

## 夜間電力蓄熱式蒸気発生器「蒸気源」

田原 賢一 \*

Kenichi Tahara

夜間電力を利用した蓄熱式蒸気発生器「蒸気源」を東京電力(株)、東北電力(株)、北陸電力(株)、中国電力(株)、九州電力(株)および石川島検査計測(株)が共同で開発し、当社は商品化開発を担当した。「蒸気源」は、学校や事業所の給食施設用の厨房機器やその他蒸気を必要とする機器に蒸気を供給する装置である。割安な夜間電力を利用することから、燃焼式のボイラに比べてランニングコストを大幅に低減できる利点を有する。さらに燃焼部分がないため環境にやさしく安全性にも優れている。

「蒸気源」の技術概要および実機による蓄熱試験および蒸気発生試験の概要について報告する。

キーワード：夜間電力、蓄熱、溶融塩、HTS、マグネシア、蒸気発生器、厨房機器、回転釜、蒸気源

### 1. はじめに

学校や事業所の給食施設などでは、回転釜、蒸し器、解凍器などの厨房機器により、大量の蒸気を使って煮炊きなどの調理を行っている。蒸気発生熱源は油やガスなどの化石燃料が主であり、通常はボイラが使用されている。しかし、昨今油、ガスなどの燃料費は高騰してきており、ランニングコストが安く経済的な熱源が求められている。さらに油、ガスなどの化石燃料の燃焼では炭酸ガスを発生するため、地球温暖化防止の点からもよ

り環境にやさしい熱源の利用が望まれている。

このような観点から東京電力(株)、東北電力(株)、北陸電力(株)、中国電力(株)および九州電力(株)の電力会社では割安な夜間電力を利用する蓄熱式蒸気発生器の開発に着手し<sup>(1)</sup>、当社はその商品化開発を実施した。本夜間電力蓄熱式蒸気発生器は「蒸気源」と称して販売を開始しており、既に1号機はユーザに納入し順調に運転されている。

当社で「蒸気源」実機による各種試験を実施しその性能を確認したので、「蒸気源」システム概要とともにその性能試験結果について報告する。

\* 研究開発事業部 プラント技術部 次長

## 2. システム概要

### 2.1 システム概要

「蒸気源」のシステム構成を図1に示す。また外観写真を写真1に示す。

「蒸気源」は蓄熱モジュール、制御モジュールおよび軟水処理装置から構成される。蓄熱モジュールは、「蒸気源」型式により蓄熱槽が2台または1台で構成される。制御モジュールは給水ポンプ、蒸気発生器および制御操作パネルから構成される。

蓄熱槽には、蓄熱材として溶融塩 HTS (Heat Transfer Salt) およびマグネシア (MgO) クリニカが充填されている。蓄熱材は蓄熱槽内部に挿入されたヒータにより夜間電力にて480℃程度まで昇



写真1 「蒸気源」外観

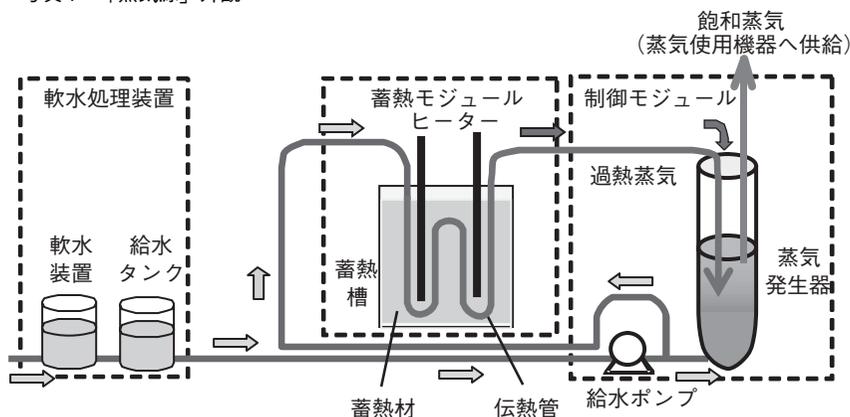


図1 「蒸気源」システム概要

温される。

厨房機器等で使用する飽和蒸気は、蓄熱槽からの過熱蒸気を蒸気発生器へ供給することにより発生し、過熱蒸気発生のための給水は、水道水を利用し軟水装置にて軟水化したあと給水ポンプにより蓄熱槽内の伝熱管へ供給される。供給された水は昇温された蓄熱材により加熱され過熱蒸気となり蒸気発生器へ導かれる。

蒸気発生器では過熱蒸気を給水ポンプ出口から分岐した給水と混合し、0.3～0.5 MPa程度の飽和蒸気と飽和水とする。この飽和蒸気が回転釜などの蒸気利用系へ導かれる。蓄熱槽が2台の場合の「蒸気源」の水・蒸気系統図を図2に示す。

### 2.2 「蒸気源」の利点

「蒸気源」は下記利点を有する。

#### (1) ランニングコストの低減

電力会社との蓄熱調整契約により大幅な割引を適用できる夜間電力を利用でき、従来のガス、軽油、重油焚きボイラや電気式ボイラよりもランニングコストを低減できる。

「蒸気源」の蓄熱は、安価な夜間電力を使用できる蓄熱調整契約時間(22時～8時)内に終了する。通常の電気料金が必要となる日中は蓄熱材を加熱せずに蒸気を発生させ、蒸気発生に

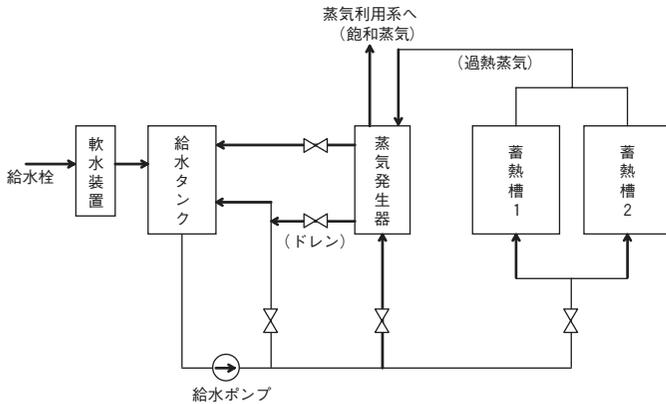


図2 水蒸気系統概念図

必要な電力は給水ポンプおよび制御系に必要な補機電力のみであり、非常に少なく経済的である。

(2) クリーンで安全

燃料としてガスや油を使用せず、燃焼部分がないため燃焼排ガスが発生しない。また、安全性にも優れている。

(3) 蒸気使用機器設備の変更不要

既設の蒸気式厨房機器などの蒸気使用機器を今まで通り使用することができる。

(4) 特別な資格不要

「蒸気源」は、簡易ボイラ（圧力1 MPa以下、5 m<sup>2</sup>（100 kW）以下）となるため、取り扱いに関して特別な資格を必要としない。

3. 基本仕様および構造

3.1 基本仕様

「蒸気源」基本仕様および外形図をそれぞれ表1および図3に示す。

表1に示すように「蒸気源」型式には蓄熱槽が2台の場合と1台の場合があるが、以下では蓄熱槽が2台の場合について説明する。

表1からわかるように「蒸気源」では240 kWhの電力量を投入して蓄熱材を加熱し、換算蒸気量にて最大300 kgの蒸気を発生させることができる。0.5 MPaの飽和蒸気の実蒸気量としては246 kgに相当する。また、発生蒸気出力としては最大150 kg/hまで供給できる。

表1 「蒸気源」基本仕様

項目	仕様	
型式	HTS-300-M1	HTS-150-M1
ボイラ種類	簡易ボイラ	
ヒータ容量	27 kW	13.5 kW
蓄熱消費電力量	240 kWh	120 kWh
蓄熱モジュール数	2台	1台
定格飽和蒸気圧	0.3~0.5MPa	
最大蒸気出力	150 kg/h	85 kg/h
最高蓄熱温度	480℃	
最大換算蒸気量	300 kg	150 kg
出熱効率	73%（連続出熱の場合）	
使用電源	3相AC200V（50又は60Hz）	
伝熱面積	4.4m <sup>2</sup>	2.2m <sup>2</sup>
本体外形寸法	幅1.49×奥行2.81×高さ1.82 m	幅1.49×奥行1.61×高さ1.82 m
蓄熱モジュール	幅0.90×奥行0.97×高さ1.53 m	
制御モジュール	幅1.26×奥行0.40×高さ1.75 m	
総重量（蓄熱材込み）	3,700 kg	1,950 kg

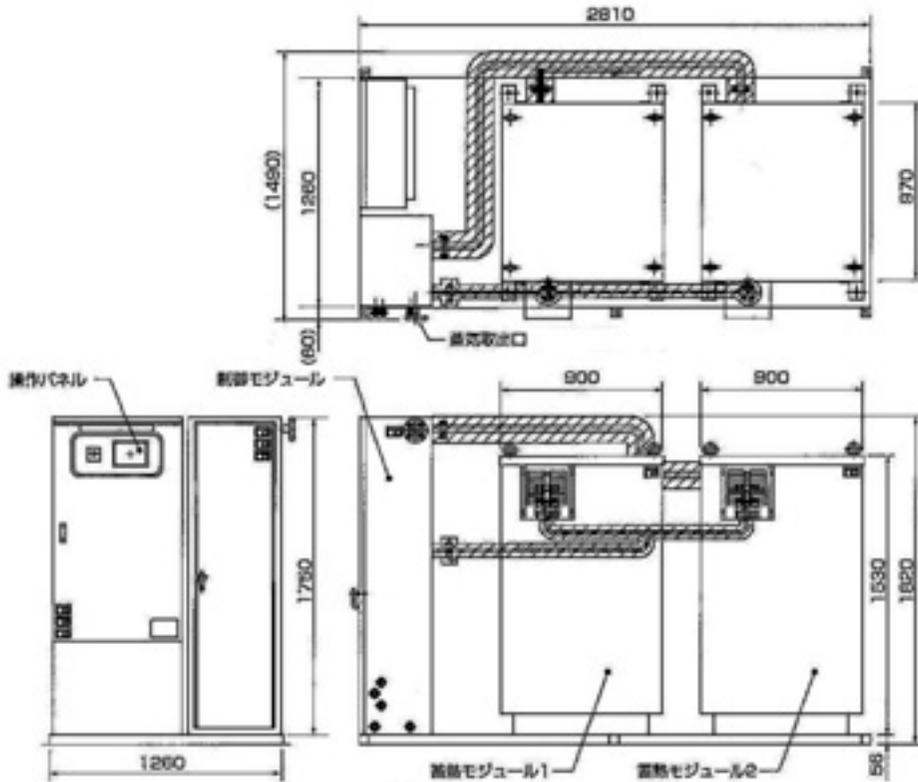


図3 「蒸気源」外形図

### 3.2 蓄熱槽

蓄熱槽には蓄熱材が充填されており、蓄熱材を昇温するためのヒータおよび蒸気を発生するための伝熱管から構成されている。

#### (1) 蓄熱材

蓄熱装置の蓄熱材として求められる条件としては、蓄熱容量が大きいこと、および熱伝導率が大きいことが挙げられる。「蒸気源」の蓄熱材としては、HTSとマグネシア (MgO) クリнкаを混合して用いている<sup>(1)(2)</sup>。HTSとマグネシア (MgO) クリнкаの外観および物性値をそれぞれ写真2および表2に示す<sup>(3)</sup>。ただしHTSは常温時の固体状態の写真である。

HTSはアルカリ硝酸塩と亜硝酸塩の混合塩である。HTSは共融点が142℃であり約500℃の高温まで常圧・常温の空气中で使用できる液体

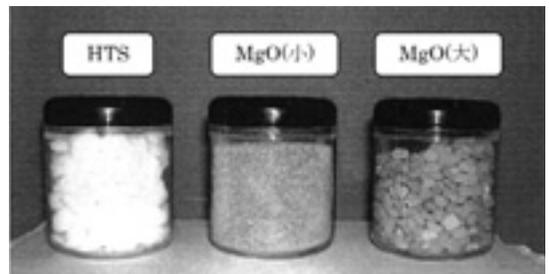


写真2 蓄熱材外観

表2 蓄熱材物性値<sup>(3)</sup>

(温度：600K)

項目	単位	マグネシア	HTS (熔融硝酸塩)
比重	kg/m <sup>3</sup>	3,400	1,800
比熱	kJ/kg	1.16	1.56
	(kcal/kg℃)	(0.28)	(0.37)
熱伝導率	W/(m・K)	22.4	0.39
	(kcal/mh℃)	(19.3)	(0.34)

として、蒸気供給のための蓄熱材として適している。しかし、HTSは容積あたりの熱容量は比較的大きいが、熱伝導率は低いため他の蓄熱材との組み合わせが必要である。「蒸気源」では混合材料として熱伝導率が大きく熱容量も比較的大きいマグネシア (MgO) クリнкаを用いた。

## (2) 蓄熱槽

蓄熱槽の水平断面の概念図を図4に示す。

蓄熱材の蓄熱量を増大させるためには蓄熱材温度をできるだけ高くすることが望ましいが、HTSは550℃を超えると熱分解によりHTSが減量するため、500℃程度以上に昇温することはできない。従って、HTS温度が500℃を超えないようヒータのON/OFF制御を行っている。

また、限られた時間内に蓄熱量をできるだけ多くするために蓄熱材を均一に温度上昇させることが要求される。「蒸気源」ではヒータから

蓄熱材への熱伝達をよくするため、ヒータを格納する部材にフィンを立ててヒータから蓄熱材への伝熱性能を高めている。

一方、蒸気発生量を増大させるためには、蓄熱材の温度分布をできるだけ均一にして温度降下させ、伝熱管内の水への熱伝達を大きくすることが必要である。そのためには加熱源のヒータと同じように伝熱管にフィンを取り付け、蓄熱材から伝熱管への伝熱を促進することが考えられる。しかし、最大500℃に近い蓄熱材中の伝熱管内に水を流すことから、伝熱管には大きな温度差が繰り返し加わることになり、伝熱管にフィンを取り付け一体化する構造は好ましくない。そのため「蒸気源」では、図4に示すように伝熱管をフィンに接近させ、ヒータのフィン効果を利用して蓄熱材温度をできるだけ均一に降下させるよう伝熱管を配置している。

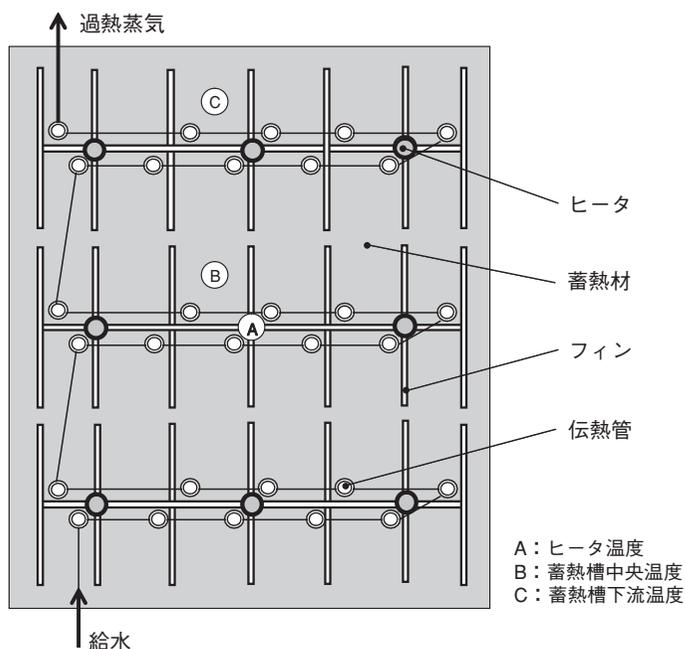


図4 蓄熱槽水平断面概念図

### 3.3 蒸気発生器

蓄熱槽出口からの過熱蒸気は、給水ポンプ出口から分岐した給水と蒸気発生器にて混合して飽和蒸気となる。給水ポンプは、吐出圧力が変動しても給水流量の変動が小さい特性を有するポンプを使用し、蓄熱槽にはほぼ一定の給水流量を供給している。さらに給水ポンプの吐出配管に設置したリリーフ弁により給水圧力が規定値を超えないようにしているため、給水ポンプ吐出圧力はほぼ一定となり、蒸気利用系側のバルブ開度を変えることにより蒸気流量を変化させることができる。蒸気発生器の飽和蒸気圧力は0.3～0.5 MPa程度である。

蒸気発生器内の水位は、蒸気発生器給水管あるいはドレン配管に設けた弁を水位計で検出した水位により開閉制御して調整する。蒸気利用系にて蒸気を必要としなくなり蒸気発生器内の蒸気圧力

が上昇したときは、給水タンクへの蒸気逃しラインに設けた弁を開くことにより圧力を制限値以下に低下させる。

蓄熱材温度の低下に伴って発生蒸気圧力が低下してくるが、所定の蓄熱材温度で給水ポンプが自動的に停止し、蒸気の発生を終了する。

## 4. 運転試験結果

「蒸気源」(HTS-300型) 実用機の性能試験を実施し、計画通りの性能を有することを確認した。以下に主要結果について説明する。

### 4.1 蓄熱性能

蓄熱調整契約時間は22時～8時までの10時間であるが、今回の試験では23時20分～9時20分までの10時間とした。蓄熱槽内部のヒータおよび蓄熱材の昇温カーブの一例を図5に示す。なお、昇

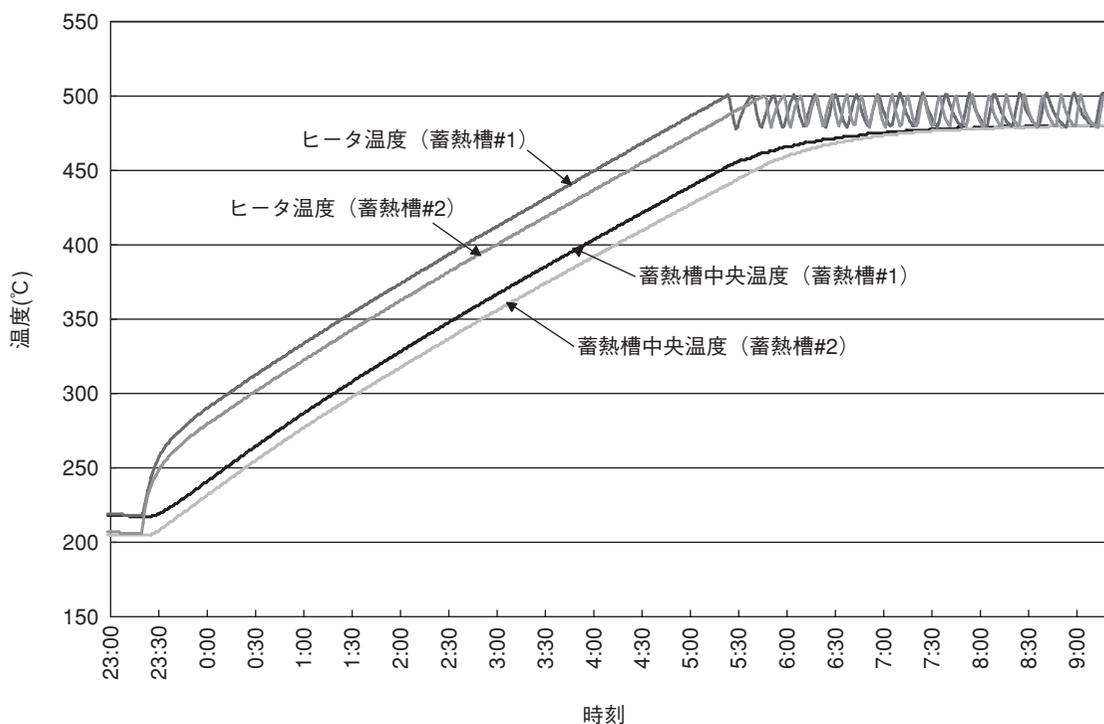


図5 蓄熱槽昇温カーブの一例

温は前日に蒸気を使い切った状態から開始した。  
温度計測箇所は下記の通りである。

ヒータ温度：蓄熱槽中央部（図4のA）

蓄熱槽中央温度：蓄熱槽中央部（図4のB）

蓄熱材の温度を480℃とするためにヒータ温度が500℃以上でヒータ電源OFF、480℃以下でヒータ電源ONの制御を行っている。図5から蓄熱開始後約6時間半でヒータが上限値500℃に達し、以降ON/OFF制御を繰り返していることがわかる。蓄熱槽中央温度は約9時間程度で上限値480℃に達している。

蓄熱調整契約時間（10時間）に達すると、ヒータ電源をOFFとし、蒸気発生運転を開始するまで待機した。

#### 4.2 蒸気発生性能

夜間に蓄熱材を加熱し、蓄えられた熱だけで下

記2方法による蒸気発生試験を実施した。

(1) 蒸気利用系として水槽を用いる。

「蒸気源」発生蒸気を水槽中に設けた伝熱管（羊腸式）内にて冷却し、「蒸気源」の連続運転を実施する。水槽には常時冷却水を流す。

(2) 蒸気利用系として回転釜（1～2台）を用いる。

回転釜に水を満たし、沸騰するまで運転する。

以下にその結果を示す。

①蒸気利用系として水槽を用いた場合

最大蒸気流量150 kg/hを目標として運転した場合の蓄熱材温度および蒸気温度・圧力の変化を一例として図6に示す。また、そのときの蒸気流量変化を図7に示す。

ヒータおよび蓄熱材温度の計測箇所は図4に示した通りである（図中A、B、C）。蒸気流量は渦

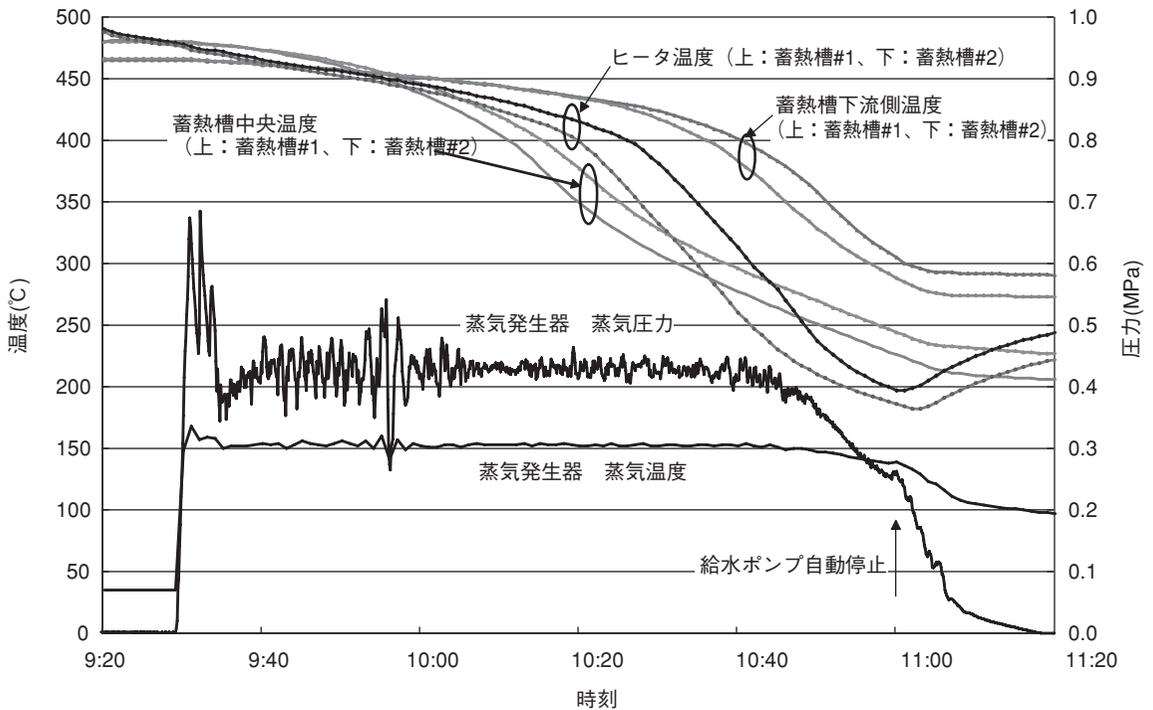


図6 蒸気発生試験 温度・圧力変化の一例

流量計により計測した。

「蒸気源」運転開始後5分後に水槽入口蒸気弁を開として発生蒸気を水槽へ供給した。実際の厨房等においてタイマー設定による蒸気発生後、直ちに蒸気を使用しないケースもあることを模擬するためである。

「蒸気源」が起動すると給水ポンプにより蓄熱槽へ給水され急激に蒸気が発生するが、水槽入口蒸気弁は最初閉じたままなので蒸気発生器内圧力は高く給水流量は少ない。水槽入口蒸気弁を開くと蓄熱槽への給水流量は急激に増加し蒸気が大量に発生する。伝熱管内へ給水された水は、起動時は蓄熱槽の入口側近くで蒸気発生するが、時間とともに沸騰領域は下流側へ移動する。すなわち、蓄熱材から水への熱伝達領域は上流（給水）側から下流（蒸気出口）側方向へ移動する。従って、

図6から蓄熱材の温度は下流側よりも中央から先に降下していることがわかる。

蒸気発生直後は高温の伝熱管に水が供給されるため、伝熱管内の急激な蒸発により蒸気圧力は激しく変動するが、次第に安定してくる。

図6および図7の試験では連続して最大蒸気出力（150 kg/h）を維持しており、蒸気発生時間は1時間25分であった。また、所定の蓄熱材温度で給水ポンプが自動停止することを確認した。

蒸気流量が少ない条件で運転をすると、蓄熱槽内の蓄熱材温度は大流量の場合に比較して温度分布は均一な状態で降下していくので、より長時間にわたって蒸気を発生することができ総発生蒸気量も多くなる。蒸気流量が50 kg/hの場合では約5時間蒸気を発生することができる。

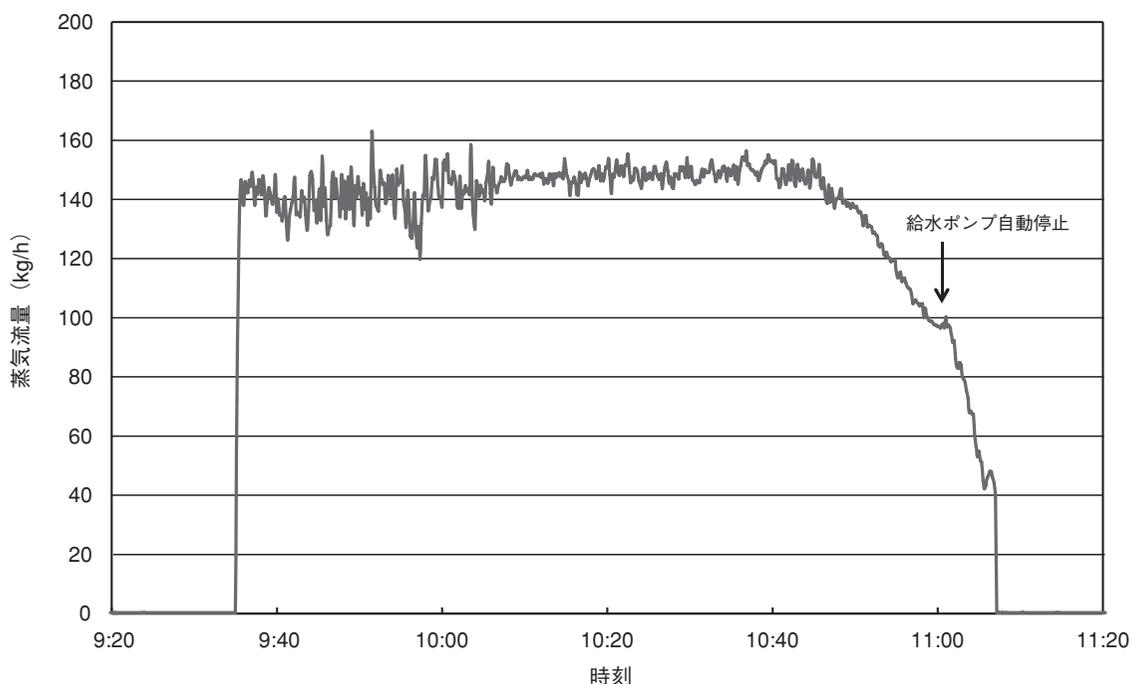


図7 蒸気発生試験 蒸気流量変化の一例

## ②蒸気利用系として回転釜2台を用いた場合

「蒸気源」に回転釜2台を接続した試験を行い、回転釜に蒸気を安定して供給できることを確認した。回転釜の水が沸騰して蒸気を必要としなくなり、回転釜の入口蒸気弁を閉とすると蒸気発生器内の圧力は一時的に上昇するが、給水タンクへの蒸気逃し弁が設定圧力で開となり、蒸気は給水タンクへ放出され、所定圧力内に維持されることを確認した。

運転試験結果の一例を以下に示す。

回転釜内水量	180 L/台
回転釜台数	2台
供給蒸気流量	167 kg/h
沸騰までの時間	20分

### 6.まとめ

「蒸気源」の運転試験により下記を確認した。

- (1) 「蒸気源」は計画通りの蓄熱性能および蒸気発生性能を有する。

- (2) 蒸気式回転釜へ実際に蒸気を供給し、蒸気発生器として安定した状態で使用できる。

今後はユーザへ納入した実機のメンテナンス・サービスも含め、納入実績を蓄積していきたい。

「蒸気源」はランニングコストが安いこと、地球温暖化防止の観点から炭酸ガスを放出しないこと、クリーンで安全性が高いこと等の特長を有しており、厨房機器以外にも病院向け蒸気滅菌装置など多くの分野での応用が期待されており、これらの新分野への利用を推進していきたい。

### 参考文献

- (1) 小川智広、花房輝、渡辺健次：HTSを利用した高温蓄熱材による蒸気発生器、日本機械学会 熱工学部門ニュースレターNo.47, 2005
- (2) 石田哲義：高温蓄熱槽とその応用機器の開発、第14回電熱大会（1999.11.25）
- (3) 日本機械学会、伝熱工学資料（改訂第4版）



研究開発事業部  
プラント技術部  
次 長

田原 賢一

TEL. 045-759-2050  
FAX. 045-759-2119