

温泉輸送について

財団法人 中央温泉研究所 細 谷 昇

(昭和49年8月30日受理)

Transportation of Thermal Mineral Water

Noboru HOSOYA

Hot Spring Research Center Institute

1. 温泉の三大要素

温泉法第二条によれば温泉とは地中から湧出する温水、鉱水及び蒸気、その他のガスで別表に掲げる温度又は物質を有するものをいう、と記してあるがこれを工学上から見れば温泉には三つの要素がある。即ち① 温度、② 湧出量、③ 溶存物質である。この内③は温水、鉱水、又は蒸気中に含まれる化学成分であり一方①と②と乗ずれば熱量となる。従って温泉は熱水溶液又は熱気体と言える。それ故このような流体を輸送することを熱工学からみれば、水溶液又は気体を熱媒体とする熱量輸送と言える。又温泉の定義から言えばその輸送には液体と気体との二面があるのでこの二相について論ずべきであるが、輸送の対称が主として温泉水であるから、流動論的に言えば、液体輸送でもある。そこで本講は温泉水に的を絞って、その輸送について話を進める。温泉水は熱水溶液であるがためにその輸送に当っては、特異的な問題として温泉沈澱物及腐食の問題が発生せざるを得ない。

2. 温泉沈澱物及びその対策

温泉水輸送に際し、温泉水中より不溶解性物質が析出したり、或は硫黄バクテリアや鉄バクテリアなどの細菌群が繁殖し、パイプの管口径をせばめ、或はポンプ内面に附着して機能を低下させる。この析出物質は温泉沈澱物、温泉華、湯の花、湯垢、スケールなどといった、色々な名称がつけられている。これ等の物質をいかにして除くか或は附着や沈澱を防止するかについては、温泉水の輸送に際し重要な問題となってくる。温泉沈澱物の成因及び性質については、既に多くの報告がなされているので、ここではその種類と附着防止並に除去対策についてのべる(第20回温泉科学大会にて発表)。

2-1) 温泉沈澱の種類

① 硫黄質のもの

- a. 遊離硫黄を主要分とするもの(湯の花)
- b. 硫化物を主成分とするもの(硫化鉄)

② 硫酸塩を主成分とするもの(アルノーゲン、ハロトリカイト、石膏、北投石)

③ 珪酸質のもの(珪華)

- ④ 水酸化物、或は酸化物を主成分とするもの（水酸化第二鉄、二酸化マンガ）
- ⑤ 炭酸カルシウムを主成分とするもの（石灰華、スケール）
- ⑥ 温泉水中に棲息する生物或は生物が関与して生成するもの（硫黄バクテリア、鉄バクテリア、藻類）

等で、この内 ②、③ については、現在までの温泉水輸送に大きな障害になってない。しかし ③ は、地熱開発によって生ずる熱水中には非常に多く、この対策のきめ手はまだ確立されていない。それ故これ以外の沈澱物の対策について述べる。

2-2) 温泉沈澱の防止或は除去対策

① 硫黄質のものの場合

- a. 空気との接触を適当に調節する方法
- b. エアレーション后濾過する方法
- c. 塩素処理法（これは泉質の問題より不適當）

② 水酸化物、あるいは酸化物を主成分とする場合

この沈澱物は、主に鉄質の沈澱物でその対策は

- a. 溶存している鉄を除去する方法（除鉄法）
 - イ. 曝気酸化→凝集→沈澱→汙過処理の過程を採る仕組
曝気酸化を薬品でもやれるがこれは問題がある。
 - ロ. マンガンゼオライト法

b. 沈澱物防止剤を使用する方法

ポリメタリン酸ナトリウムや珪酸ナトリウムが使用される。

c. 沈澱物溶解剤を使用する方法

塩酸、有機酸類を薬剤として用いる。

③ 炭酸カルシウムを主成分とするものの場合

a. 機械的に除去する方法

b. 沈澱槽を設け、ここで炭酸カルシウムを生成させてしまう方法（沈澱法）

c. 温泉水に水を霧状に散布して混合する方法

この方法は非常に効果がある。その理由は、温泉水中の炭酸ガスが、散布される水に吸収され回収するといった効果が加わるからである（注水法）。

d. 薬品添加法

使用される薬品は、塩酸、炭酸ガス、重合磷酸塩、珪酸塩等である。

e. 磁気力を使用する方法

④ 微生物あるいは生物が関与して生成するものの場合、上水道工業用水などではかなり進んだ処理が行なわれているが、温泉ではあまり研究されていない、一般的な方法としては、

a. 日光の遮断（藻類）

b. 紫外線照射（細菌類）

演者は市販の 15 w 紫外線殺菌灯を使用して下呂温泉にて硫黄バクテリアに対する殺菌効果をしらべたところ、0.5 l/min の流量ならば、バクテリアの繁殖を極度におさえることが出来た。

c. 薬剤処理

薬剤としては塩素、硫酸銅、オゾン等である。山口県湯田温泉の鉄バクテリアの繁殖による障害については、塩素処理がかなり有効であったという。

以上述べた対策は温泉を閉管路で輸送する建前で色々研究を重ねたのであるが、開渠による輸送が輸送熱量に支障がなければ、沈澱物対策として非常に効果的である。

3. 温泉水による腐食とその対策

温泉水による腐食は輸送用器材即ちポンプ、バルブ、導管、動力操作盤、電線管等に障害を起こすため重要な課題となる。

3-1) 腐食作用

温泉水による腐食作用を考える場合に重要なことは、その腐食が温泉水によって直接起こる場合と、温泉中に含まれるガス成分によって間接に起こる場合があることで、腐食が起こっている状態で見ると

- a. 温泉水と直接、常に接しているために起る腐食
- b. 温泉水の水蒸気によって起る腐食
- c. 電食
- d. 温泉より発生するガスによる腐食

a. の場合は、酸性の温泉に金属(鉄類)などの溶解作用で化学的反應にもとづくものである。又 c の場合も広い意味では a に含まれているもので異種金属が温泉水中に接触している時におこりやすい。又同一金属でも温泉中で金属に接している温泉の温度差が生ずれば、熱電池作用により腐食する場合もある。これも一つの電食とみなせる。

b. の場合は、大氣中に鉄をおくとやがてその表面は輝きを失ってくもりを生ずる。これを大氣腐食と呼んでいるが温泉水の水蒸気による腐食現象は大氣腐食のそれと同一とみなせる。

d. の場合は、温泉より発生するガスが金属と作用して起るものであるが、普通は炭酸ガスや硫化水素ガスである。この腐食の媒体には金属に附着している水滴が一役かっている。即ちこれらのガスは、水滴に吸収されて、炭酸ガスの場合は水滴が弱酸性となり、又硫化水素の場合はこれが酸化されて硫酸となり強い腐食作用を示す。しかも硫化水素は金属に直接反應して腐食を進行させる場合もある。

腐食について特に注意を要する泉質としては、酸性泉、硫化水素泉、炭酸泉、炭酸鉄泉、溶存分量や溶存酸素含量の多い温泉等である。

又熱起電力による腐食は温泉水を取扱う以上今後かなり研究する余地がある。

3-2) 腐食対策

腐食対策として簡単に列記すると。

1) 管 材

一般には合成樹脂を主材としたものを使用する。

この場合、物理的強度が使用条件にかなりことも考慮しなければならない。又石綿セメント管も単純泉に多く使用されている。最近では鉄管は余り使われない。

2) ポンプ類

通常ポンプは大部分鑄鉄で作り、羽根車、その他の作動部分、或は温泉水と接するところに砲金を用いていることが多い。また泉質によっては特種な材料を用いる。

例えば、草津温泉などは強化プラスチック製のものが使われている。又高圧ポンプの特種なものとしてはチタン製のポンプが有る。

3) 槽類

昔は木製のものを使用していたが、その後、鉄筋コンクリート製となり内面を耐食製樹脂を塗布し、防水もかねている施工を行なっている。最近では鋼鉄製で槽をつくり内面を強化プラスチックライニングを行っている。又強化プラスチック製の槽も製作される様 (F. R. P. 製タンク) になってきた。

4) バルブ類

一般には鑄鉄バルブ、砲金バルブ、が使われているが、泉質によってはステンレスバルブ、チタニウムバルブ、プラスチック製バルブが使用されている。

5) 防錆塗料

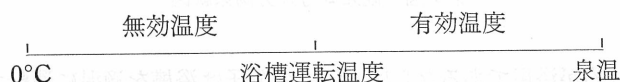
これは大気腐食又は硫化水素によって生ずる腐食を防ぐためによく用いられる。動力操作盤などはこの一例である。

4. 有効熱量及利用効率

温泉は一つの熱エネルギー源とみなせるが普通の燃料と違うのは、その使用目的により利用出来る熱量即ち有効熱量が異なるのである。例えば温泉水を浴用に使用した時の事を考える。通常浴槽運転温度は $43^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{C}$ と言われているが、浴用に供した時の泉温の意義は浴槽運転温度 (例えば 43°C) を境に、有効、無効の二つの領域に別られ、泉温と浴槽運転温度との差が有効温度となる。これを式で表わせば、

$$\text{有効温度} = \text{泉温} - \text{浴槽運転温度} \quad (1)$$

となり、図で表わせば、次図の如きものとなる。

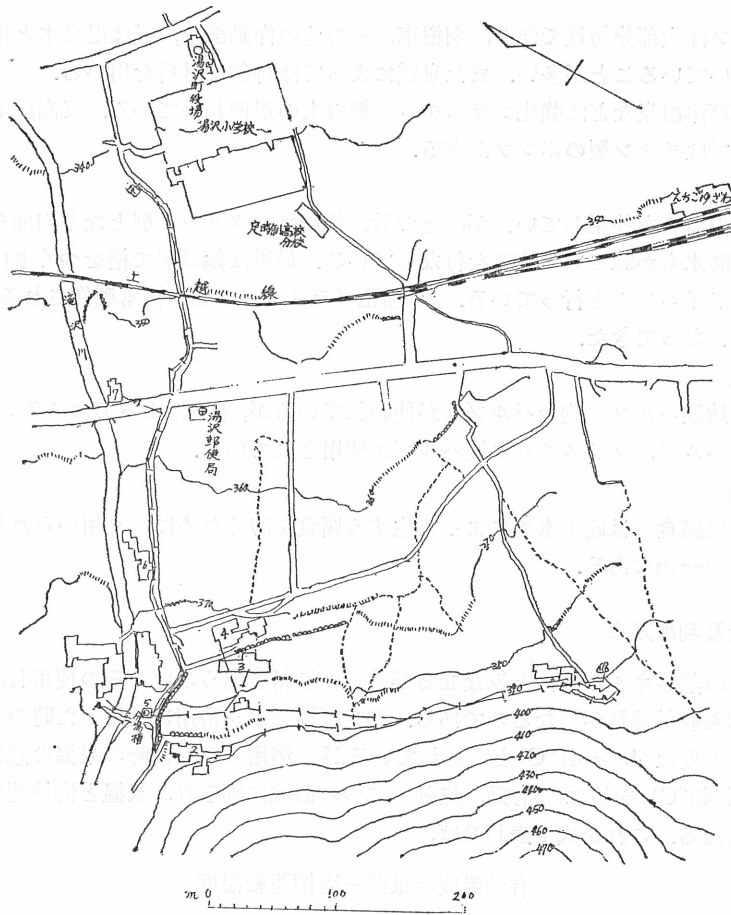


又温泉の三大要素の内の湧出量をこの有効温度に乗ずれば有効熱量であり、その関係式は

$$\text{有効熱量 (kcal/hr)} = \text{有効温度} [^{\circ}\text{C}] \times \text{湧出量} [l/\text{hr}] \quad (2)$$

である。この有効熱量が浴槽運転を支えるもので、都市の風呂に必要な燃料と同じ働きをするものである。又温泉水の使用目的が室内暖房であれば、(1) 式の右辺の第 2 項は $18\sim 25^{\circ}\text{C}$ の間の温度となり、これに湧出量を乗ずれば、その場合の有効熱量となる。この様に使用目的に応じて温泉の熱エネルギー (有効熱量) 量は変化する。次に温泉の利用効率についてのべる。温泉の利用効率とは源泉の持つ有効熱量が使用目的のために実際どの程度利用されているかの度を百分率で表わしたものである。これを式で表せば

$$\eta(\%) = \frac{\text{使用目的のために真に必要な有効熱量} [\text{kcal/hr}]}{\text{源泉の持つ有効熱量}} \times 100 \quad (3)$$



第1図 観光2号井分湯系統図

となる。即ち使用目的が浴用であるならば(3)式の分子は浴槽を適温に運転するのに必要な有効熱量となる。若し浴槽が適温以上になることは、浴槽に必要な以上の熱量を送りこんでいるため、入浴出来ない槽内温度になる。

したがってこの場合の送りこまれていた熱量は真に必要な有効熱量とは言えず、見かけ上使用されている有効熱量となる。

この事を越後湯沢温泉の送湯路線調査例をあげてのべる。路線は第1図に示す。利用施設の到着温度及びその湯量は第1表に示す値であった。

第1表より送湯路線(分湯槽を含む)よりの損失熱量を計算したものが第2表であり、その合計は 301,100 kcal/hr である。一方源泉の有効熱量は、浴槽運転温度 43°C を基準とすれば 850,500 kcal/hr であるから見かけ上の利用効率は

$$\eta' \% = \frac{850,500 - 301,100}{850,500} \times 100 = 64.6\%$$

第1表 東映観光2号井による各旅館の着湯量および温度

源泉——東映分湯槽				(出発温度 83.5°C 出発流量 約350 l/min)
	旅館名	流量 l/min	温度 °C	備考
1	湯本荘	19.8	79.5	貯湯タンク入口
2	新証クラブ	6.6	67.5	浴槽落口
3	双葉荘	10.5	78.0	貯湯タンク入口
4	音羽屋	9.5	67.7	貯湯タンク入口
5	東映分湯槽	268.0	78.5	
	合計	332.4		

東映分湯槽——共同浴場				(出発温度 76.1°C 出発流量 36.2 l/min)
	旅館名	流量 l/min	温度 °C	備考
1	対山荘	14.8	63	浴槽落口
2	石裁寮	4.3	57.7	"
3	共同浴場	12.0	55.3	"
	合計	31.1		

38年12月11日測定
外気温度 7°C

第2表 観光2号泉送湯路線よりの損失熱量

名称	出発熱量 kcal/h	到着熱量 kcal/h	損失熱量 kcal/h
源泉より東映ホテル分湯槽路線	1,750,000	1,554,000	206,000
東映ホテル分湯槽より共同浴場路線	164,000	109,900	54,100
分湯槽			41,000
合計			301,100

である。しかし利用施設の浴槽より計算される浴槽運転必要熱量は第3表に示めす如く214,360 kcal/hr であるから、真の利用効率

$$\eta(\%) = \frac{214,360}{850,500} \times 100 = 25.2\%$$

となる。実際、調査時に於いて浴槽運転必要熱量以上のものを浴槽に流入させているために槽内温度は極端に上がり、これを解消するために水でうめている状態であった。即ち熱量的に見れば源泉量の約75%は無用なところで浪費していることになる。このような実体がもとで各温泉地は過剰揚湯を余議なくさせられ涸湯現象をまねいている。

第3表 計算より算出される必要熱量

旅館名	浴槽運転必要熱量
湯本荘	8.280 kcal/hr
新証クラブ	6.670
双葉荘	17.825
音羽荘	12.305
東映ホテル	124.545
対山荘	30.360
石裁荘	5.290
共同浴場	3.795
合計	214.360 kcal/hr

これを解消する一手段として温泉水輸送技術とその方式は重要な役割をなすのである。

5. 温泉水輸送の基本式

温泉水輸送は熱量輸送であると同時に液体輸送でもあるため、基本式も熱工学と水理学の分野のものが併用される。

伝熱工学より出てくる基本式は

$$T - T_0 = (T_1 - T_0)e^{-kL/a \cdot Q \times 60} \quad (4)$$

- ここで T : 到着温度 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_1 : 出発温度 [$^{\circ}\text{C}$]
 T_0 : 外気温度 [$^{\circ}\text{C}$]
 k : 輸送管の熱貫流率 [$\text{kcal/mhr}^{\circ}\text{C}$]
 L : 輸送距離 [m]
 a : 温泉水の比熱 [$\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$] 略1である
 Q : 輸送湯量 [kg/min]

であり、水理学より利用される基本式は、Williams-Hazen の式即ち

$$v = 0.849 \cdot C \cdot R^{0.63} I^{0.54} \quad (5)$$

- ここで v : 平均流速 [m/sec]
 C : 粗度係数
 R : 径深 [m]
 I : 動水勾配

である。温泉水輸送には、(4) と (5) 式は各々独立的なものでないから、この2つの式を関連させる。

まず (4) を $kL/Q \cdot 60 \leq 0.03$ の条件 (経験的に可能である) をつけると

$$T - T_0 = (T_1 - T_0) \left(1 - \frac{kL}{Q \cdot 60} \right)$$

となり、温度降下を $\Delta T = (T_1 - T)$ とすれば

$$\Delta T = (T_1 - T_0) \left(\frac{kL}{Q \cdot 60} \right) \quad (6)$$

となる。一方 (5) 式にて $C=120$ とし、輸送管を円型で満流とすると

$$Q = 0.0258 D^{2.63} \cdot I^{0.54} \quad (7)$$

ここで D : 管口径 (mm)

又 $I = h/L$ であるから、これを (7) 式に代入すると

$$h = 8.82 \cdot 10^2 Q^{1.85} D^{-4.87} \cdot L \quad (8)$$

となる。ここで、 h : 損失水頭 [m] である。

(6), (7) 及び (8) 式より

$$\Delta T = \frac{k(T_1 - T_0) \cdot L}{1.548 \cdot D^{2.63} I^{0.54}} \quad (9)$$

又は

$$\Delta T = \frac{k \cdot (T_1 - T_0) \cdot D^{4.87} h}{5.29 \cdot 10^4 \cdot Q^{2.85}} \quad (10)$$

を得る (第 22 回温泉科学大会にて発表)。即ち、(6) 式は流速についての関係が明確でないが (9) 式は (6) 式の条件が成り立つ場合には、その流量に対して適合する管口径及動水勾配を示しており、(10) 式は輸送距離間の管内摩さつ損失水頭が h となるような流速で輸送した時に (6) 式が成り立つことを示唆している。この事は太子町菅源泉送湯路線の測定値より或程度のこと知られる。測定を行った路線は、管材として石綿セメント管、及び硬質塩化ビニール管、保温材はスチロール発泡体厚み 25 m/m で外装防水施工をしたものである。

測定した場所の管長は $\phi 75$ m/m: 274 m, $\phi 50$: 325 m, $\phi 25$ m/m: 80 m である。測定値の結果は第 4 表に示す。

第 4 表 太子町菅送湯路線測定結果

管 種	管口径	流 速	流 量	測定熱貫流率	計算熱貫流率
石綿セメント	75 m/m	0.57 m/s	147.7 l/m	0.38 kcal/mhr°C	0.44 kcal/mhr°C
	"	0.36	96	0.53	
	"	0.33	86	0.73	
石綿セメント	50 m/m	1.12	130.5	0.2	0.38
	"	0.71	85	0.32	
	"	0.64	76	0.33	
塩化ビニール	25 m/m	0.51	15	0.27	0.23
	"	0.39	11.3	0.30	
	"	0.34	10.0	0.33	

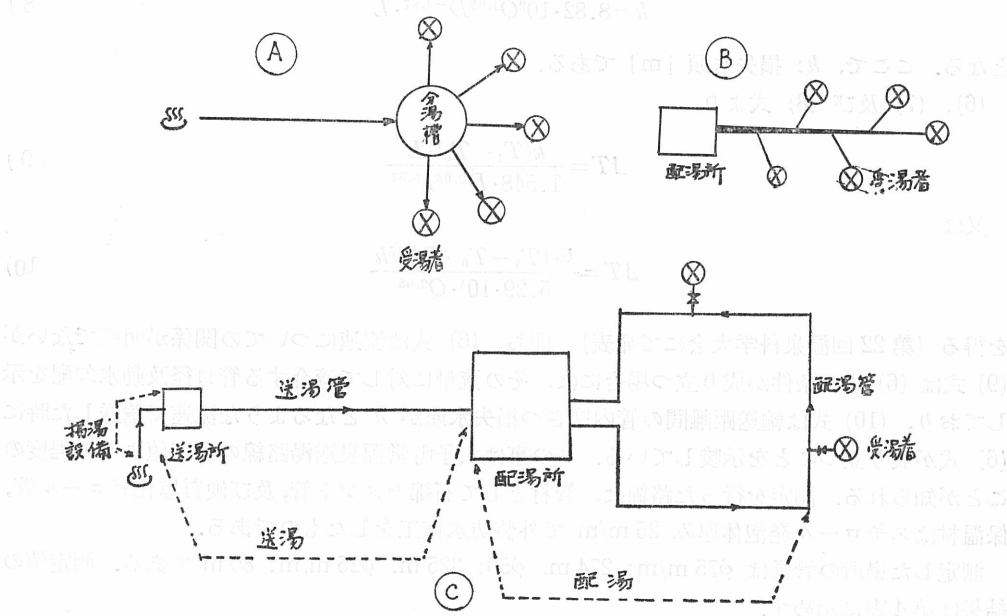
即ち測定値より求めた (4) 式の k に当るべきものが流速によって変化し、計算上より求められ

る k (熱貫流率) の値近くになるには、管口径によって異なるが、略 0.6 m/sec 以上の流速となる。この事は温泉輸送過程の放熱量は、伝熱工学のみで定まるものでなく、水理学に深く関係していることを示めている。温泉水輸送の際の k の値については、抜山、野牛、野満、瀬野、山下、湯原各氏が熱伝導論の立場より解析を加えている。又埋設管の熱貫流率 (k) の実測値を増沢氏が本学会で発表している。

次に温泉沈澱物の障害を少なくするために開渠による輸送をおこなうが、この場合の温度降下については第 24 回温泉科学大会にて発表してある。

6. 送湯及配湯

温泉水を給湯するまでの系統は通常第 2 図③のようなものとである。湧出又は揚湯された温



第 2 図 温泉水輸送のプロシート

泉水は目的地に送湯され、ここで或る配湯方式により給湯されるのである。この過程ですべて温泉水輸送となる従って温泉水輸送を技術上より見ると、源泉より或る目的地に輸送すること、即ち送湯と温泉を利用者に配ること、即ち配湯とに分けられ自ずと技術内容で違うのである。この事はあたかも水道工学中で送水と配水が技術的に違うのと同様である。

送湯、配湯を熱工学の立場より眺めれば次のようになる。

- a. 送湯とは温泉の有効熱量を経済的に成り立つ範囲で出来る限り損失のないように、目的地に送る熱量輸送である。
- b. 配湯とは温泉の有効熱量を利用者に合理的に配分する熱量輸送である。

従って送湯と配湯の技術を混同して出来た給湯設備は不合理な面が多い。その 1 例をのべる。既存温泉地へ行くと第 2 図④のようなシステムで利用者に配湯していることが多い。

即ち源泉より送湯された温泉は分湯槽で各利用者に細分され、細分された温泉を利用者が自分の施設に輸送しているのである。

これは送湯という技術のみで配湯まで行っているので不合理な点が出てくる。例えば源泉より分湯槽までは、送湯の技術を正しく用いて輸送するために温泉の有効熱量の損失は少なく、問題は起らない。分湯槽で温泉を細分化してしまうと、分湯槽から以後を送湯技術を駆使して懸命に努力しても、各利用者の到達温度は不均一になってしまう。これは、分湯量及び分湯槽から各利用者までの輸送距離が各々違うから熱工学上起らざるを得ない現象なのである。それ故利用者の立場から見ると到達した温泉の有効熱量がまちまちで同じ分湯量を受けても、同じ広さの浴槽が運転出来ない場合が生じてくる。更に恐ろしいことは、源泉の湧出量は年中一定なものに限らず時期によって変動することが多く、従って湧出量が少ない時期には利用者の到達温度が極端に低下し、時には有効熱量が零となり補熱せざるを得ないことも生ずるのである、このように送湯技術を主とした配湯方式を採った場合、大抵温泉の利用効率を下げ、それに関連して温泉地に熱量不足を起し、連鎖的に湯不足を訴えている。配湯方式が、第2図⑧の場合も同様なことが言える。既述せる越後湯沢温泉の例をみても知れる通りである。

又配湯は合理的な熱配分であるから、源泉の有効熱量、源泉の位置、配湯所の位置により、給湯地域は自ずと限界がある。これを無視すると合理的な熱配分とならない。

7. 温泉地における総合需給計画の立て方

この項目については紙面の都合上詳細なことは記述出来ないが、何らかの方法で将来報告することにして、要点をのべる。

温泉地の総合需給計画を立てる場合に温泉水輸送の比重は非常に大きく、換言すれば温泉水輸送の目的は温泉地の需給関係のバランスを採る最大の手段のためにあると言っても多言ではない。計画を立てる手順を簡条書にすれば

- ① 源泉に対する考察
- ② 利用施設の種別とその分布
- ③ 分湯方式
- ④ 必要熱量及び必要湯量の算出
- ⑤ 供給プラントの計画
 - a. 源泉分布と供給地域広さ
 - b. 供給地域と配湯所の位置
 - c. 供給プラントのフローシートの立案
 - d. 熱収支計算

となる。この手順に従って需給計画を立てた例として4)項でのべた越後湯沢温泉地についてのべる。

湯沢温泉は昭和39年頃より温泉の需給関係が極度に悪化しはじめ、昭和45年新潟県及び湯沢町の要請により需給計画を立案した。

源泉数は11井、その内2井が単純泉他は弱食塩泉である。これ等の源泉群はカルシウムをかなり含むので炭酸カルシウムを主成分とする沈澱物を生成する恐れがあるので、飽和指数で判定したところ、指数はいずれも負数で同沈澱物は生成しがたいと判定した。

昭和45年7月の調査報告によると11源泉の総湧出量は2,416l/minでその平均泉温は約59°Cである。温泉の利用はすべて浴用であり浴槽運転温度を43°C(冬期)としてその有効熱量を求めると2,375,300 kcal/hrと成る。一方利用施設は、旅館及び保養所: 60戸, 民宿: 17戸, 一般住宅: 37戸で、その浴槽面積は927.81 m²で浴槽容積は573.82 m³であった。この全浴槽を運転するに必要な熱量を計算すると1,067,100 kcal/hrとなる。従って差引き1,308,200 kcal/hrの余剰となる。それ故、供給プラントを計画する際に利用効率を80%程度とするにしても1,041,400 kcal/hrの余剰となり、熱量から見ると源泉を全部揚湯することなく、その56%の量でよい。又必要湯量を次の条件で計算すると1351.3 l/minとなり、総湧出量の2416 l/minの56%との湯量でよい。条件: ① 利用施設の浴槽は全日運転とする。② 上り湯は1名当たり1日15lとする。③ 注湯温度は冬期57°Cとする。

即ち、熱量も湯量も現在(昭和45年7月)の揚湯量の56%以下で充分ということになる。又供給地域の面積は約800 haで地域内の標高差は約56 mである。利用者の分布はこの様な広い地域に点在し、源泉の位置も一部を除いては点在している。この様なことを踏まえて、しかも、温泉地特有の問題、源泉井の性格等を考慮に入れて合理的な供給プラントのフローシートを立案し、その熱収支計算がさきの56%揚湯量ですむかどうかを検討した。この熱収支計算のバランスが取れば、温泉の需給計画が成りたつわけである。この様な手順を踏んだ結果湯沢温泉は、45年7月現在の11源泉の揚湯熱量の56%あれば需給関係のバランスはとれ、利用者に安定した温泉輸送が出来ることを認めた。

8. ま と め

温泉輸送は学術上、技術上から眺めると未だ初期の段階であり、基本的問題すらも未解決である。例えば、ごく一部をのべれば、その実体が知れよう。即ち、

- ① 輸送管及びその附帯器材に動的な熱応力がかかった場合の物性の変化
- ② 埋設輸送管の伸縮状態
- ③ 輸送管の温泉沈澱物による内面粗度係数の変化
- ④ 輸送管内流速と熱貫流率の関係
- ⑤ 輸送管内流速と管内面の摩擦状態
- ⑥ 埋設輸送管用保温材並びに外装防水材の物性変化
- ⑦ 金属材料と温泉沈澱物の附着度合
- ⑧ 温泉水中の金属材料の熱電池作用
- ⑨ 温泉沈澱物対策(特に微生物及び珪酸質のもの)

等の問題などがあげられるが、どれをみても基本的な事柄ばかりである。それ故、現今の如きエネルギー資源の問題が多く論議されている折、温泉も一つの熱エネルギー源と考えるならば、温泉輸送の基本的問題の学問的解明を急がねば、かえって熱源としての温泉輸送を行ったこと自体が地域社会に汚点を残さないとも限らない。