

# 京極発電所地下空洞掘削における情報化施工

西村 哲治・武田 宣孝・名合 牧人

京極発電所地下空洞は、地山被り約 430 m の地下深部に位置し、掘削断面は、高さ 45.8 m、幅 24 m の弾頭形を有し、長さ 141 m、総掘削量 12 万  $m^3$  に及ぶ大規模地下空洞である。

地下空洞の掘削時には、地質観察と計測結果を設計・施工に反映させる情報化施工を実施しており、日々の掘削に応じて恒常的に管理する日常管理と掘削ステップ毎に管理するステップ管理を組み合わせることで、施工情報を適切に設計に反映し、安全で効率的な施工を行っている。

本稿では、京極発電所地下空洞掘削における情報化施工計画及び情報通信技術（ICT）を活用した情報化施工への取組みについて紹介する。

キーワード：地下空洞、情報化施工、計測管理、不連続面、ICT、3次元可視化

## 1. はじめに

京極発電所は、有効落差 369 m、最大使用水量 190.5  $m^3/s$  を得て、最大出力 60 万 kW の発電を行う北海道電力(株)で初めての純揚水式発電所であり、平成 14 年 2 月から工事を開始し、平成 26 年 10 月に 1 号機 20 万 kW の営業運転開始を目指している。

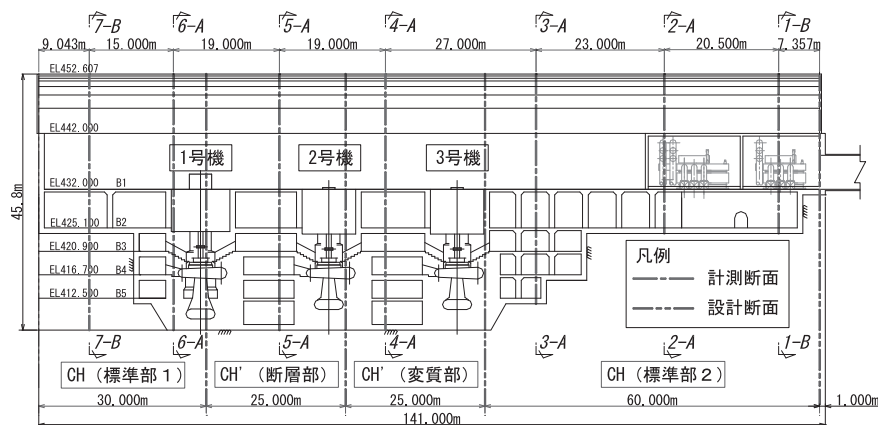
地下空洞は、図一 1 に示すとおり、高さ 45.8 m、幅 24.0 m、長さ 141.0 m の弾頭形を有し、総掘削量約 12 万  $m^3$ 、最大断面積約 1,000  $m^2$  におよぶ大規模地下空洞内に水車発電機 3 台（20 万 kW × 3 台）、変圧器 2 台を設置する計画である<sup>1)</sup>。

地下空洞の施工は、平成 21 年 1 月からアーチ部頂設導坑の掘削を開始し、平成 22 年 12 月に発電所本体

の掘削を完了したが、掘削時には切羽の地質観察及び岩盤の挙動計測結果に基づき、その結果を設計・施工に反映させる情報化施工を実施した<sup>2)</sup>。本稿では、地下空洞掘削における情報化施工計画及び ICT を活用した情報化施工への取組みについて報告する。

## 2. 地質概要

地下空洞周辺の地質は、新第三紀中新世の美比内川層に属する凝灰角礫岩（Tb②）が主体であり、数十 m 規模の凝灰岩（Tf）のブロック等が数箇所分布する<sup>1)</sup>。また、調査ボーリングの結果より、断層については、発電所長軸方向に高角度でほぼ直交する F6 断層が確認されている。岩級区分は、概ね C<sub>H</sub> 級（一



図一 1 発電所概要図

軸圧縮強さ 100 MPa 程度) と堅硬であるが、断層沿いには物性値の低下帯 (一軸圧縮強さ 30 ~ 40 MPa 程度) があり C<sub>H</sub>' 級とした。地下空洞周辺の地質縦断図を図-2 に示す。

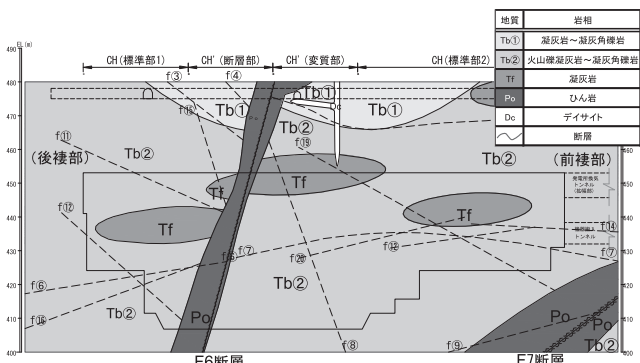


図-2 地下空洞周辺地質縦断図

### 3. 情報化施工の概要

#### (1) 計測項目の配置計画

計測項目の配置計画は、図-1 に示すとおり、空洞全体の岩盤挙動を把握するため、空洞長軸方向に約 20 m ピッチで計測断面 (7 断面) を配置した。計測管理項目は、岩盤変位、アンカー荷重、ロックボルト軸力及び内空変位とし、岩盤変位については、掘削前に周辺トンネルから事前に岩盤変位計を設置し、先行変位が確認できる方式を採用した。計測機器の配置例を図-3 に示す。

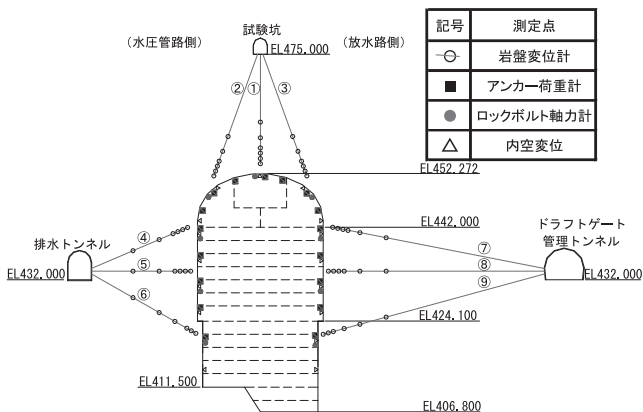


図-3 計測機器配置図 (5-A 断面) : 巻頭グラビア参照

#### (2) 情報化施工管理フロー

掘削の施工管理は、日々の掘削に応じて恒常的に管理する日常管理と、掘削ステップ毎の単位で管理するステップ管理を組み合わせで行った<sup>3)</sup>。

日常管理は、周辺岩盤の挙動計測結果、切羽毎の地質観察結果、キープロック解析結果等から、既設支保

の健全性や対策工の要否を確認した。

一方、ステップ管理は、掘削ステップ毎に日常管理で得られた地質及び計測情報を分析し、想定と異なる地質分布や計測結果を確認した場合には、解析モデルの見直し (地質分布の変更、不連続面の追加、岩盤物性値の見直し等) や逆解析、粘弾性解析による事後解析にて現状の周辺岩盤挙動を再現し、これらの結果に基づく予測解析結果から、最終掘削完了時での地下空洞の安定性や支保設計の妥当性を評価・検討した。情報化施工管理フローを図-4 に示す。

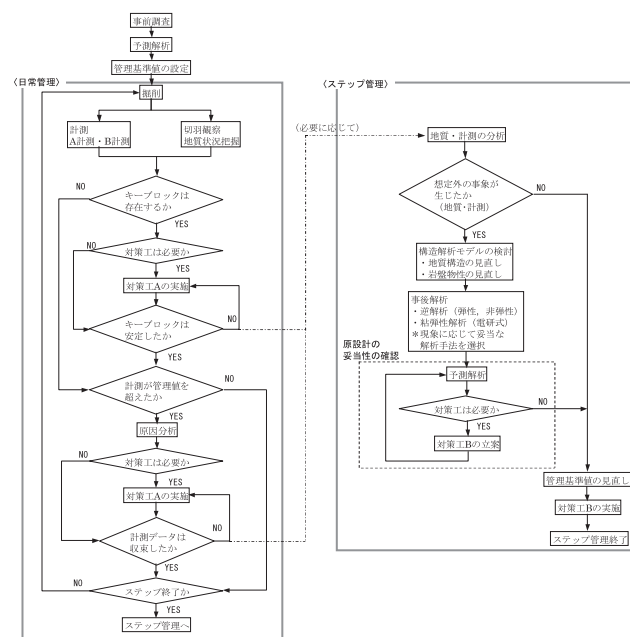


図-4 情報化施工フロー

計測項目は、岩盤変位、アンカー荷重、ロックボルト軸力及び内空変位とし、各項目に管理基準値 I ~ III (表-1) を設定し、計測結果が管理基準値を超過した場合には、管理レベル I ~ IV に応じた管理体制 (表-2) に従い、対処する計画とした。

表-1 管理基準値

管理項目	管理基準値 I	管理基準値 II	管理基準値 III	データの求め方
岩盤変位	解析予測値	アンカー許容引張荷重相当	アンカー降伏荷重相当	岩盤変位計
アンカー荷重	解析予測値	許容引張荷重	降伏荷重	アンカー荷重計
ロックボルト軸力	解析予測値	許容引張荷重	降伏荷重	ロックボルト軸力計
内空変位測定	解析予測値	限界ひずみ中央値相当	限界ひずみ上限値相当	光波測距儀

表-2 管理体制

管理レベル	計測	施工	追加補強	管理基準値
レベル I	計画通り	計画通り	なし	管理基準値 I
レベル II	監視強化	計画通り	なし	管理基準値 II
レベル III	監視強化	計画通り	一部実施	管理基準値 III
レベル IV	監視強化	一時中止	実施	

(3) 情報化施工結果

情報化施工の結果の一例として、5-A断面(図一1)における岩盤変位計測及び解析結果について報告する。

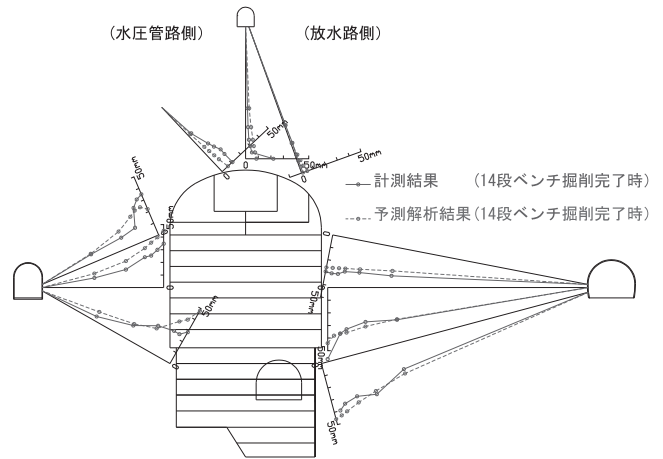
アーチ部掘削完了時のステップ管理で、当初設計における予測解析値は、アーチ部では計測結果と概ね整合するが、側壁部では計測結果に対して、特に水圧管路側の岩盤変位について過小評価となっていることが確認された。

側壁部において岩盤変位の予測解析値と計測結果に乖離が認められたことから、空洞・周辺トンネル掘削時の切羽観察結果、岩盤変位計設置時のボーリング結果及び岩盤挙動の計測結果等に基づき、解析モデル及び解析用物性値の見直しを行い、事後解析により空洞掘削に伴う周辺岩盤挙動の再現を図ることとした。なお、事後解析手法については、当初設計と同様に電研式の非線形粘弾性FEMを採用した<sup>1)</sup>。

この結果、空洞軸方向に連続し、放水路側から水圧管路側へ低角度の傾斜(約20度)で存在する弱層部(C<sub>M</sub>級)をモデル化することで(図一5)、岩盤挙動の再現を図ることができた<sup>3), 4)</sup>。この修正解析モデルを用いて予測解析を行い、掘削完了時まで計測管理を行った。解析及び計測結果は図一6に示すとおり、予測解析結果と計測結果は良い整合を示していると判断される。

4. 情報通信技術(ICT)を活用した情報化施工

大規模地下空洞の情報化施工においては、掘削の進捗に伴い新たに得られる地質情報や空洞壁面の変状を



図一6 修正解析モデル(5-A断面)

いかに早く正確に把握するかが岩盤の安定性、支保の健全性を確認する上で重要な課題となる。

このため、京極では「3次元地質構造・施工状況可視化システム」と「3次元レーザーキャナを利用した空洞変状分析システム」を導入した。

(1) 3次元地質構造・施工状況可視化システム

(a) 地質構造・施工状況の可視化

地下空洞の情報化施工では、観察・計測結果を迅速に評価し、合理的な対策工の立案を行うことが重要であるが種々の困難を伴う。そこで本工事では、地質構造や支保構造を含む掘削進捗状況などを、3次元CGで可視化し、日々更新することが可能な「3次元地質構造・施工状況可視化システム」を導入した。

同システムを用いることにより、掘削進捗に合わせた計測結果の分析・評価など、岩盤挙動の理解を促すことが可能となり、工事関係者全員が地質構造について明確な共通認識を確立すること、および合理的な対策方法の立案を効率的に行うことが可能となった<sup>5)</sup>。この「3次元地質構造・施工状況可視化システム」の概要およびシステムを利用した検討事例について報告する。

(b) システム概要

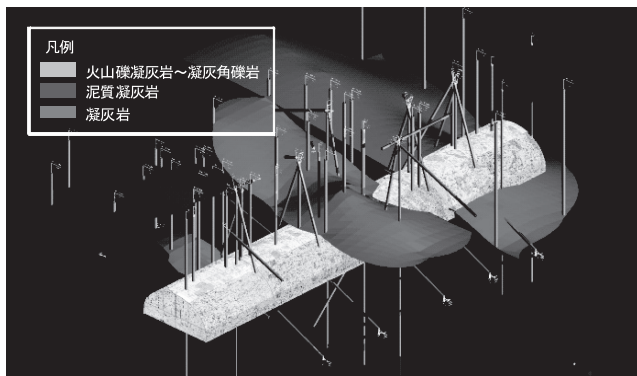
地質情報に関しては、ボーリングデータ及び切羽観察記録をデータベース化し、3次元CGで掘削進捗に応じた地質状況を空間的に把握できるようにした(図一7, 8)。

(c) 穿孔検層結果の3次元表示による不連続面位置の推定

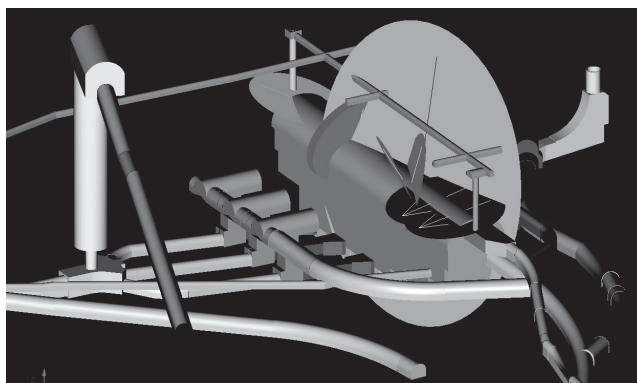
アーチ部掘削でのPSアンカー施工時には、全てのアンカー孔に対して穿孔検層(DRISS)<sup>6)</sup>を実施し、穿孔検層結果については、不連続面位置の推定精度の向上等に活用した。その一例として、1-B断面(断面

	地質モデル	解析用物性値
当初設計時		岩盤物性値(変形係数, 粘着力, 内部摩擦角) Tb2-CH': 10.8GPa 1.6MPa 50.5° Tf-CH': 7.9GPa 1.1MPa 40.0°  初期応力状態 側圧係数 : K=1.73 主応力の傾き : α=3.3°
事後解析時		岩盤物性値(変形係数, 粘着力, 内部摩擦角) ※1 Tb2-CH' (上限): 14.8GPa 2.4MPa 55.3° ※1 Tf-CH' (上限): 9.8GPa 1.5MPa 41.1° Tf-CH': 7.9GPa 1.1MPa 40.0° ※2 Tb2-CM: 2.9GPa 0.8MPa 40.0° (※1 岩盤試験結果の中から上限値を採用) (※2 設計提案値の中から下限値を採用)  初期応力状態 側圧係数 : K=1.73 主応力の傾き : α=3.3°

図一5 修正解析モデル(5-A断面): 巻頭グラビア参照



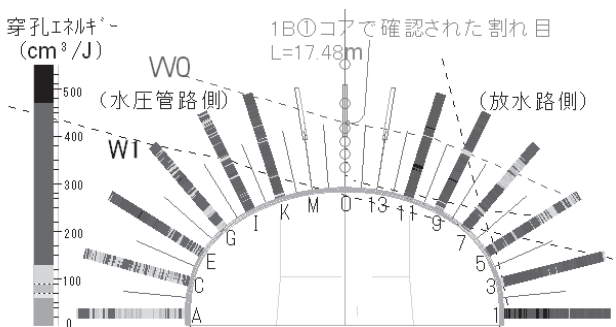
図一七 アーチ部岩種状況：巻頭グラビア参照



図一八 地下発電所本体と周辺トンネル及び地質情報（不連続面）の3次元CG化（空洞掘削時の壁面観察に基づきモデル化した不連続面の一部を円盤で表示）：巻頭グラビア参照

位置については図一1参照）で確認された不連続面に起因する支保応力（アンカー荷重）の増加と不連続面位置の推定結果を以下に示す。

1-B断面における穿孔検層結果を図一9に示す。穿孔検層結果にて確認された岩級低下部をトレースすることで、不連続面（W0）位置を精度良く推定することが可能となる。また、図一10に示すように、空洞縦断の穿孔検層結果からも同様に不連続面（W0）位置を推定することで、不連続面（W0）を3次元の位置情報として把握することができた。他の不連続面位置についても、同様の手法にて推定精度の向上を図り、3次元地質情報に追加した。



図一九 穿孔検層結果（1-B断面，アーチ部）：巻頭グラビア参照



図一十 穿孔検層結果（空洞縦断方向）：巻頭グラビア参照

### (2) 3次元レーザースキャナを利用した空洞変状分析システム

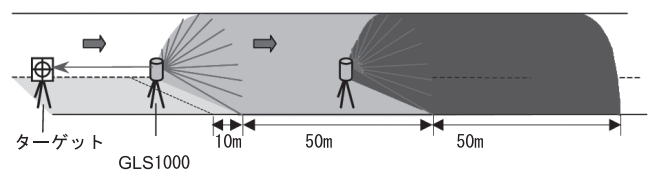
#### (a) 空洞変状の分析

前述の通り、大規模地下空洞の施工においては、掘削の進捗に伴う空洞壁面の変状を把握することが重要な課題となる。一方で、近年、3次元レーザースキャナによる形状計測技術を用いた出来形管理や施工管理手法が報告されている<sup>7)</sup>。そこで、3次元レーザースキャナを利用して、定期的に空洞形状を計測することにより空洞壁面の変位や変形モードを連続面的に確認することが可能なシステムを導入した<sup>8)</sup>。

京極発電所地下空洞掘削中に実施したレーザースキャナの結果から、空洞の変状分析に適用可能か検討した結果を報告する。

#### (b) 3次元レーザースキャナによる測定方法

測定器としては、絶対座標を用いてスキャニングを行うことが可能な3次元レーザースキャナ(GLS-1000: TOPCON製)を選定した。測定方法については、図一11に示す通り、測定誤差を最小限にするために、1ヶ所の機械点からのスキャン範囲を50mと設定し、始点から終点を往復測定することとした。

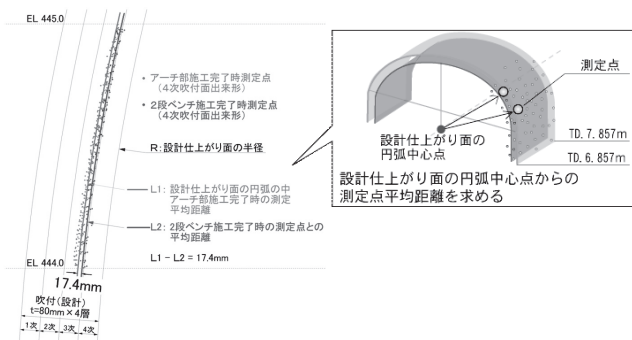


図一十一 測定方法の概要

#### (c) 3次元レーザースキャナ測定結果

3次元レーザースキャナによる測定は、アーチ部掘削完了時と、2段、4段、6段ベンチ掘削完了時に実施した。

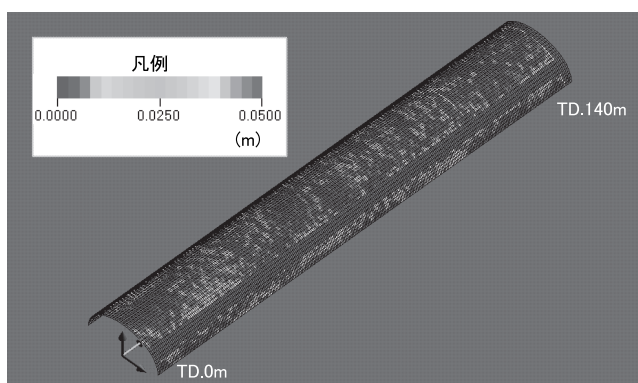
まず、計測断面位置における光波測距儀による壁面変位計測結果との比較を行った。図一12に、アーチ部



図一 12 横断方向点群データ (拡大) : 巻頭グラビア参照

掘削完了時と2段ベンチ掘削完了時のレーザースキャナによる測定結果について、1-B断面近傍 (TD.6.857 m ~ 7.857 m EL.444 m ~ EL.445 m, 放水路側) の範囲に含まれる点群データを示す。設計仕上がり面の円弧の中心と同範囲内に含まれる点群との平均距離の差は17.4 mmであった。これに対して、光波測距儀により計測された側方変位については、19.6 mmであった。これらのことから、レーザースキャナによる2回の測定結果の変位差については、光波測距儀による変位測定結果と概ね良い整合を示している。

図一 13 に、4段ベンチと6段ベンチ施工完了時の変位差分布を示す。同図より、変位差分は、10 mm以下であることが確認された。灰色で表示された箇所は、キャットウォークや移動式クレーンが存在し、壁面へのレーザ照射が不可能な箇所である。また、局所的に暖色系 (緑色~赤色) で表示されている箇所は、アンカプレート の位置で誤差が大きく、これらのデータの処理が今後の課題である。



図一 13 変位差分布図 (4段~6段ベンチ施工完了時) : 巻頭グラビア参照

### 5. おわりに

本稿では、地下空洞掘削における情報化施工計画及びICTを活用した情報化施工への取組みについて報告した。本工事では、情報化施工による計測情報および地質情報を有効に活用し、適切に設計へと反映させ

たことで、切羽を停止させることなく、予定工期で掘削を完了することができた。

最後に、地下空洞掘削における情報化施工の実施にあたり、ご協力頂いた関係各位に対し深く感謝の意を表します。

J C M A

#### 【参考文献】

- 1) 鈴木一巳, 宮永孝志, 小山 俊, 八嶋和幸: 京極地下発電所の調査・設計, 電力土木, No.305, 05, p11-15, 2003.
- 2) 西村哲治, 白戸伸明, 武田宣孝: 京極地下発電所における情報化施工, 電力土木, No.347, 05, p19-23, 2010.
- 3) 西村哲治, 角谷英一郎, 武田宣孝, 毛馬内 学, 高山正志, 名合牧人: 京極地下発電所空洞掘削における情報化施工, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.25-30, 2011.
- 4) 瀧 治雄, 市田雄行, 名合牧人, 武田宣孝: 地下発電所空洞アーチ部掘削時の岩盤挙動とその事後解析, 土木学会第65回年次学術講演会 III -101, pp.201-202, 2010.
- 5) 重廣道子, 岩永昇二, 武田宣孝, 山上順民, 名合牧人, 竹田直樹: 3次元地質構造可視化ソフトを利用した情報化施工支援システムの導入, 土木学会第65回年次学術講演会 VI -357, pp.713-714, 2010.
- 6) 石山宏二, 山下雅之, 木村 哲, 岡井崇彦, 里 優: 穿孔データを利用した地山評価手法へのニューラルネット適用に関する考察, The 11th Japan National Symposium for Rock Mechanics 2002, 6p, 2002.
- 7) 長瀧慶明, 佐藤康弘, 村田 勤, 森川泰成: 3Dレーザースキャナを用いた出来型確認システムの開発-その2 適用事例-, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.577-875, 2005.
- 8) 名合牧人, 鈴木雅浩, 竹田直樹, 松原 誠, 遠藤太嘉志, 重廣道子, 佐藤哲郎, 永田衛史: 大規模地下空洞の変状分析への3次元レーザースキャナの適用検討, 土木学会第65回年次学術講演会 VI -491, pp.981-982, 2010.

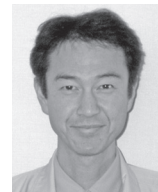
#### 【筆者紹介】



西村 哲治 (にしむら てつじ)  
北海道電力  
京極水力発電所建設所 土木第二課  
課長



武田 宣孝 (たけだ のぶたか)  
北海道電力  
京極水力発電所建設所 土木第二課



名合 牧人 (なごう まきと)  
大成建設  
札幌支店  
課長