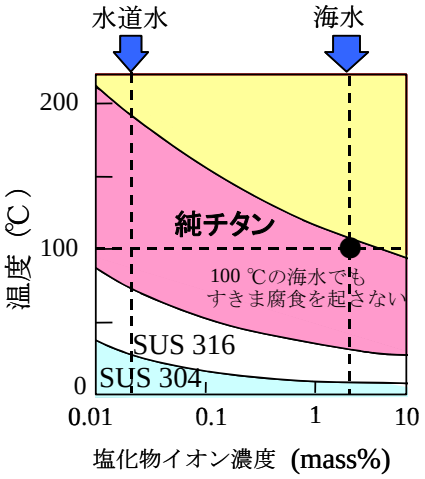
Table 1 Mass of a panel protecting concrete structure

パネル 1m×1m	パネル厚さ (mm)	密度 (g/cm^3)	パネルの質量 (kg/m^2)
純チタン	1	4.54	4.5
SUS304	2～5	7.93	16～40
コンクリート（埋設型枠）	10～50	2.3	23～115



図―２　チタンの耐オゾン性 [3]

Fig.2 Corrosion resistance of titanium against ozone



図―３　塩化物イオンによりすきま腐食を起さない条件 [6]

Fig.3 Boundary of crevice corrosion of titanium materials and stainless steel in chloride solution

2.2.3　化学プラント・食品プラント

化学プラントや食品プラントでは，種々の物質が構造物と接触する。そのためチタンを適用した場合の耐

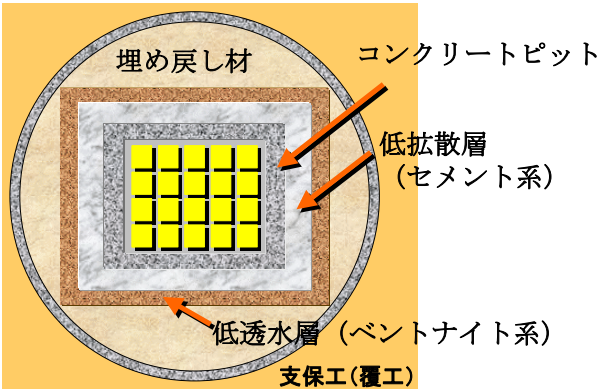
食性について，接触する物質毎に検討する必要がある。ここでは，代表的な化学物質について，耐食性を示す（表―２）。無機酸や有機酸，アルカリ，無機塩化物，無機塩類，有機化合物，ガスに接触する場合，チタンパネルは表面保護材として優れた耐食性を示す。特にオゾンなどの酸化力の強い物質や硝酸などの酸化性の酸に対しては高い耐食性を示す一方で，硫酸などの非酸化性の酸には腐食することがあり，純度が高く高濃度の塩酸，硫酸に対しては十分な耐食性が期待できない [4]。ただし非酸化性の酸に対しても，酸化性の物質や金属イオンが共存すると耐食性が確保される場合があることから，チタンを非酸化性の酸を扱う施設へ適用する場合は，施設ごとの検討が重要である。

食品プラントや水道施設等の食品や飲料水を扱う施設では，水槽やその表面保護材からの成分の溶出が問題になる。その点，生体材料にも使用されるチタンは安全性に優れるため，全表面を覆うことで有害物質の溶出を抑制することができる。

2.2.4　放射性廃棄物の余裕深度処分施設 [7]

放射性廃棄物の余裕深度処分施設では，1000 年を越える非常な長期間での放射性核種の閉じ込め性能が求められる。図―４に示す施設のうち低透水層，低拡散層，コンクリートピットの間の界面のいずれかにチタンパネルを設置することで，放射性核種の長期の閉じ込め性能を保つことが期待できる。

高レベル放射性廃棄物処分施設において検討された腐食代の検討例から（表―３），チタンパネルの厚さが 0.1mm 以上あれば 1000 年以上，1mm 以上であれば 1 万年以上の耐久性が期待でき，炭素鋼や銅を使用する場合に比べて現実的な構造物の建設が可能になると考えられる。



図―４　余裕深度処分施設の断面図（資料 [8] より再構成）
Fig.4 Cross section in the radioactive waste disposal facility

表―２　純チタンの耐食性 [6]
Table 2 Corrosion resistance of titanium in various corrosive environments

区分	腐食媒質	濃度 (mass%)	温度 (℃)	耐食性
無機酸	塩酸（HCl）	1	25	◎
			沸騰	×
		10	25	○
			沸騰	×
	硫酸（H_2SO_4）	1	25	◎
			沸騰	×
		10	25	○
			沸騰	×
	硝酸（HNO_3）	10	25	◎
			沸騰	◎
		65	25	◎
			沸騰	◎
有機酸	酢酸（CH_3COOH）	10	沸騰	◎
		60	沸騰	◎
	乳酸（$CH_3CH(OH)COOH$）	10	沸騰	◎
		85	沸騰	◎
アルカリ	苛性ソーダ（NaOH）	10	100	◎
		40	沸騰	×
	炭酸カリウム（K_2CO_3）	5	沸騰	◎
		20	沸騰	◎
無機塩化物	塩化ナトリウム（NaCl）	25	25	◎
			沸騰	◎※1
	塩化マグネシウム（$MgCl_2$）	42	25	◎
			沸騰	◎※1
無機塩類	硫酸ナトリウム（Na_2SO_4）	20	25	◎
			沸騰	◎
	次亜塩素酸ナトリウム	5	25	◎
		15	25	◎
有機化合物	メチルアルコール	95	25	◎
	四塩化炭素	100	沸騰	◎
	フェノール	飽和	25	◎
	ホルムアルデヒド	37	沸騰	◎
ガス	塩素（Cl_2）	乾燥	25	×
		湿潤	25	◎※1
	硫化水素（H_2S）	乾燥	25	◎
		湿潤	25	◎
	アンモニア（NH_3）	100	40	◎
			100	◎
その他	海水	－	25	◎
		－	100	◎※1※2

（耐食性表示）：　◎：0.125mm/年以下　○：0.125～0.5mm/年
△：0.5～1.25mm/年　×：1.25mm/年以上
※1：孔食，すきま腐食などの局部腐食を起こす場合がある。
※2：図―３より海水 100℃の場合はすきま腐食限界の境界に近く，評価が異なる場合もある。

表―３　オーバーパック材料の腐食代の検討例 [9]
Table 3 Estimated the corrosion depth of overpack material

	1000 年	10,000 年	100,000 年
炭素鋼	28.5mm	208.5mm	2008.5mm
チタン	0.1mm	1mm	10mm
銅	5mm	19mm	19mm

3.　パネルの設置方法の検討

3.1　パネル設置方法の基本的な考え方

長期にわたり高い耐久性を確保するためには，パネルが構造物から剥がれないよう確実に固定しなければならない。ここではパネルは接着剤を用いてコンクリートに固定するが，所定の接着強度が発現するまでの仮留め，接着機構の頑健性確保のためにアンカーボルトを併用することとした。

また長期耐久性や化学的耐久性，生体安全性等のチタンパネルの特性を生かすためには，パネル間の接合を緊密にして劣化因子の侵入を遮断する必要がある。特にオゾン処理水のように接着剤の分解を促す因子が含まれる場合には，パネルの剥離や接着剤の成分の溶出が懸念されるため，確実に遮断しなければならない。そこで，パネル間を溶接することにより一体化することとした。

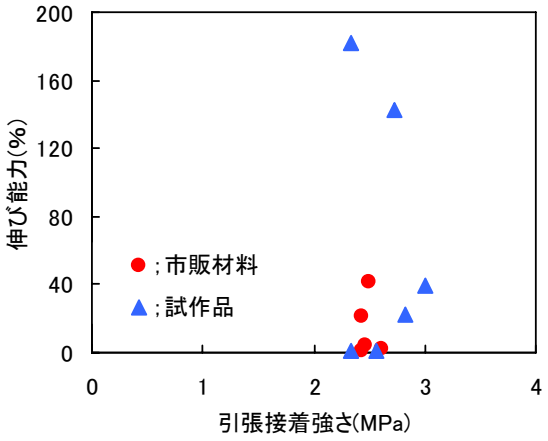
まずパネルの確実な接着や溶接について確認し，接合部の形状，パネルの配置方法を決定し，ボックスカルバートを用いて実証試験を実施した。

3.2　パネルの接着

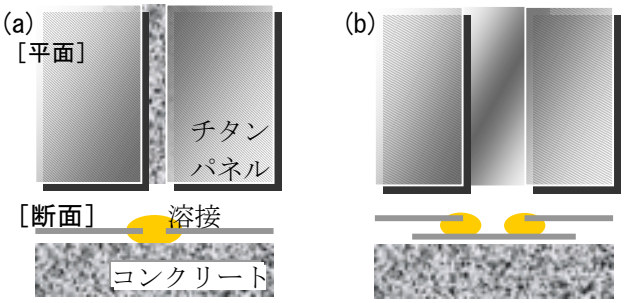
チタンの線膨張係数はコンクリートのそれに近く，温度変化による変形に追従できる。しかし外力の作用やコンクリートのひび割れにより変形挙動が異なる可能性もあり，接着剤には変形挙動の差を緩衝するための伸び性能も要求される。エポキシ系などの複数の樹脂系接着剤を用いてチタンパネルとコンクリートの接着強度（引張接着強さ；JIS A 5536）と伸び性能（JIS K 7161）を測定した（図―５）。引張接着強さは 2.4MPa 以上であり，接着面で破壊する試験体はなく，全ての試験体が母材（コンクリート）で破壊しており，十分な強度を有していた。接着剤の伸び率は 1～180%程度であり，構造物に応じて適切な接着性能，変形性能を有した接着が可能であることを確認した[10)]。

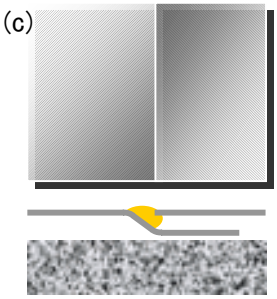
3.3　パネルの溶接

本工法では，パネルの一部を重ねて TIG（Tungsten Inert Gas）溶接を行った。突合せ溶接（図―６（a））を行う場合は，パネルの間隔を一定にして正確に設置する必要がある。また溶接の熱によりコンクリートが損傷する可能性や，熱により発生するコンクリートからの揮発成分によって，溶接の品質の低下が想定される。従来の重ね溶接（図―６（b））では，これらの問題は解決されるが，溶接や検査の数量が増加し，施工性や経済性の観点から合理的ではない。これらを解決するため，一方のパネルを他方のパネルの下側に延長して

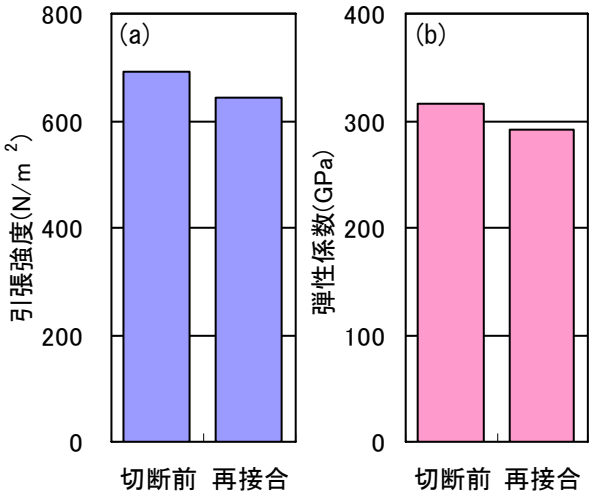


図―５　接着強度と接着剤の伸び能力
Fig.5 Relation between bond strength to concrete and elasticity of the adhesive





図―６　パネルの重ね方と溶接
(a)　突合せ溶接
(b)　一般的な重ね溶接
(c)　採用した重ね溶接
Fig.6 Panel joint system
(a)Butt welding
(b) Lap welding in conventional joint system
(c) Lap welding in this method



図―７　TIG 溶接部の物性
(a)引張強度　(b)弾性係数
Fig.7 Mechanical properties in the weld area
(a)Tensile strength, (b)Elastic modulus

重ねしろを設ける重ね溶接（図―６（c））を採用した。また本溶接方法について厚さ 1mm のチタンパネルを TIG 溶接し，突合せ溶接の場合と比較して溶接の品質低下やコンクリートの損傷が無いこと，設置時にパネルがずれた場合でも良好な溶接が可能であることを確認した。切断したチタンパネルを TIG 溶接により再接合した場合の機械特性の変化を図―７に示す。引張強度や弾性係数は，チタンパネルそのものに対して 90% 以上を確保しており，ほぼ同等であった[10)]。

3.4　溶接部の形状と配置の方法

採用するパネルの配置方法の概要を図―８に示す。

パネルを接着剤で接着し，アンカーボルトで固定し，パネル間は重ね溶接により一体化した。パネルは一方のパネルを他方のパネルの下側に延長して重ねる形状とした（図―６（c））。この接合方法を 2 次元方向に展開して，全ての接合面を重ね溶接することでコンクリートや接着材料を劣化因子から遮断した。重ね溶接のためには，チタンパネルに曲げ加工を施す必要がある。なおチタン板の特性上，圧延方向に沿って平行な方向での曲げ加工性は優れるが，直角な方向の加工性は劣る。そこで１枚のパネルは圧延方向に平行な二辺でのみ曲げ加工を施し，一方でパネルの四辺でパネル同士の重ね溶接が必要であるため，パネルの形状や配置を工夫した。

また溶接の熱による接着剤への影響を避けるため，放射温度計で溶接時のパネルの温度を測定した。ここでは接着剤を劣化させる温度（200～300℃）以下であることが確認された，溶接部から 20mm 以上離れた部位に接着剤を塗布することとした。

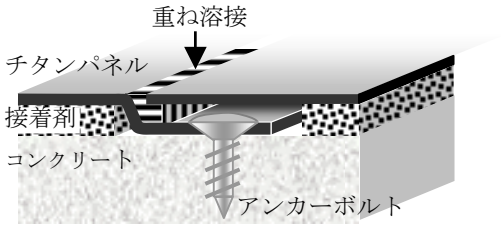
パネルの厚みについては，表―２を参考にし標準的な厚さであり，パネルが確実に溶接できる厚みとして 1mm と設定した。

本工法では部材が薄く，アンカーボルトも露出しないため，流速の速い施設などに適用しても流れの状況への影響はほとんど生じない。またアンカーボルトとともにボルトの取付け孔を覆うことにより，パネルの欠損部を解消することができ，アンカーボルトや接着剤の材質選定の自由度も向上している。

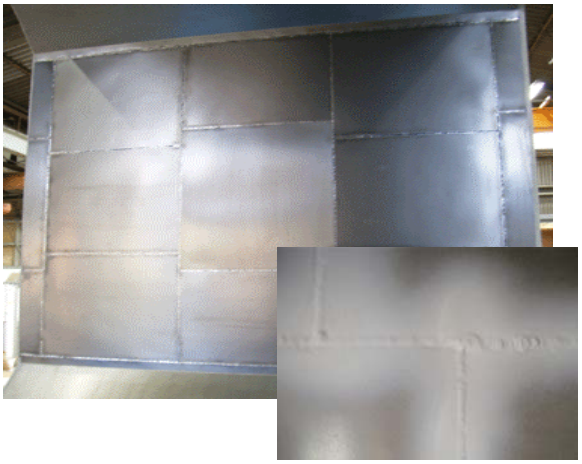
3.5　実規模検証試験

鉄筋コンクリート製ボックスカルバートの内面（2000×1500×1500mm）に本工法を適用し，実規模レベルで検証した（写真―1，２）。

チタンパネルは高い精度で加工できる一方，コンクリート構造物の表面はチタンの平滑さと比較すると劣り，しばしば凹凸がみられる。また接着剤の厚さは



図―８　パネル接合部の模式図
Fig.8 Joint area of the panels



写真―２　ボックスカルバートへの被覆状況と染色による溶接検査；発色がなく良好
Picture 2 Finishing surface on the box culvert
Inspection of Welding; no dyeing =no defect

1mm 程度と薄い。そのためパネルを設置する際には，構造物に凹凸があると適切に接着ができない可能性がある。

またボックスカルバートの内面のように筒状の面をもつ構造物では，全てのパネルを固定した状態で溶接するため，溶接熱によるパネルの変形が拘束され，パネルの剥れ等が生じる可能性も懸念される。従ってこのような問題が発生しないことを実規模の試験で確認した。

ボックスカルバートによる実規模検証試験の結果，図―８に示す接合方法はカルバートの内面のような筒状の面にも良好に適用できることが示された。また，ボックスカルバートによる試験では，パネルは適切に接着できコンクリート表面の凹凸に影響されることはなかった。ボックスカルバートの内面を全周にわたりパネルを設置し溶接を行ったが，溶接は確実に行うことができ，溶接の熱によりパネルが変形することはなかった。染色法による欠陥検査ではピンホールなどの欠陥は認められなかった（写真―２）。

4.　まとめ

チタンパネルを用いたパネルの形状と設置方法に特徴のあるコンクリートの表面保護工法を開発した。チタンパネルは化学的な耐久性，生体安全性に優れることから，例えば上下水道のオゾンを用いた高度処理施設や様々な化学薬品を扱う化学プラント，食品プラント，海水の接触する海洋構造物や電力取放水路，放射性廃棄物の余裕深度処分施設に適用できることを提案した。

パネルのコンクリートとの接着やパネル間の溶接について検討し，十分な接着力と変形性能を持つこと，また厚さ 1mm 程度の薄いパネルでも確実に溶接できることを確認した。パネルの形状と配置については，パネルを接着剤，アンカーで固定し，溶接により完全にコンクリート表面を覆うこととした。

本工法を採用することで，以下の効果が得られる。
①構造物が隙間なくチタンで覆うため，コンクリートや接着剤やアンカーに対して十分な保護性能が期待できる。また構造物側からの成分の溶出の心配がない。
②全体の厚みが薄く，水槽などに追加した場合においても内容積を減少させない。
③アンカーが露出せず表面が平滑なため，できるだけ大きな流量を確保したい施設において流況への影響を抑えられる。

使用する環境によってはチタン以外の材質へ変更し，耐久性や経済性を高めることも可能である。この場合も本工法と同様な構造，施工法を採用することにより所定の性能を得ることが可能であると考えられる。今後種々の構造物への適用が期待される。

謝辞

本開発は株式会社昭和との共同研究によるものです。ここに記して謝意を表明します。

参考文献

1) 大脇英司，岡本礼子，長塩大司；高度浄水施設におけるオゾン接触反応槽のコンクリートの劣化，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997
2) 日本チタン協会；技術情報, http://www.titan-japan.com/indexj.htm, 2007.
3) 大脇英司，木元明日子，新藤竹文，間宮賀津仁，湯田坂貞利，高安輝樹，小野田金児；チタンパネルによる水道施設コンクリートの高耐久化，第 58 回全国水道研究発表会，pp.240-241，平成 19 年 5 月
4) 大脇英司，木元明日子，高安輝樹；チタンパネルを用いた耐オゾン性に優れるコンクリートの保護工法,第 44 回下水道研究発表会講演集，pp.199-200，平成 19 年 7 月
5) 星野行宏，川崎進，橘高雷太，古屋泰徳，青木秀幸；高度浄水処理に伴うコンクリート構造物への影響調査，第 57 回全国水道研究発表会　pp.88-89，平成 18 年 5 月
6) 神戸製鋼グループ；建材用チタンの特性, http://www.kobelco.co.jp/titan-architectual/characteristic/index.html，2007.
7) 大脇英司，木元明日子，新藤竹文，高安輝樹，小野田金児，近藤禎久；チタンパネルを用いた処分施設のセメント系材料の高耐久化,日本原子力学会「2007 年春の年会」，pp.433，平成 19 年 3 月
8) 京谷修ら；コンクリート構造物の超長期耐久性評価-１万年コンクリートへの挑戦-，土木学会平成 17 年度全国大会研究討論会
9) 核燃料サイクル開発機構；わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-，　pp.IV-10～IV-49，1999.
10) 大脇英司，木元明日子，新藤竹文，高安輝樹，小野田金児，近藤禎久；チタンパネルを用いたコンクリートの表面保護,土木学会年次学術講演会論文集，平成 19 年 9 月, 5-299, pp.597-598