
原 著

大阪湾の埋め立て地に掘削された大深度源泉の 揚水試験の特異な一例

西 村 進¹⁾

(平成 23 年 10 月 3 日受付, 平成 24 年 2 月 1 日受理)

A Unique Example of Deep Drilling Well Pumping Test at Reclaimed Land in Osaka Bay

Susumu NISHIMURA¹⁾

Abstract

It is well known that underground water can be pumped up from a well at the condition of downward running water-level change from a static water-level.

A deep well (1,000 m depth) has been drilled at the reclaimed land in the Osaka Bay. The deep well has a casing tube with the screen (strainer) at 870~970 m depth. Step pumping test at the each pumping rates of 100, 200, 400, 600, 800 and 1,000 l/min were performed. Below the rate 400 l/min, it has been obtained that running water levels were higher than the static water-level. Above the rate of 600 l/min, running water levels were lower than the static water-level. During the continuous pumping test with a rate of 350 l/min, the pumping water levels are keep around -20.43 m above -21.77 m of the static water level, associated with some tide changes.

From the geological logs the sedimentary faces are consists of sand and gravel at the depth of 875.30~930.50 m of shallow part of screen of the casing tube. These faces have very high permeability comparing with that of sediments at the lower part of screen between 930.5~970 m. The shallow sediments are belonging to Holocene sediments but the deeper sediments might be belonging to Pleistocene sediments of Osaka Group.

The sediments of the upper part have fresh water but the lower part have brine water. The casing tube of well, brine water are permeated slowly from the lower sediments and the water-level in the well reached the static level. When pumping tests are started, the inside well-water change to fresh water. The results of the pumping tests indicated that some working water levels increased from the static water level.

Key words : Deep well in reclaimed land, Step pumping test, Continuous pumping test, Confined groundwater

¹⁾ 特定非営利活動法人シンクタンク京都自然史研究所 〒606-8305 京都市左京区吉田河原町 14. ¹⁾ NPO Think-tank Kyoto Institute of Natural History, Yoshida-Kawaramachi 14, Sakyo-ku, Kyoto 606-8305, Japan.

要 旨

堆積物の中に掘られた井戸から水中ポンプで地下水を汲むと、井戸の中の動水位が周辺より下がることにより周辺から集水されると考えられている。

大阪湾の埋め立て地に掘削された1,000 mの井戸の875.3~972.5 m深度の透水層にストレーナを入れ、揚水試験をおこなった。汲み上げ水量を100, 200, 300, 400, 600, 800, 1,000 l/minとした段階揚水試験で、400 l/minまでは静水位より動水位の方が高く、600 l/min以上汲み出してはじめて、静水位より動水位が下がった。

必要揚水量の350 l/minで連続的に長時間汲む(連続揚水試験)と、水位は静水位-21.77 mから動水位-20.43 mに上昇した後、ほぼ安定となり、時間差なく潮の干満を記録するようになった。総合柱状図から見ると、ストレーナ上部の875.3~930.5 mの間は非常に透水性の良い砂・砂礫に富む完新世最下部の堆積層で、一方、930.5~970 mは、比較的透水性の悪い更新世の大阪層群である。

完新世の帯水層には淡水が胚胎し、更新世の帯水層には古海水が胚胎する。この場合、掘削井には放置されている間に、海水が長い間にゆっくりと浸透し、海水が混合した大きい比重の地下水に満たされてくる。掘削井からの汲み上げが始まると、透水率のよい地層から淡水が補給されてきて次第に掘削井の中は侵入した比重の小さい単純泉水で満たされる。「自噴していないのに、段階揚水試験の途中まで動水位が静水位より上昇する」現象が起こったのはこのためであると考えられる。

キーワード：埋立地の大深度掘削、段階揚水試験、連続揚水試験、被圧地下水

1. はじめに

大阪湾の埋め立て地に深度1,000 mの温泉の掘削がなされ、そのケーシングのストレーナ(スリット)位置は約873.5~972.5 mである。この温泉には、「地表面下600 m以浅にストレーナを設置しないこと」という掘削許可条件が付けられた。これは、浅層の地下水を採取しないことが要求されたものである。掘削完了後の揚水試験により、「この井戸は、自噴していないのに、段階揚水試験の途中までに、動水位が静水位より上昇する」現象が見られた。その後の連続揚水試験で必要揚水量350 l/minの条件で汲み上げて温泉分析を行った結果、泉質は単純温泉であった。付近の天保山近辺の温泉の掘削によるとストレーナ位置は大阪層群であり(Fig. 1)、大阪層群のこの深度では塩分を含むのが普通である。今回の掘削井の分析結果では単純温泉で、塩分が少ないことに疑問がもたれ、浅部のケーシングに漏水があるのではないかとの議論が行われた。筆者は以前にも同様な経験があり、また、同様な経験を聞いたことがある。そこで今回は、地質柱状図、検層結果ならびに種々な揚水状況が得られたので詳細に検討した。

2. 掘削孔の地質構造の検討

大阪湾を中心とした淡路・六甲地域の三次元地質図が「低レベル放射性廃棄物処分可視化調査」でまとめられた。著者はその地質部会の主査を務め、特に綿密な重力異常図から基盤岩の深度をできる限り正確に推定した(原子力環境整備センター、2000)。Fig. 1は重力異常図から求めた堆積層や大阪層群に被服される花崗岩などの基盤深度構造を示す。これによると掘削場所(Fig. 1)の基盤岩(主に花崗岩)の深さは1,300 m程度と推定できる。さらに、掘削井の総合柱状図(Fig. 2)の記載と大阪層群の研究結果(例えば、市原、1993)から見て、柱状図の作成はスライムの観察によるもので不明なところもあるが、この場所は完新世の泥質の堆積物が厚く870 m程度の厚さがあると見られる。この深度ではじめて粘土質から砂・砂礫が混じり出したことで、やっと完新世最下部、さらに、963 mで、更新世最上部(大阪層群の海進・海退を繰り返す)堆積物に到達したと推定できる。

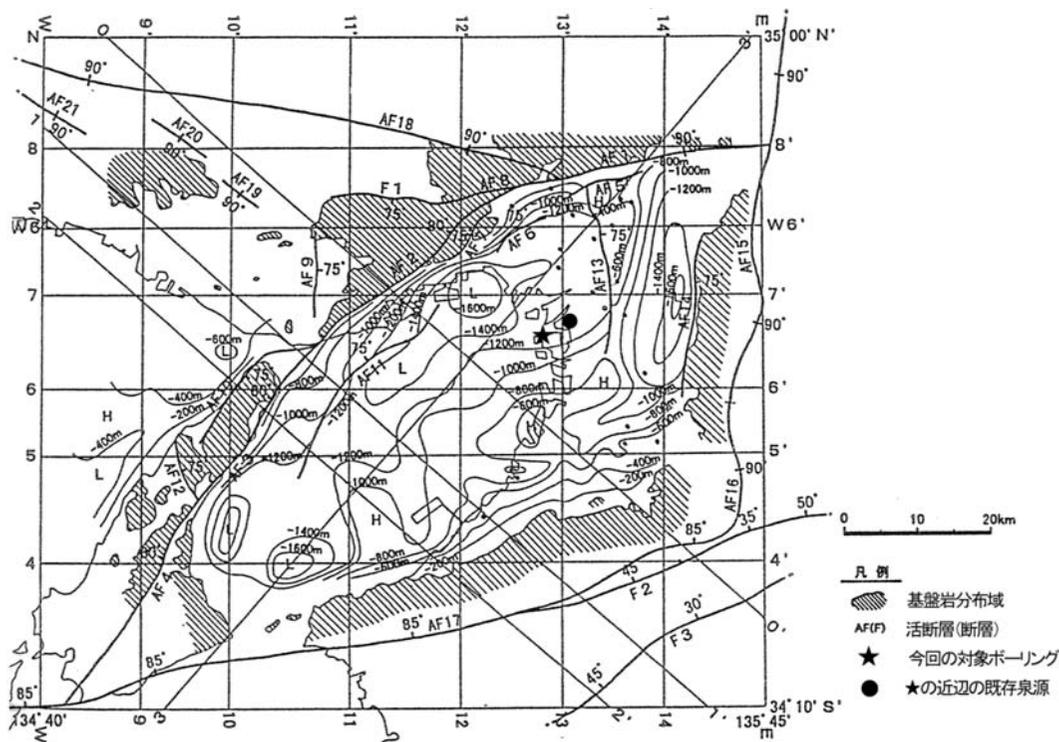


Fig. 1 The altitude of basement in the Awaji-Rokko District (mainly Osaka Bay) (Radioactive Waste Management Research Center, 2000).
The pumping test well (★) and the nearest hot-spring well (●).

図 1 淡路・六甲地域の基盤（主として花崗岩）表面の深度線図。（原子力環境整備センター，2000），今回の揚水試験の温泉井の場所を（★），近辺の温泉井を（●）で表す。

掘削場所の標高は OP+9.30m で、総合柱状図から、埋立ての厚さは 21.0m であり、21.08m から 82.3m 深度までは緩傾斜の浅海性堆積物で、82.3m から 870m 深度までは、ほとんど泥質（粘土）堆積物で、透水系数が $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sec と小さく、875.3~963.0m 深度は砂・砂礫が多く透水系数が $10^{-1} \sim 10^{-3}$ cm/sec と大きい、基盤（花崗岩）の深度（Fig.1 参照）から、この砂・砂礫層は急勾配で陸地側では上昇する。すなわち大阪層群との境界面は、急傾斜で天保山の方向（東方向）へ上昇するが、大阪湾側ではほとんど傾斜せず水平に近い。

今回検討した 1000m 深度の掘削井の大阪層群直上部の 873.5~972.5m 深度にストレーナ位置を決め、地下水を汲み上げると、大阪層群中の塩水ではなく淡水（単純温泉）で、多量の淡水の地下水が供給されている。ただし、500 l/min 以上汲むと微砂を汲み上げるので、この深度でも極めてルーズな堆積物であると推定できる。完新世の堆積層からの湧水であれば、泉質が単純泉であることも理解できるし、この深さでは、地下水は停滞性で、pH8.1 程度であることも理解できる（Table 1）。

温度検層と電気検層の結果も Fig. 2 に示す。温泉分析書にある湧出地試験時の揚水温度は 46.1°C（揚湯量 350 l/min）で、温度検層のストレーナ位置（深度 873.5~972.5m）の温度からみて、このストレーナからの湧水であり、ケーシングの上部で地下水が漏洩したものではない。検層結果から、深度 873m で温度が急に上昇し以深は高温となるが電導度は低いまま変わらず、塩分濃度は薄いこ

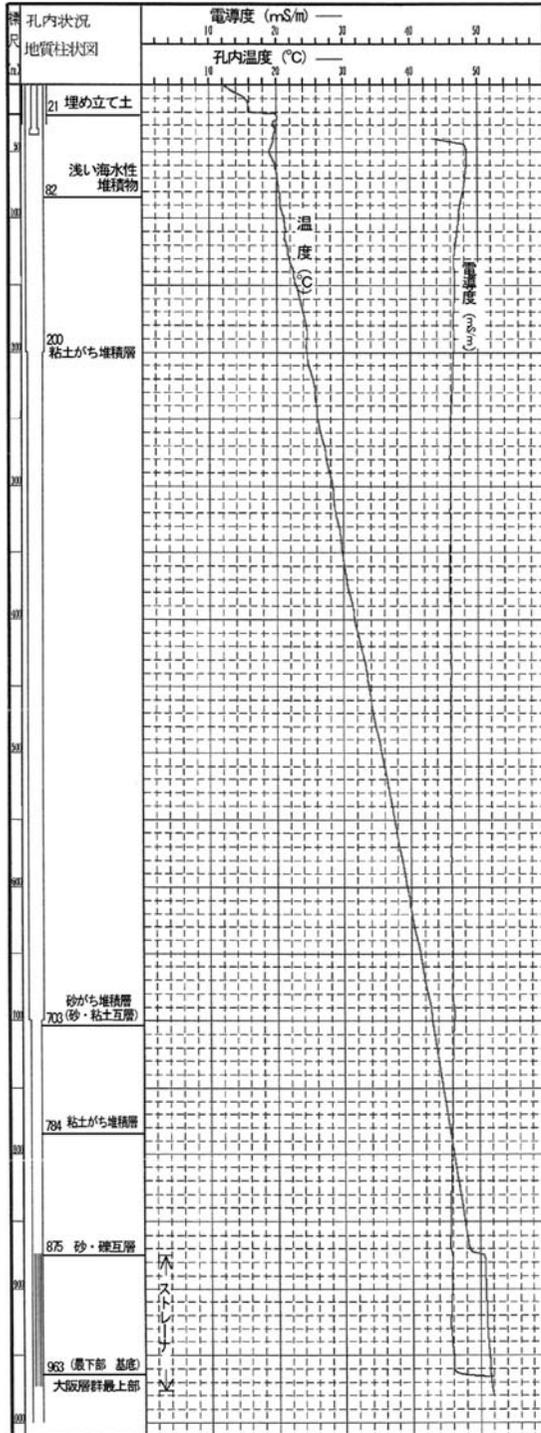


Fig. 2 The composite geological columnar section of the hot spring.

図 2 掘削井の総合柱状図.

とを示す(低濃度帯水層). 深度 960 m では温度は変化しないが, この深度から電導度が急上昇する. これはこの部分から, 塩分濃度が大きくなり, 大阪層群中の古海水の影響に入ったことを示唆する(高濃度帯水層). スライムの検討では 963 m で大阪層群の最上部の海成層である. 古海水はこの層から湧出するものと考えられる. 長く汲みだされた温泉は塩分濃度の薄いことから, 低塩分濃度帯水層からがほとんどと推定できる.

掘削地点は, 標高 OP+9.30 m で, 21.0 m 深度(大阪湾の平均海面下 11.7 m)までは埋め立て地で, 21.0~82.3 m 深度は浅海性堆積物でほぼ現在の状態が続いている. 82.3~963 m 深度までは完新世の堆積物で, 大阪層群(更新世最上部)を不整合で被う急速に神戸沖が沈降する(Fig. 1 参照)大阪湾に堆積した層である. この厚い完新世の堆積物は 784 m 深度までは, 洪水時の末端近くの堆積物で淘汰が悪く泥質で透水係数は悪い. その下部 963 m 深度までは砂礫層を挟み, 963 m の基底まで透水性の良い地層で, 透水係数は砂・砂礫層が $10^{-1} \sim 10^{-3}$ cm/sec と大きい, 82.3~784 m 深度までは透水係数は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sec と小さい. 海面 OP+9.3~21.0 m 深度の埋め立ての部分ならびに 82.3~878.4 m 深度の堆積物の透水係数はそれらの中間である. 963 m 深度以下の大阪層群の堆積層は細礫を含む砂層, 海成粘土層の互層である. 大阪層群の砂層は比較的透水性が良いが, 基底上部の堆積物よりは透水係数が低いと推定でき, その砂層には被圧の古海水を胚胎する.

Table 1 Outline of analytical table of the studied hot springs with the extraordinary results from pumping test.

表 1 揚水試験で異常な現象を経験した採水の温泉分析表の概要.

分析書発行日	平成 18 年 12 月 8 日
分析者	中央温泉研究所
現地分析 泉温 湧出量 pH 蒸発残留物	46.1°C (気温 9°C) 350 l/分 (動力) 8.1 (ガラス電極) 0.294 g/kg (110°C)
採湯のストレーナ箇所の地質	沖積層
室内分析 主な陽イオン Na ⁺ 主な陰イオン Cl ⁻	93.6 mg/kg 239.2 mg/kg
泉 質	単純温泉 (低張性・弱アルカリ性温泉)

3. 揚水試験

掘削を終了し、孔内洗浄後、掘削会社により平成 18 年 11 月 29 日から 12 月 4 日にわたり、揚水試験が行われた。そのときに用いられた試験機器などを Table 2 に示す。

段階揚水試験は水量 200, 250, 300, 350, 400, 450 l/min の 6 段階で行いその結果を Table 3, Fig. 3 に示す。水位の安定が悪く、どの段階の動水位もすべて静水位の -21.52 m より上位であり 250 l/min のときもっとも高い位置で安定した。

使用予定の揚水量 350 l/min で 70 時間の連続揚水試験をしたところ、静水位は -21.45 m で、動水位はほぼ -20.15 m であった (Fig. 4, Table 4)。

温泉分析は 12 月 4 日に現地試験とその後の室内試験でなされた。その結果は前述の通り、単純泉であった (Table 1 参照)。

この結果をもとに動力申請をしたが、審議の結果、「動水位が静水位より高く、非常に不自然である。データが安定していないので、ケーシングの上部で漏水しているのではないか。」との意見が付けられ、動力申請書が差し戻された。そこで揚水試験の担当会社を替えて、慎重に再度、揚水試験が試みられた。

第 2 回目の揚水試験は平成 19 年 1 月 19 日から 1 月 26 日にわたって行われた。その時用いた試験機器などを Table 5 に示す。

段階揚水試験は、静水位より動水位が下がることとそれ以上揚水した時の状況の確認を目的とし、揚水量を 100, 200, 400, 600, 800, 1,000 l/min と変えて行われた。その結果を Table 6, Fig. 5 に示す。この段階揚水試験では、100~500 l/min のときには動水位が静水位より高く、今回の段階試験では 200 l/min のときが最高動水位で、600 l/min 以降動水位が静水位より低くなっていた。これは、前回の揚水試験の通りである。

段階揚水試験のときの揚水温度を Fig. 6 に示す。この段階揚水の水温の変化を見ると、200 l/

Table 2 Outline of the 1st pumping test of the studied hot spring well and the testing equipments.

表 2 第 1 回揚水試験での温泉の概要と試験機器.

温泉井深度	1000 m	
温泉井の口径	① φ 300 mm	0~30 m
	② φ 200 mm	0~200 m
	③ φ 150 mm	200~700 m
	④ φ 100 mm	700~1000 m
ストレーナ位置	873.50~972.50 m	
ポンプ位置	-181.00 m	
試験ポンプ	グランドフォスポンプ	SP-27-11 15 kW
揚水パイプ	HQT 内径φ 77.8 mm	
段階試験揚水量	200~450 l/min の 6 段階	
水位測定器	デジタル FDD-N 型水位計, ロープ式水位計を併用	
流量測定器	三角ノッチ, 40 l バケツ	
試験期間	平成 18 年 11 月 29 日~12 月 4 日	

Table 3 Results of the 1st step pumping test of the studied hot spring well.

表 3 第 1 回段階揚水試験結果.

段階	項目	湧出量 Q (l/min)	自然水位 N.W.L (- m)	動水位 D.W.L (- m)	水位降下 s (m)	比湧出量 Q/s (l/min/m)
1		200	21.52	20.55	+0.97	206.19
2		250	—	20.10	+1.42	176.06
3		300	—	20.22	+1.30	230.77
4		350	—	20.26	+1.26	277.78
5		400	—	20.32	+1.20	333.33
6		450	—	20.41	+1.11	405.41

1~3 段階の揚水時間は 1.0 時間, 4~6 段階の揚水時間は 2.0 時間とした.

Table 4 Results of the 1st continuous pumping test of the studied hot spring well.

表 4 第 1 回連続揚水試験結果.

湧出量 Q (l/min)	自然水位 N.W.L (- m)	動水位 D.W.L (- m)	水位降下 s (m)	比湧出量 Q/s (l/min/m)
350	21.45	20.15	+1.30	269.23

連続 72 時間 回復 2 時間 (自然水位までの確認) で実施.

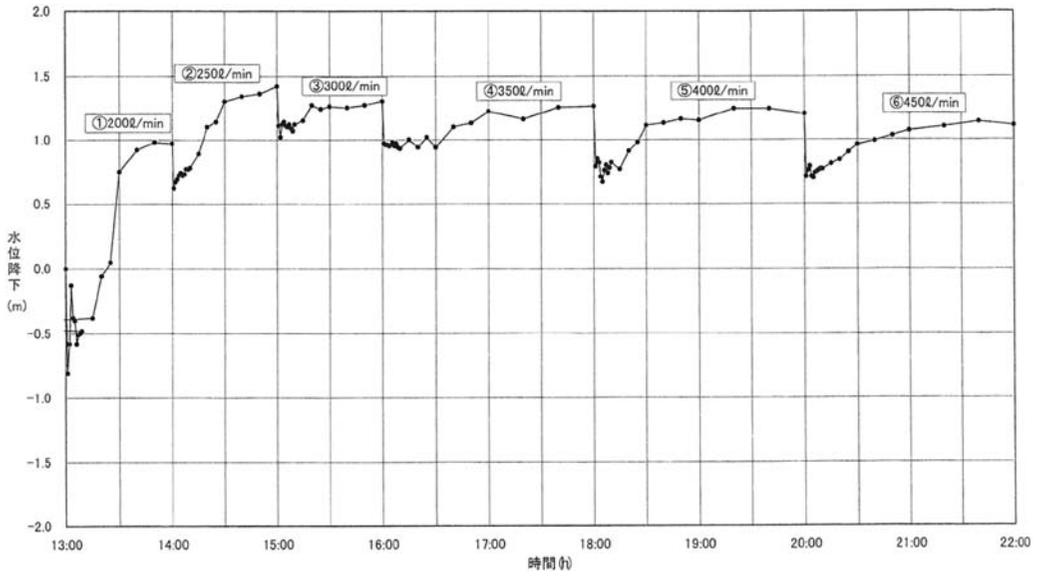


Fig. 3 The result of the 1st step pumping test of the hot spring.
 図 3 第 1 回段階揚水試験結果.

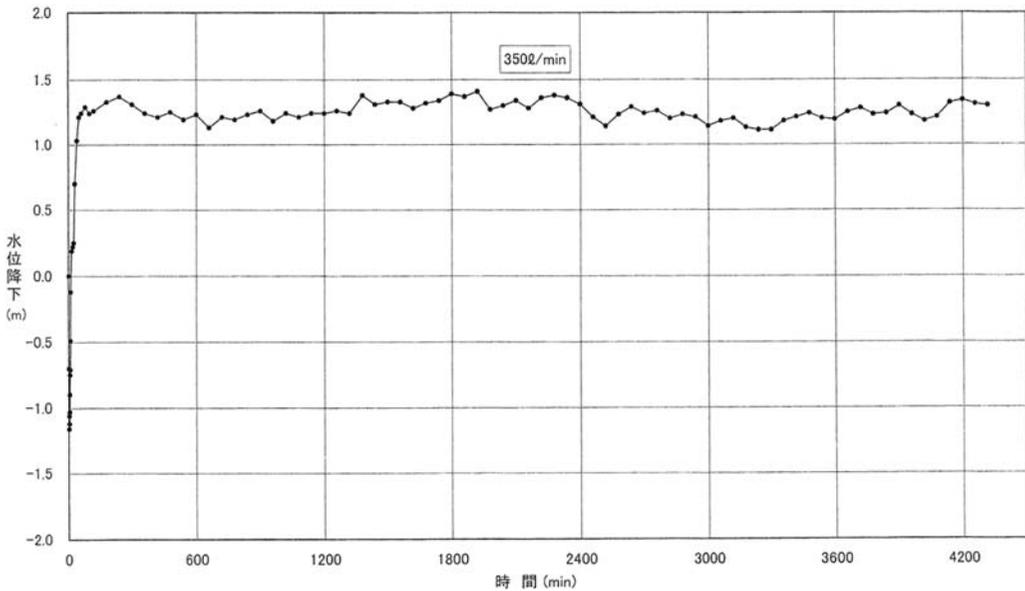


Fig. 4 The result of the 1st continuous pumping test of the hot spring.
 図 4 第 1 回連続揚水試験結果.

Table 5 The outline of the 2nd pumping test of the hot spring.

表 5 第 2 回揚水試験での温泉の概要と試験機器.

温泉井深度	1000 m
温泉井の口径	①φ 300 mm 0~30 m
	②φ 200 mm 0~200 m
	③φ 150 mm 200~700 m
	④φ 100 mm 700~1000 m
ストレーナ位置	873.50~972.50 m
ポンプ位置	-111.50 m
試験ポンプ	おかもとポンプ F E660/7-100 18.5 kW
揚水パイプ	SGP-80A 内径φ 80.7 mm
段階試験揚水量	100, 200, 400, 600, 800, 1000 l/min の 6 段階
連続揚水試験揚水量	350 l/min
水位測定器	①自動水位測定器 (LTM-II) LS-60 ②ロープ式水位計を併用 ※測定結果は, ②のロープ式水位計の測定値を採用
流量測定器	①三角ノッチ, ② 200 l ドラム
試験期間	平成 19 年 1 月 19 日~1 月 26 日

Table 6 The results of the 2nd step pumping test of the hot spring.

表 6 第 2 回段階揚水試験結果.

項目 段階	湧出量 Q (l/min)	自然水位 N.W.L (- m)	動水位 D.W.L (- m)	水位降下 s (m)	比湧出量 Q/s (l/min/m)
1	100	21.77	19.52	+2.25	—
2	200	—	19.08	+2.69	—
3	400	—	21.23	+0.54	—
4	600	—	24.77	-3.00	200.00
5	800	—	27.01	-5.24	152.67
6	1000	—	31.70	-9.93	100.70

1~6 段階の揚水時間は各段階で水位が安定した 1.0 時間とした.

min での段階揚水の水温が静水位の地盤の温度に近く, 1,000 l/min で 47°C 程度となり, 上部で漏水があったとは考えられない結果であった.

必要揚水量 350 l/min で 55 時間の連続揚水試験で, 注意深くデータを取得した結果 (Table 7), Fig. 7 に示すように動水位は -20.40~-20.15 m で潮汐変化を伴う. また, 海の干満が瞬時に温泉水の水位に同期している.

2 回にわたる揚水試験とも類似の結果が得られたが, この掘削井の近くの 1,500 m の温泉掘削 (Fig. 1 の●印) の揚水試験では, 静水位と動水位には僅かの差しかしなかった. 掘削状況から,

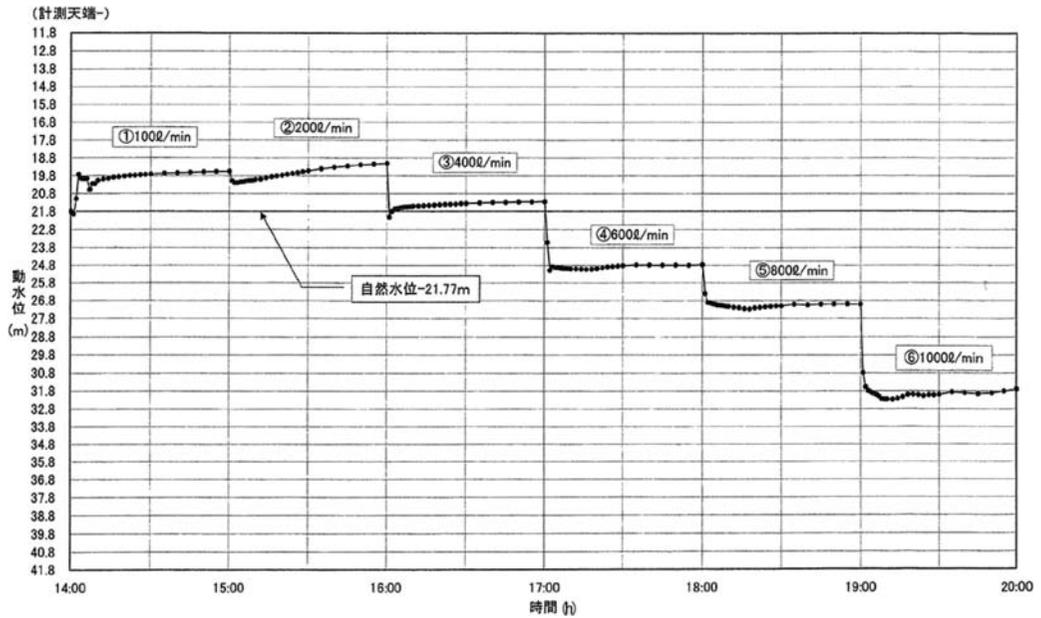


Fig. 5 The result of the 2nd step pumping test of the hot spring.

図 5 第 2 回段階揚水試験結果.

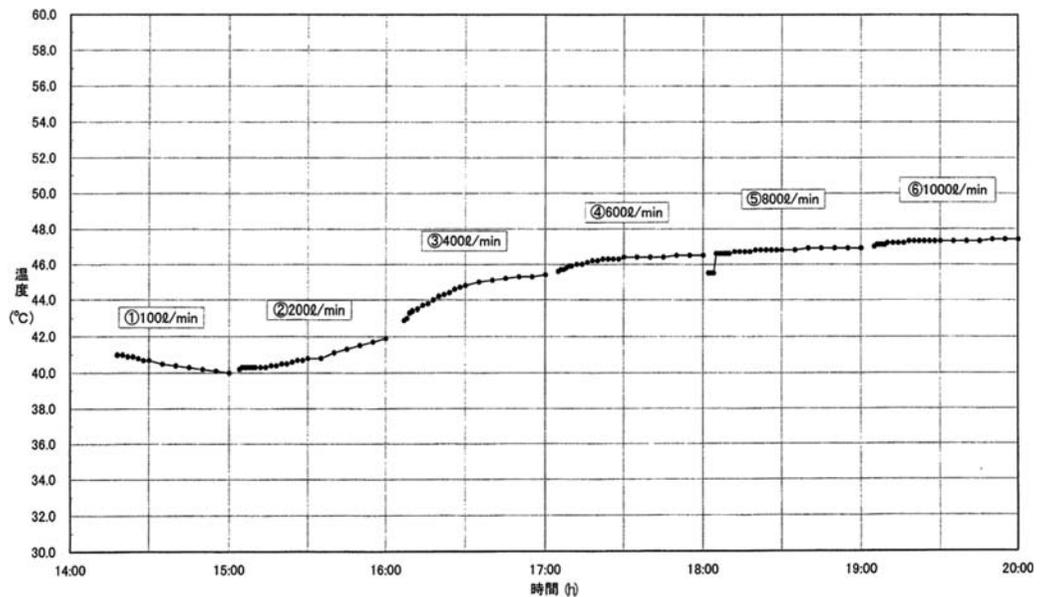


Fig. 6 The temperature of the pumping up water at the 2nd step pumping test of the hot spring.

図 6 第 2 回段階揚水試験時の揚水温度.

Table 7 The results of the 2nd continuous pumping test of the hot-spring.

表 7 第 2 回連続揚水試験結果.

湧出量 Q (l/min)	自然水位 N.W.L (- m)	動水位 D.W.L (- m)	水位降下 s (m)	比湧出量 Q/s (l/min/ m)
350	21.77	20.14	+1.60	218.75

連続 48 時間 回復 24 時間で実施.

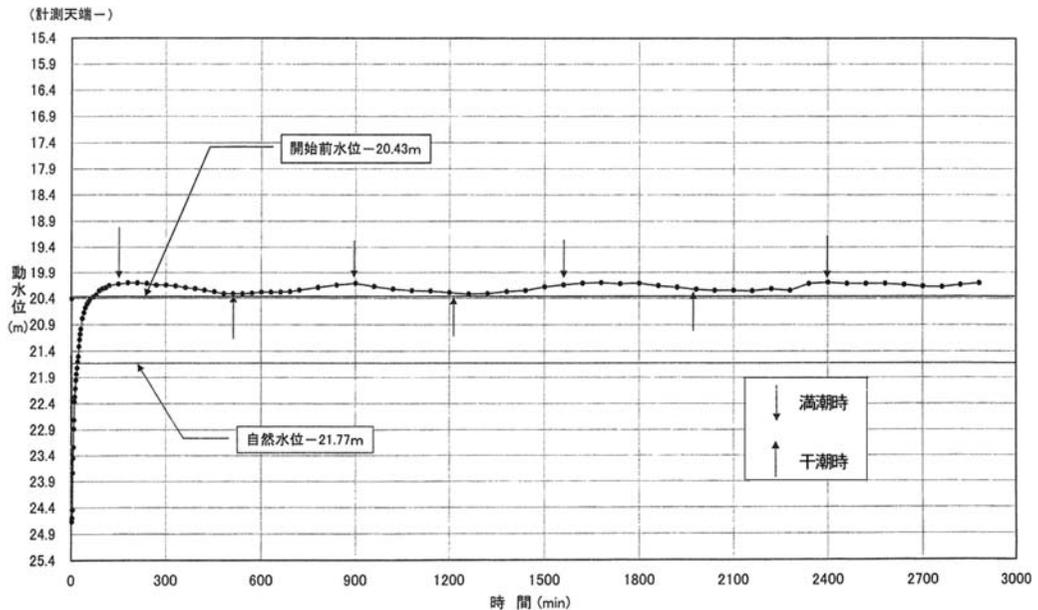
Fig. 7 The result of the 2nd continuous pumping test of the hot spring.

図 7 第 2 回連続揚水試験結果.

その場では比較的浅くて大阪層群の海成層に入っていた。泉質は塩類泉であった。

さらに、この動水位が静水位より上がる現象を確認するために、平成 19 年 3 月 16 日、三度目の、現地にて揚水し、動水位が静水位より上がる不自然に見えるこの現象が起こるのを確かめた。さらに検討するために、その時に温度検層と電気検層を実施したのを Fig.2 に示した。掘削時のスライムの検討と検層の結果ならびに揚水試験の結果から、この現象は次のように説明がつく。

ストレーナーの深度 (873.5~972.5m) では、スライムの検討から 963m 以深は更新世の大阪層群の砂層で、その大阪層群の砂層を不整合で完新世の堆積物が被っている。完新世の堆積物の基底は前述の透水係数の良い地層で、淡水の地下水を胚胎し、それ以深の大阪層群は古海水の被圧水を胚胎している。検層は連続揚水試験を後 2 時間ほど経過してなされたもので、この時点で 962m 深度まで電導度の良い古海水の存在が見られたことは、僅かでありながら、古海水の方が淡水より水圧が高いことを示している。このことは汲み上げることなく長期間放置すると、次第に坑内水の塩分が高くなり静水位は下がり安定する。揚水が始まると完新世の堆積物の方が透水性がよいので、淡水が補給され、塩分濃度がさがる。また、揚水試験のとき、静水位が異なるのは塩分濃度が異なることで説明がつく。

Table 8 The outline of analysis table of a hot-spring nearest the hot spring.

表 8 当該温泉の一番近辺の温泉の温泉分析表からの抜粋.

分析書発行日	平成元年 10 月 7 日
分析者	大阪府公衆衛生研究所
掘削深度	1,500 m
泉温	53.9°C (気温 29°C)
湧出量	245 l/分
pH	7.2 (比色)
蒸発残留物	18.70 g/kg (130°C)
採湯のストレーナ箇所地質	大阪層群
主な陽イオン	
Na ⁺	6364 mg/kg
Mg ⁺⁺	136.6 mg/kg
Ca ⁺⁺	171.1 mg/kg
主な陰イオン	
Cl ⁻	9707 mg/kg
HCO ³⁻	1608 mg/kg
溶存ガス	170.3 mg/kg
泉 質	ナトリウム—塩化物強塩温泉 (高張性・中性・高温泉)

4. ま と め

- ① ある大阪湾の埋め立て地で掘削された温泉井は、大深度のストレーナからの被圧地下水の揚水がなされており、揚水時の泉温と温度検層のストレーナ位置の温度から、ケーシング上部での漏水があるとは考えられない。
- ② 掘削時のスライムの検討からの地質柱状図、ならびに電導度の検層結果から、963 m 深度で完新世の堆積物が更新世最上部の大阪層群を不整合で被っていることが判る。完新世の基底近くは透水性のよい砂・砂礫層が急傾斜で、掘削地の西側の湾側は重力測定の結果からみて、急に緩傾斜になるので、温泉水を汲み上げると温泉水の供給は陸側から速やかになされる。
- ③ ストレーナの上部は、完新世の堆積物で透水性の良い砂礫層で下部に更新世の少し透水性が悪い砂層である。上部の砂礫層は淡水の被圧地下水が胚胎するが、下部は古海水の比較的被圧の高い地下水が胚胎する。そのため、長時間放置すると掘削孔内の塩分は次第に高くなる。しかし、汲み上げを開始すると次第に淡水に入れ替わる。その孔内の塩分濃度の差により、静水位より動水位の方が高く、揚水量を上げると、動水位が下がることが理解できる。このことは揚水試験の時、揚水を止めると静水位は下がっていくが、再開の時間により、静水位が定まらないことも理解できる。
- ④ 掘削地では段階揚水試験の結果から見て、限界揚水量は 800 l/min としてよい。ただし、500 l/min 以上で微砂が混入してくるので、一部乱流が起これると考えられる。そのことを考慮して、使用量の 350 l/min は、適正揚水量の範囲にあると考えられる。

謝 辞

2名の査読者のお方には、あいまいな議論の原稿を非常に丁寧に査読して頂き、結論が明確になり、非常に感謝します。さらに編集委員会には、非常に雑な原稿であったが、非常に丁寧に添削して頂き、感謝します。

引用文献

- 原子力環境整備センター（2000）：低レベル放射性廃棄物処分可視画像化調査報告書（平成3～11年度検討の総括）. 180 p.
- 市原実編・著（1993）：大阪層群. 340 p. 創元社, 大阪.
- 山本莊毅（1972）：揚水試験と井戸管理. 180 p, 昭晃堂, 東京.