

温 泉 ・ 温 度 差 発 電

(第1報：小浜温泉の現地試験結果)

栗 須 正 登* ・ 田 中 清 裕* 児 玉 好 雄*
東 克 彦** ・ 高 橋 賢 一 郎** ・ 植 木 弘 信***

Thermal Energy Conversion between Hot Spring and Sea Water

(I: A Field Experimental Results in Obama)

by

Masato KURISU*, Kiyohiro TANAKA*, Yoshio KODAMA*
Kathuhiko HIGASHI**, Ken-ichiro TAKAHASHI**
and Hironobu UEKI***

Recently people have been very much concerned about utilizing for the local energy such as OTEC. It is found in Western Japan Sea that the highest temperature difference is about 25°C between Temperature of the surface water (about 27°C) and cold water (about 2°C) in the shallow bottom in summer⁹⁾. As the temperature difference is small in OTEC, the larger plant have been to make up for the large output. If the temperature difference is high, this plant can be to make up smaller. There are the hot spring (about 96°C) and the surface sea water (about 18°C) in Obama. It is meaning that this area being utilized for that energy is suitable. The research project have been performed the experiment of energy plant on utilizing the high temperature difference to generate the electricity.

1. はじめに

筆者らは、プロジェクトを作り海洋温度差エネルギーの利用の研究を進めている。日本海島根沖^(1~8)の海岸より38kmの海域では、夏場の表層水の温度⁽⁸⁾は27°Cで、また、水深180m(現在のところ世界中で一番浅い水深)の海底には、多量の冷水が存在し、表層までポンプアップしても2°C⁽⁶⁾の冷海水が得られる。

プロジェクトは、日本海島根沖で1980年7~8月には、この海域の温度差を利用の海水淡水化基礎実験^(1~3)に成功し、また、1982年9月には同海域で温度差発電の基礎実験^(9~11)で2kwの発電に成功した。



Fig. 1 Front View of the Test Equipment

昭和59年4月28日受理

*機械工学移 (Department of Mechanical Engineering)

**電気工学科 (Department of Electrical Engineering)

***機械工学第二学科 (Department of Mechanical Engineering II)

海洋温度差発電の技術は大幅に進歩しつつあるが、発電コストを石炭や石油発電と同程度に安価にするには、現状では洋上大型プラント（例えば、北海油田程度の大型プラント）にしないと経済性が出てこない。発電コストを軽減する方法として、海岸の近くの温泉水と海水の温度差が海洋より大きいことに着目して、今回（1983年12月）温泉・温度差発電を行ない成功した。

実験場所は長崎県南高来郡小浜町町営温泉プール前の駐車場を、実験中の温泉水も町営温泉プールを一時流用させてもらった。

小浜温泉発電に使用した実験装置の主要部は日本海・島根沖の洋上発電に使用したものをそのまま使用した。同じ装置を用いたが、温泉発電の方が温度差が大きいため、洋上発電では、2kwのものが温泉では5kwの出力に増加した。

Fig. 1は、小浜温泉で現地発電中の実験装置の前面

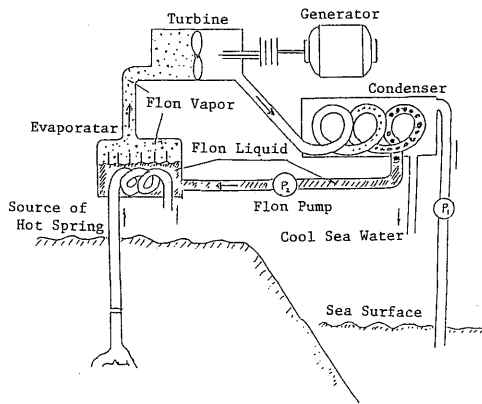


Fig. 2 Power from Hot Spring

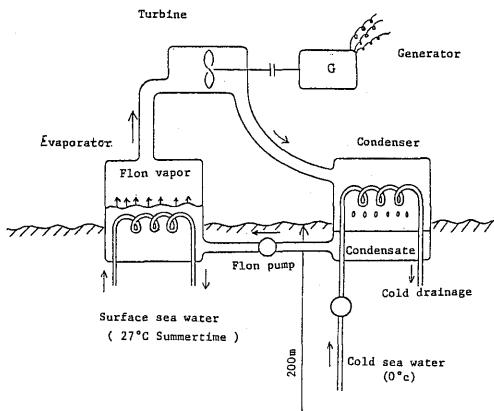


Fig. 3 Principle of Electric Generation by OTEC

写真である。また、Fig. 2に温泉発電の原理を示した。

同図を用いて原理を説明するが、泉源より温泉水を蒸発器に導く。蒸発器内には、熱媒体としてフロン114が封入されており、温泉水で加温されてここでフロンガスとなり、その圧力は11 (kg/cm², 絶対圧)に上昇する。フロンガスはフロンタービンへ導かれ、タービンを回転させて、これと直結された発電機を回わして発電する。フロンタービンを出たガスは、凝縮器へ導かれるが、この海水で冷却されて、フロンガスは液化する。凝縮器の圧力は0.5 (kg/cm², 絶対圧)と減小する。ここで、蒸発器と凝縮器の両者の圧力差10.5 (kg/cm²)でタービンは回転するが圧力差(温度差)が大きい程、タービンの出力は増大する。凝縮器内で液化したフロンは、フロンポンプで蒸発器内へ圧送されてサイクルは循環する。

Fig. 3は、比較のため海洋温度差発電の原理を示した。Fig. 3の原理で小容量発電を行なう場合の最大の技術的難点は、確かに発電は出来るが内部消費動力が大きいことである。内部消費動力の中で大きいのは、冷海水、温海水およびフロンポンプに消費される動力で、その他は極めて小さい。

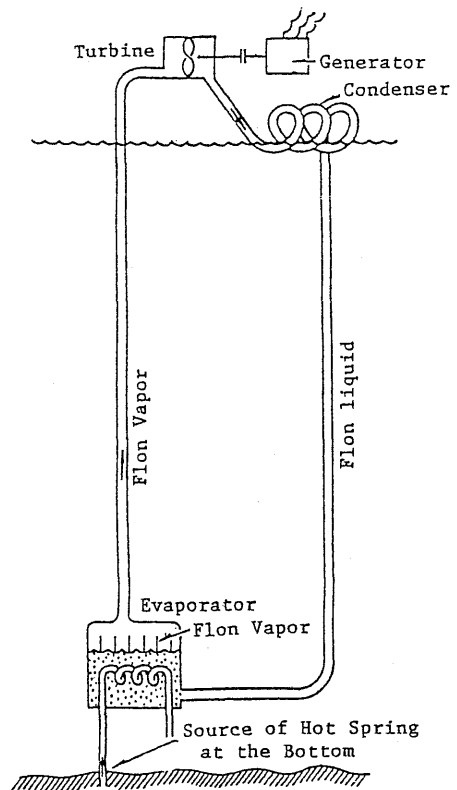


Fig. 4 Power from Hot Spring at the Bottom

Fig. 4 は、海底温泉発電の原理を示したが、海面に凝縮器を置くので、冷却水ポンプも不要になる。最後のフロンポンプを省略するため、蒸発器は海底におい



Fig. 5 Source of Hot Spring which is Self Blowing Out

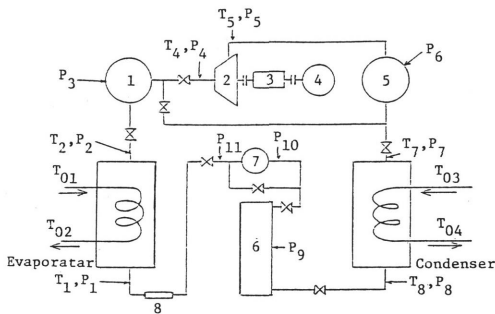


Fig. 6 Block Diagram of System

て、蒸発器と凝縮器の自然落差をハイドロ・スタティックに利用することが本研究の原理上の特色である。

Fig. 5 は、自噴する泉源の湯量と蒸気量を実測中の写真である。Fig. 2 と Fig 3 と比較すれば容易に解るように、自噴する泉源より温水を採るときは、温水ポンプは不要となる。

Fig. 6 は、Fig. 2 に示した温泉発電の詳細システム図であり、また、Table 1 は Fig. 6 の使用した記号の説明である。

2. 研究設備の仕様とその構造上の特徴

2. 1 冷海水ポンプアップ設備

揚水ポンプ：6"×60m, 60m³/H

2. 2 熱交換器（管群方式）

(a) 凝縮器

特種パイプ φ22×4m×100本=400m

冷海水流量 67.8m³/H

=1.13m³/min

(b) 蒸発器

特種パイプ φ22×4m×100本=400m

2. 3 フロン・タービン

型式 スクリュー膨張式

容量 10KW

回転数 3000-4000rpm

タービン熱落差 1.54kcal/kg

フロン流量（重量）100kg/min

2. 4 7.5KVA 発電機

仕様 220 V 19.8 A

1500~3600 rpm

(max.4000 rpm)

Table. 1 Illustration of Symbols

1-気液分離器	T1 -蒸発器入口温度	P1 -蒸発器入口圧力
2-タービン (スクリュー膨張機)	T2 -蒸発器出口温度	P2 -蒸発器出口圧力
3-トルクメータ	T4 -タービン入口温度	P3 -気液分離器圧力
4-発電機	T5 -タービン出口温度	P4 -タービン入口圧力
5-油分離器	T7 -凝縮器入口温度	P5 -タービン出口圧力
6-受液タンク	T8 -凝縮器出口温度	P6 -油分離器圧力
7-フロンポンプ (ギヤ・ポンプ)	T01-温水入口温度	P7 -凝縮器入口圧力
8-検流計	T02-温水出口温度	P8 -凝縮器出口圧力
	T03-冷水入口温度	P9 -受液タンク圧力
	T04-冷水出口温度	P10-フロンポンプ入口圧力
		P11-フロンポンプ出口圧力

研究設備の主な仕様は上述の通りであるが、小容量で安価な温度差発電を最大の目的としているため、以下述べるような構造上の特徴を有する。

Fig. 7には、凝縮器の写真を示したが、これと蒸発器の熱交換には、冷房に開発されたφ22の特種パイプを $4\text{m} \times 100 = 400\text{m}$ を200本用いた。これらを、それぞれ100本の管群方式としたため、熱交換器の大幅な重量軽減と性能アップが可能となった。

フロンタービンにはスクリー空気圧縮器（工事用

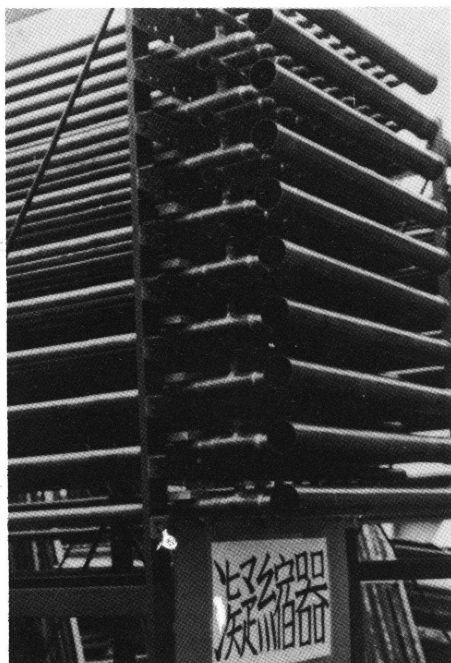


Fig. 7 Condenser

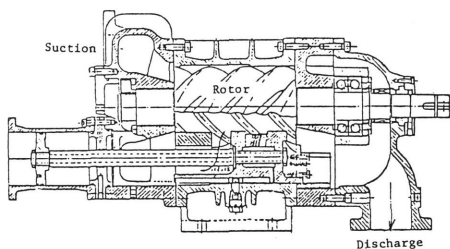


Fig. 8 Flon Turbine

エア・マン Fig. 8, 参照)を逆にしたスクリー膨張機を用いた。プロジェクトでは、当初ゼット機に用いられるガスタービン（遠心式タービン）の小型のもので実験を行なった。その結果、性能は良いことが確認出来たが、問題は回転数であり、小型のため10~20万回の高速となり、これにつなぐ発電機にこのような高速のものは現状では見当らなかった。スクリー膨張機は、3000~4000 rpm でこれと直結する発電機と同じで好都合であった。発電機には、7.5 kwの市販の漁船用のものを直結して用いた。Fig. 9は、フロンガスタービンとこれに続いた発電機の写真である。冷海水の吸み上げには、海水用の水中ポンプを用いた。Fig.10は、海中ポンプの据え付け状況である。

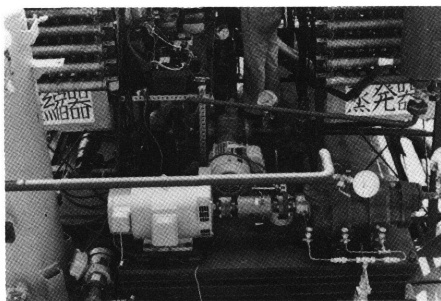


Fig. 9 Flon Turbine and Generator



Fig. 10 A Pump for Sea Water Use

3. 実験に用いた泉源

前述したように実験には、小浜町営温泉プールに実用されている温泉水を一時流用させていただいた。この温泉用の泉源は、φ100の鉄パイプを約150m地下に打ち込んだもので、これより、毎分300 (300l/m)の温泉が噴出する。実験には300 (l/m)の中の90 (l/m)を使用した。

泉源よりの温泉は、まづ、Fig.11のフラッシュ室に入れられる。フラッシュ室の役目は源泉水中のスケールを落とすためである。湯温はフラッシュ室で96℃であったが、蒸発器中の入口では93℃に低下した。(フラッシュ室で96℃であるので、泉源出口は100℃に近いものと推定される。小浜温泉は湯温も高く、湯量も多いので温泉発電としては極めて有利な温泉地域である)。

実験中、湯量も湯温も全く安定しており、このような意味において温泉発電の高熱源は極めて都合の良いものと言える。

4. 実験結果

第2報⁽¹²⁾には、タービン性能の詳細を述べた。また、前報^(6~11)には、揚水ポンプや熱交換器性能について詳述している。したがって、この報告では小浜温泉発電実験結果の概括的のものにとどめる。

Fig.12は、横軸に温水和冷水との温度差を取り、縦軸に発電機出力を示した。同図には、小浜温泉にお

る現地実験の外に、長崎大学内で行なった予備実験も合せて載せた。最終的には、R114を用いたが、その前にR12およびR11の実験を行なった。この間の経過について、次のFig.13を用いて説明する。

前にも述べたが、今回の実験装置は1982年に日本海洋上発電に使用したものと全く同じものを用いた。海洋上発電では海水の温度が27~2℃の範囲であるため、R12を用いた。そのため、確認の意味でR12の学内実験を行なった。海洋上発電では温度が低いので、圧力が上らないので、この実験装置は耐圧10 (kg/cm²)で製作した。Fig.13で明らかのように温度が40℃近くで圧力が10 (kg/cm²)に達してこれ以上の実験を行なうことが出来なかった。その次に、R11を用いたがこれは、温泉の温度90℃の制限にかかり、出力が3kw程度が最大値となった。圧力 (10kg/cm²)と温度90℃の制限の元で最良のものはR114であり、これによって最大5kwの発電が出来た。なお、フロンタービンを運転する圧力と温度によって、最適のフロンの種類があり、この関係に非常に重要なので次の第2報⁽¹²⁾で詳細に述べている。

Table 2に、発電機出力のデータの一覧を示した。Table 3は、Table 2と同じ実験時のシステム各部の温度を載せた。Table 4は、各種の効率を示した。

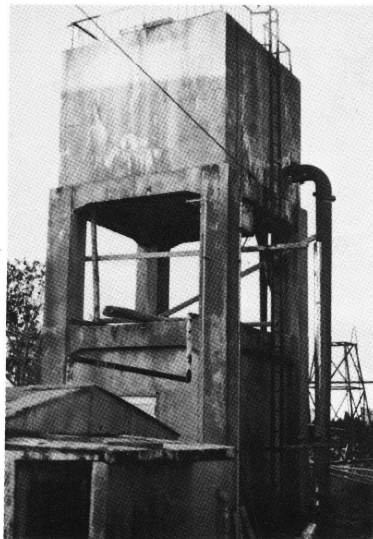


Fig. 11 Flashing Chamber

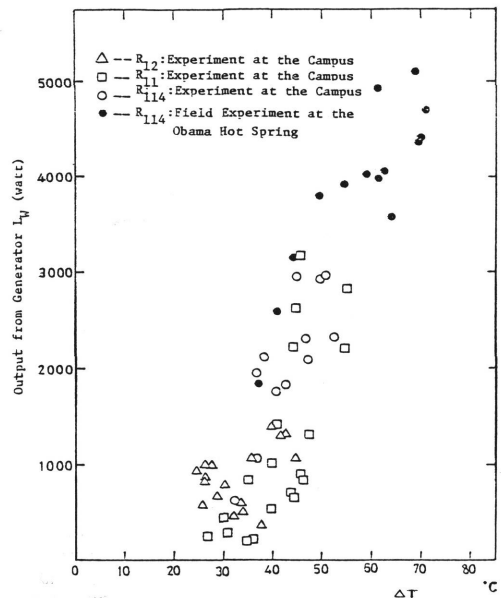


Fig. 12 I_g — ΔT Diagram

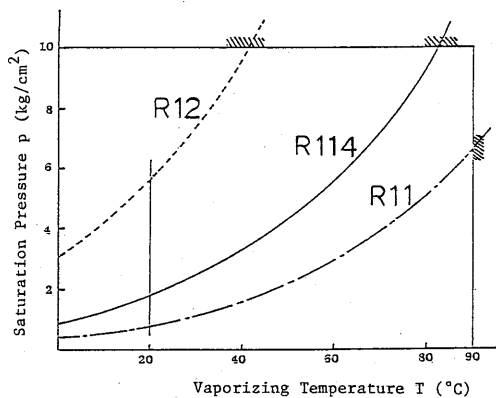


Fig. 13 p—T Diagram

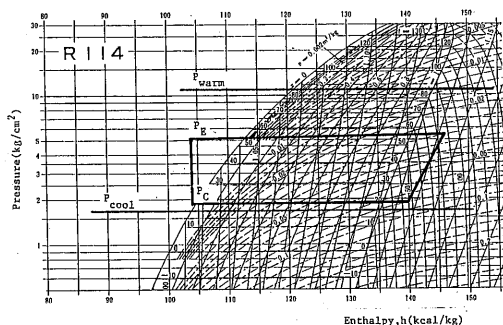


Fig. 14 A Example of Mollier Diagram

Table 2 Output from Generator

DATE(No)	Lw (Watt)	π	$\pi \cdot P_4$	$\pi \cdot P_4 \cdot N$
8/ 5(1)	1272	1.298	13.112	18881.1
8/ 8(2)	1340	1.282	12.945	14757.8
11/ 9(3)	2260	1.912	6.694	10041.0
11/11(4)	1288	1.721	5.422	6506.6
(7)	840	1.826	5.934	3916.4
11/16(2)	3040	1.920	7.920	14256.6
11/21(4)	1912	1.579	5.684	6480.0
12/16(1)	3720	1.954	9.085	17443.4
(2)	4400	1.899	9.306	20101.4
(3)	4280	1.899	9.306	18984.6
(4)	4040	1.895	8.907	18705.2
(5)	3960	1.895	8.907	18170.8
(6)	3800	1.895	8.907	17636.4
(7)	3080	1.891	8.508	15315.1
(8)	2616	1.881	7.711	12029.2
(9)	1820	1.919	7.293	9189.1
12/17(2)	5030	1.903	9.705	23292.5

Note : L_w, π , $\pi \cdot P$, $\pi \cdot P \cdot N$, See the 2nd report⁽¹²⁾

Over All Eff. で最大は3.73%で、このときのカルノー効率率は20%である。また、タービン効率は60~70%程度である。なお、冷却水およびフロン循環ポンプの消費損失については前報^(9,11)に述べている。

5. 実験結果の検討

海洋温度差発電用として試作した実験装置を、そのまま温度差の大きい温泉発電に使用した。そのため、実験結果を検討してその結果以下のような反省が必要となることが判明した。

Table 3は、システムの各部の温度を示しているが、例えば、To1と To2は蒸発器の入口と出口の温泉水の温度差であるが、最大でも3℃で、小さいときは1℃弱であり、温泉水の熱エネルギーを十分に利用していない。海洋温度差発電では、精々20℃位の温度差なので、極力この温度差を小さくすることが絶対的の要求であるが、温泉発電では、温水のエネルギーを充分活用するように蒸発器の設計を変更する必要がある。

海洋温度差発電では、海水の温度が高くても27℃で、フロンの圧力が上昇しないので、耐圧10 (kg/cm²)の実験装置で十分であったが、温泉発電では、温度が高いため、フロンの圧力が上がり、耐圧のため制限を受けた。この実験では、R114を用いたが、これが最適の作動物質でない。このことについては、第2報⁽¹²⁾で詳述している。したがって、温泉の温度に最適のフロンを選定し、それに耐え得る圧力の装置で実験を行なうべきである。

Fig.13は、実験結果のモリエル線図の一例である。同図の Pwarm (=10.5kg/cm²)は温泉水の温度に相当するフロン114のガス圧力であり、Pcool (=1.6 kg/m²は冷海水温に相当するガス圧力)である。また、PE (=5.02kg/cm²)は蒸発器内の圧力で、Pc (=1.9kg/cm²)は凝縮器内の圧力である。

ここで問題は、フロンガスの要求する圧力比 Pwarm/Pcool=6.6と、運転圧力比 (Pe/Pc=2.6, これは、スクリュウ膨張機設計圧力比より決る、詳細は第2報⁽¹²⁾, 参照) がマッチしていないことである。すなわち、フロンガスは高い圧力比を要求しているのに、スクリュウ膨張機がこれを消化出来ない条件になっている。タービンの出力は、運転圧力比に近似的比例すると考えて良いので、この装置の外のものそのままでも、タービンの圧力比をガス圧力比に一致させることにより、6.6/2.6=2.5倍の出力増加が期待出来る。

Table 3 Temperatures at the Important Points of the System

DATE(No)	T1	T2	T4	T5	T7	T8	T01	T02	T03	T04	T	T
8/ 5(1)	27.35	61.65	59.16	44.67	41.68	25.29	63.39	61.02	24.36	25.00	63.06	24.19
8/ 8(2)	27.95	65.28	63.32	44.89	41.16	25.78	67.04	64.94	24.87	25.65	66.71	25.07
11/ 9(3)	22.24	63.25	59.02	36.66	34.56	18.53	65.48	64.15	18.49	19.10	65.43	11.71
11/11(4)	19.39	58.39	55.02	36.52	34.05	17.97	60.45	59.65	18.12	18.66	60.40	13.67
(7)	20.13	57.40	55.77	35.03	33.56	17.82	59.09	58.17	18.17	18.61	59.02	13.97
11/16(2)	18.94	61.71	59.17	37.48	34.01	18.03	63.26	61.71	17.39	18.15	63.24	14.13
11/21(4)	20.43	45.77	45.07	32.49	31.49	18.07	47.70	46.82	18.20	18.81	47.67	11.69
12/16(1)	15.90	86.40	83.99	53.55	44.72	17.40	89.04	87.36	16.56	18.68	87.93	/
(2)	17.28	84.91	83.75	56.70	51.80	17.74	86.76	85.08	16.59	18.97	85.53	/
(3)	18.09	78.84	78.27	59.93	54.42	17.52	80.02	78.32	16.54	18.95	78.80	/
(4)	18.41	74.70	74.34	58.89	53.89	18.97	75.95	74.27	16.51	18.85	75.09	/
(5)	18.21	70.16	69.80	56.22	51.65	17.47	71.15	69.39	16.49	18.85	70.50	/
(6)	18.43	64.65	64.41	52.43	48.96	17.77	65.96	64.46	16.51	18.77	65.40	/
(7)	18.41	57.12	55.91	45.55	43.07	17.72	60.56	59.09	16.52	18.66	60.01	/
(8)	19.76	53.87	53.14	43.36	40.90	17.33	56.98	55.64	16.52	18.34	56.76	/
(9)	19.64	50.03	50.25	41.41	38.93	16.99	53.12	52.17	16.49	17.97	52.97	/
12/17(2)	17.70	76.31	74.81	49.60	38.29	19.64	77.94	75.87	16.10	22.51	77.20	/

Note : T₁~T₈, T₀₁~T₀₄, See Table 1

Table 4 Efficiencies

DATE(No)	η_c	η_{all}	η_{th}	η_s	η_L	η_T
8/ 5(1)	11.6	1.10	12.63	6.48	70.0	24.2
8/ 8(2)	12.4	1.02	11.16	3.82	52.4	51.2
11/ 9(3)	13.9	2.29	6.57	7.16	70.8	47.3
11/11(4)	12.7	1.95	11.48	4.38	80.7	55.4
(7)	12.3	1.41	11.69	5.65	75.2	33.2
11/16(2)	13.6	3.26	13.01	10.42	87.8	35.6
11/21(4)	9.2	1.44	12.93	5.46	83.4	31.5
12/16(1)	20.0	3.15	16.20	15.28	76.4	27.0
(2)	19.5	3.73	16.20	11.63	80.3	40.0
(3)	18.0	3.38	14.63	8.31	74.6	54.4
(4)	17.0	3.45	14.22	7.21	73.2	65.4
(5)	15.9	3.18	12.99	5.99	72.5	73.2
(6)	14.6	3.62	11.76	4.59	68.6	70.0
(7)	13.2	3.08	11.71	4.19	68.9	65.7
(8)	12.3	2.75	10.95	3.94	64.3	80.3
(9)	11.2	2.76	10.36	3.82	74.8	96.3
12/17(2)	17.6	3.42	11.53	13.62	63.5	39.5

Note :

- η_c : Carnot's Eff.
- η_{all} : Over All Eff.
- η_{th} : Rankine's Theoretical Eff.
- η_L : Actual Thermal Eff.
- η_T : Piping Eff.
- η_T : Turbine Eff.

6. 結 言

筆者らはプロジェクトを作り、海洋温度差発電の研究を進めてきたが、発電コストを安くするための一手段として、温泉水と海水の温度差を利用した温泉発電の実験を行なった。

実験場所は長崎県南高来郡の小浜温泉の町営温泉プールを使用させていただいた。実験を実施したのは1983年12月1日からの約3週間で、実験装置は、1982年9月に日本海・島根沖で洋上発電実験に用いたものと全く同じものである、その結果次のような結論が得られた。

- a) 洋上実験と温泉発電では、全く同じ装置を用いたが、温泉発電の方が温度差が大きいため、日本海の洋上で得られた発電出力は2kwであったが小浜温泉では5kwの出力が得られた。
- b) 自噴する温泉では、温水ポンプが省略出来る。
- c) 泉源より自噴する温水は、湯量および湯温も安定しており、温度差発電の高熱源としては極めて良質の熱源である。
- d) 海洋温度差発電の実験装置をそのまま温泉温度差発電に利用したが、
 - i) 熱交換器の容量が大き過ぎて、温水の熱エネルギーを十分に活用出来なかった。温水の熱エネルギーの活用留意した熱交換器の設計をすべきである。
 - ii) 海洋温度差発電では、温度が低いので、フロンガ

スの圧力が余り上昇しないが、温泉発電では、温度が高いためガス圧が高くなる。本実験では、これをカバーするため、R114を用いたが、温度差に最適のフロンを選定し、そのガス圧に十分耐え得る発電装置とすべきである。

iii) 小容量温度差発電の発電単価を軽減する手段として、スクリュウ膨張機をフロンタービンとして利用することは、発電機との回転数のマッチングの点で極めて有効である。

iv) 温度差によって、フロンガス圧力比が決まり、また、スクリュウ膨張機にも、設計により決定する圧力比がある。両者の圧力比が一致しないと総合運転効率が低下する。

終りにのぞみ本実験の実施に当っては各方面の御支援をいただいた。長崎県南高来郡小浜町の草野町長以下関係各位御好意ある御配慮を賜った。ここに記して謝辞にかえる。また、長崎県、衛生研究所の各位にも小浜温泉に関する資料を提出していただいた。九州大学島原火山観測所の太田所長には、長年月にわたっての小浜温泉に関する専門知識を御教示いただいた。プロジェクトのスタッフは実験やデータ整理について御協力を受けた。スタッフは多数におよぶので名前を上げることは出来ないが、各位に対して、それぞれ厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 栗須;工業材料, 28-7, (昭.55-7), p12
- 2) 栗須;OHM, 67-11, (昭.55-11), p106
- 3) 栗須, 工業材料, 29-1, (昭.56-1), p44
- 4) 栗須, 他4名;長崎大学工学部研究報告, 16, (昭.56-1), p19
- 5) 栗須, 他3名;機講論, No.813-4, (昭.56-7), p123
- 6) 栗須, 他5名;長崎大学工学部研究報告, 17, (昭.56-7), p9
- 7) 栗須, 他2名;長崎大学工学部研究報告, 17, (昭.56-7), p17
- 8) 東, 他2名;長崎大学工学部研究報告, 17, (昭.56-7), p29
- 9) 栗須, 他2名;機講論, No.835-4, (昭.58-11), p207
- 10) 山口, 他3名;長崎大学工学部研究報告, 21, (昭.58-8), p115
- 11) 田中, 他4名;長崎大学工学部研究報告, 22, (昭.59-1), p7
- 12) 植木, 他2名;長崎大学工学部研究報告, 23, (昭.59-7), p107
- 13) 栗須, 他2名;長崎大学工学部研究報告, 23, (昭.59-7), p114