

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656135

研究課題名(和文)低温廃熱起因水銀自然対流による液タービン駆動発電技術の開発

研究課題名(英文)Development of liquid-turbine power generator due to convective flow of mercury induced by low-temperature waste heats

研究代表者

出口 清一 (Deguchi, Seiichi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・講師

研究者番号：50283411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：低温廃熱(100℃)の回生(発電)方法として、液対流によるタービン駆動発電を提案し、本研究にて理論的検証・設計・試作・実証を行った。

高い運動エネルギーを得る為、当初、作動媒体として超高比重の「水銀」利用を想定した。理論計算から、低温域では「水銀」の対流速度が低く十分な運動エネルギーが得られない事が分かり、相変化(液体→気体)による強制対流を利用を提案した。低沸点・高比重な液体として「NOVEC」を探し、その特長の一つ「水に不溶」を活用した「NOVEC/水」の二分離液媒を創出した。設計・試作の装置により、この「NOVEC/水」を作動媒体とした超低温(-80℃)液タービン駆動発電に成功した。

研究成果の概要(英文)：As a new energy harvesting system from waste heats below 100 degreeC, liquid-turbine power generator had been proposed due to liquid convective flow. In this work, theoretical feasibility study to check the proposal, manufacture of prototype apparatus and demonstrations were done.

Firstly, mercury was considered the most promising medium for the proposed power generator since it has the heaviest relative density among any liquids under room temperature, expecting the higher momentum. However, it had been clarified from theoretical calculations that the convective flow rates were relatively low, and then efficient momentum could not be obtained if mercury had been utilized. To adopt enforced flow due to phase changes of medium to the proposed power generator, surveying any liquids reached NOVEC with a low boiling temperature, higher density and insolubility to water. Finally, power generation could be achieved with using NOVEC/water biphasic medium according to assumed processes.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：エネルギー創生 廃熱発電 液タービン 相変化 強制流

1. 研究開始当初の背景

2011.3.11 の東日本大震災をトリガーとする『福島第一原発事故』が国際的な脱/減原発を誘引し、其の燃料である『ウラン』の消失から『代替エネルギー創出』は更に急務と成った。また、ライフライン寸断で『分散型電源の機能停止』が露呈され、『電力依存』の現代社会が故に『電力安定供給に対する不安』が深く民生に刻まれた。

活断層・南海トラフなど大地震の元凶を多く有す日本は、上記の悪しき教訓を活かし、其の準備として『安心・安定・安全・持続可能な電力(電源)』の確保(創造・開発)を早急に進める必要が有る。

2. 研究の目的

本研究では、『安心・安定・安全・持続可能な発電方法(電源)』の創造・開発を目的とした。形容詞として並べた『安心・安定・安全・持続可能』を担保する為、本研究の『制約条件』を『100 以下で稼働・ライフラインに非依存・メンテナンスフリー・迅速稼働』とした。

100 以下の熱は、熱力学的には『採算性ある発電のエネルギー源』とは考え難く、多くは『廃』として環境に放出されている。有効利用の事例は、『吸着/吸収式ヒートポンプの脱着/脱水・給湯』など限定的である。

一方、廃熱(<100)からの『実用的エネルギー回生』が可能と成れば、『熱力学の原理・原則の打破』なる学術的妙味に限らず、全ての一次エネルギーの燃料価値は『低位発熱量から高位発熱量』で再計算され、『エネルギー賦存量を向上(10%程度)』できる。つまり、脱/減原発から消失方向にある『ウラン』の可採年数分の補完が、本研究の最重要意義である。

3. 研究の方法

試作した実験装置について、其の概略を図1に、液タービン部の詳細を図2に示す。

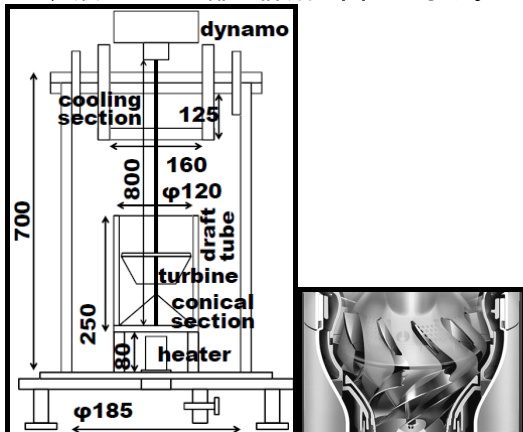


図1 実験装置図

図2 液タービン詳細

提案した『低温廃熱による液タービン駆動発電』の心臓部である『液タービン』は、(株)ターボブレードによる設計の費用捻出が困難で有った為、『羽なし扇風機(dyson 社)のタービン(図2)』を流用した。尚、dyson 社より、

上記に関し事前に了承を得た。

本実験装置の『外筒・整流用ドラフトチューブ(其の支持体)・液流集積用円錐部』は、『作動媒体の相変化/流動状態に加え液タービンとの相互作用』などを観察する為、全て『透明アクリル製』とした。熱伝導性に劣るアクリルを用いた為、実験装置は『完全断熱系に漸近』した。後述の『冷却部』附帯は、断熱に長けるシステムが故に不可欠と成った『エントロピー排出』の機構である。実機・マーケット展開の際には、可視化を必須要件から除外でき、例えば『外筒を高熱伝導性の銅など金属製』とする事で十分に除熱可能である。つまり、『廃熱のみで稼働・non-specials・low-technologies-integration』と形容できる『提案の液タービン駆動発電』は、『究極の創エネルギー技術』としてグローバルスタンダード化のポテンシャル保有と考える。

装置底には『ヒーター』を配し、其の表面温度は『60~120 (PID制御)』で任意設定可能とした。尚、『液タービン・作動媒体の選定に難航』し『装置試作が遅延』した為、『ヒーター表面温度 80 一定』にて実験を進めた。

装置上部には『鋼製中空管』を配し、内部に冷水(5~25)を流せる様にした。上述の通り、実機に於いては『排除可能』である。

その他、『ドラフトチューブ』は伸縮可能、『円錐部』は着脱可能、装置底部に『ダミーファイラー(粘土)』を設置可能とした。

尚、研究の進捗から『当初予定から変更』があり、実験方法については後述する。

4. 研究成果

理論 FS

実験装置試作に先駆け、『装置容積(φ185mm×700mm)のみ確定』し、『筑波大学図書館情報メディア系・助教・藤澤誠先生』の御指導の下、『水銀と水』の自然対流をシミュレートした[体積保存性を考慮した核沸騰シミュレーション、画像電子学会誌、38(4)、pp.441-448(2009)]。ヒーター表面温度 80 ・冷却部温度 5 ・定常の結果を以下に示す。

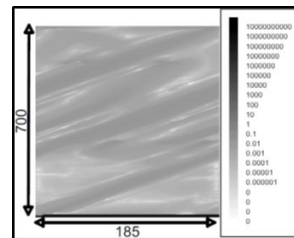


図3 運動エネルギー分布(水銀)

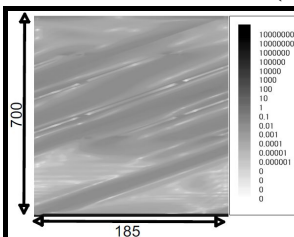


図4 運動エネルギー分布(水)

図 3・4 より、加熱部近傍(装置最下部)で高運動エネルギーに対し、『液タービンの想定設置部では液流皆無』が明らかと成った。従って、『作動媒体の再選定』『液タービン駆動機構の再考・創出』が不可欠と成った。

作動媒体の再選定

理論 FS から、『水銀・水』の自然対流による液タービン駆動は悲観的と結論付けられた。Team EXIT が開発研究を進める『水素創生・熱電発電・圧電発電』を総鑑し、『熱電発電(熱電発電装置・特開 2013-157437)』で用いた『NOVEC(住友 3M 社)』の適用を着想した。

下表に、『NOVEC の物性値』を『水』と対比しつつ示す。

表 1 NOVEC・水の物性値(特徴)

	NOVEC	水
沸点	34	100
蒸発潜熱	142 kJ/kg	2263 kJ/kg
比重	1.4	> 1
比熱	1.3 kJ/(kg・K)	4.2 kJ/(kg・K)
熱伝導度	0.075 W/(m・K)	0.61 W/(m・K)
特徴	互いに不溶	

上表より明らかな通り、『NOVEC』は非常にユニークな液体であり、特に『低沸点・低蒸発潜熱・低比熱』から容易に相変化(液 気)し、『高比重・非水溶性』から図 5 の通り『下層(NOVEC)/上層(水)の biphasic medium』と成る。

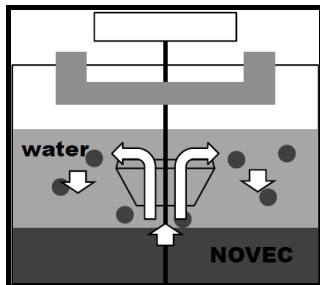


図 5 液タービン駆動機構

創出した biphasic medium(NOVEC/水)による『新たな液タービン駆動機構』の詳細を、上図と照らしつつ下表に示す。

表 2 液タービン駆動機構の詳細

step	事象
①	液体 NOVEC が廃熱により蒸気化
②	NOVEC 蒸気泡が上昇 其のウエークに液体 NOVEC/水を同伴
③	同伴 NOVEC/水が液タービンを駆動
④	NOVEC 蒸気が上層の水と熱交換し液化
⑤	NOVEC 液滴が沈降
⑥	水が系外と熱交換

此処で、表 1 に示した通り、『水の伝熱は NOVEC に比し高速』であり、所謂、『NOVEC の特長』と『水の特長』の相乗(シナジー)が『新たな液タービン駆動機構』である。

実験方法

実験手順とデータ処理について、下表にまとめる。

表 3 実験方法

実験	(一)	所定量の NOVEC/水を導入
	(二)	ヒーターに通電
	(三)	冷水(5~25)の循環開始
	(四)	発電(電圧)を測定
	(五)	データログ(120min 間継続)
処理	(六)	交流電源(60Hz)起因のノイズ除去
	(七)	実効値(root mean square)の算出

尚、全実験に於いて、60min 経過後には『実効値が定常』と成った。以下に示す実験結果は、全て『この定常実効値』を用いる。

冷水温度の影響

『ヒーター表面温度は 80 一定』より、熱力学的には『冷水温度低下は出力(発電量)向上に有利』とできる。また、通常、開放系熱機関による仕事は、『エンタルピー差(つまり温度差)』で机上計算される。

上記に反し、本システムでは『冷水温度低下で出力は低下』した。開放系熱機関の仕事量導出過程に於いて『運動エネルギーは無視』されており、熱力学との相違から『高運動エネルギーは液タービン駆動に好適』なる想定は正で、且つ、本システム出力(発電量)のドミナントファクターとできる。

下図に、一例として、NOVEC(1L)/水(11L)の結果を示す。

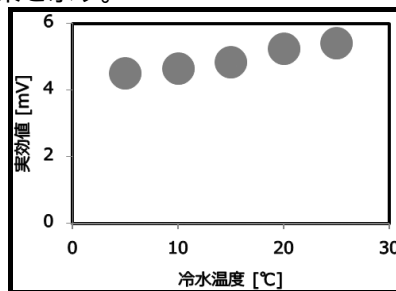


図 6 液タービン発電の冷水温度依存性

NOVEC の沸点(34)から、相変化(沸騰 凝縮)を繰り返すに『冷水温度は<30 』が妥当と考え、上図の様に、冷水温度 5~25 で実験を行った。冷水温度を低下する事で、NOVEC 蒸気は系内で確実に凝縮される。一方、『凝縮後 NOVEC 液滴は過度に冷却』され、ヒーターからの供給熱が『NOVEC の沸点への温度上昇(顕熱)』に浪費、その結果、『沸騰頻度低下』つまり『液タービン発電出力低下』を招いたと推察できる。

以上より、本プロセスの冷却温度は、媒体の相変化を利用する事から、『体積変化を許

容』つまり『開放系』より『NOVEC 沸点(34)を下回り』且つ『漸近し過ぎない』様に設定する必要がある。『最適冷却温度』は、シミュレーター開発後の課題とするが、図6の傾向とNOVEC 沸点(34)から『30 近傍』に所在と考える。

作動媒体量・割合の影響

作動媒体として選定した『biphasic medium(NOVEC/水)』は、本システムに於いて『NOVEC 相変化』『液媒同伴 NOVEC 気泡』『熱交換(NOVEC 水系外)』など、其の性能を確定するメインファクターである。特に、『液媒最底部でのNOVEC 相変化(液気)』は本システムの最重要事象であり、液深の影響(沸点上昇)を受ける事が想定された。

先ず、NOVEC(1L)/冷水温度(5)を一定とし、水量を変化させた結果を下图に示す。

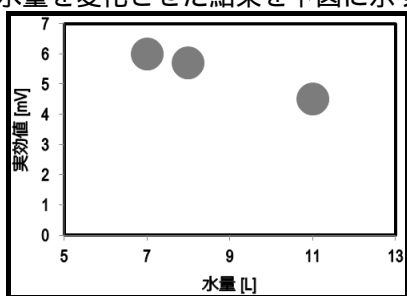


図7 液タービン発電の水量依存性

上図は、『液深増 NOVEC 沸点上昇 NOVEC 沸騰頻度低下 出力低下』なる想定を裏付けている。一方、過度の水量減は、『(NOVEC 蒸気 水)の熱交換』『NOVEC の凝縮』に対し不適と成る。『最適水量』も、先の冷却温度と同様にシミュレーター開発後の課題であるが、『整流用ドラフトチューブ長』など他パラメーター群も併せ、総合的に確定と考える。

次いで、水(8L)/冷水温度(5)を一定とし、NOVEC 量を変化させた結果を下图に示す。

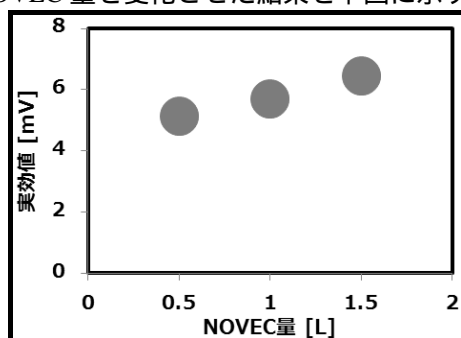


図8 液タービン発電のNOVEC 量依存性

NOVEC 量の増加は、『NOVEC 蒸気泡のウエークに同伴される液媒重量増(NOVEC 割合増つまり運動エネルギー増)』『液相 NOVEC へのヒーター浸潤(NOVEC のみに熱供給)』など好適な条件が揃い、図8のNOVEC 量と実効値に正比例関係が得られたと考える。更に、『液相 NOVEC へのヒーター浸潤』は、『ヒーターの防食』なる付加的効果を生み、例え

ば『高伝熱性・安価ながら水中で腐食する銅をヒーター素材(熱源)』として使用可能である。

先に、『水量増 沸点上昇 沸騰頻度低下』と記した。此処でのパラメーター『NOVEC 量』についても同様な論述が成立する為、『上記の好適作用がトレードオフながら沸点上昇に比べ優位』の結果と考える。これも、シミュレーター開発後に検証する。

尚、NOVEC は非常に高価(1 万円/kg)である。此処で、図8のNOVEC 量 0.5L 実効値 5mV とNOVEC 量 1.5L 実効値 7mV を比べ、これを『3 倍量のNOVEC で実効値 1.4 倍』と見れば『費用対効果低位』と成る。一方、本プロセスは『ランニングコスト皆無・メンテナンスフリー』が特長であり、初期投資(端的にはNOVEC の増量分)は平易に回収可能である。以上より、『シミュレーターによる最適化』は、LCA(Life Cycle Assessment)・QC(Quality Control)的要素を念頭に、『出力(発電量)偏重』にて試行する。

【結言】

100 以下の廃熱から『実用的にエネルギー回生』する手法として、『biphasic medium(NOVEC/水)のシナジー的効果を利用する液タービン発電』を提案した。想定機構通りの発電が確認された。

本研究で開発した『低温廃熱による液タービン駆動発電』は、実験的には『出力のパラメーター依存性』理論的には『最適化』が未遂のまま残されている。加えて、Team EXIT が開発した『熱電発電・圧電発電・液タービン発電』の幾つかをアセンブリーした発電器は、提案の域を脱していない。

今後、先ず、『シミュレーターの適性向上』を図り、本報告書で示した実験結果の忠実再現を果たす。その後、『最適条件の理論的提示』、其の『最適条件の実験的確認』を進め、更に『シミュレーターを高度化』する。

上記の高度化シミュレーターを用い、『アセンブリー発電器のFS』を行う。この成果を以って、試作・実証に向かう。

【謝辞】

本研究は、『元名古屋大学工学系技術室職員の(故)井村立美氏』より無言の激励を頂き、発案・提案・採択・試作・実証された。同氏への深い哀悼と、最上の感謝を此処に捧げる。

理論計算には、『筑波大学図書館情報メディア系・助教の藤澤誠先生』より献身的サポートを頂いた。此処に記し、謝意を表す。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(執筆中)

6. 研究組織
(1)研究代表者
出口清一(名古屋大学大学院)
研究者番号: 50283411