

# 光学法による漏洩監視技術の開発

## Development of Optical Sensor System for Local Steam Leak

倉田 敏一 (Toshikazu Kurata)\* 小林 修二 (Shuji Kobayashi)\*  
嶋津 正 (Tadashi Shimazu)† 木田 泰夫 (Yasuo Kida)‡

**要約** 原子力プラントの安全上重要な機器・配管からの漏洩を早期に検知し、漏洩箇所の同定および漏洩量の推定ができることがプラントの信頼性維持向上および安全運転のために重要である。このため機器からの漏洩を直接検知する光学式漏洩検知システムの開発を行っている。

水は近赤外線から赤外線領域に吸収特性を持つため、水の吸収波長と吸収されない波長の反射率を比較する近赤外線水分計が食料品や木材の水分量を検知する手段として利用されている。そこで近赤外線水分計と高温蒸気を吸湿する吸湿材の組合せによる光学式漏洩検知システムの開発に着手した。

まず、文献調査を行い吸湿材の選定を行った。そして選定した吸湿材の吸湿特性を評価するため要素試験を行った。その結果、本技術が漏洩検知システムとして実現できる可能性のあることが確認できた。

**キーワード** 漏洩, 赤外線, 吸湿材, 水分計

**Abstract** The early detection of leaks from nuclear reactor safety grade equipment, identification of the location of the leak and estimation of the amount of leakage are important for plant reliability as well as safe operation. Accordingly we are developing an optical sensor system that detects leaks from equipment directly.

Since water has the characteristic of absorbing ray in the near infrared to infrared region, near infrared moisture meters are used as means of detecting the moisture content of food products and wood materials. With this in mind, we are developing an optical sensor system for local steam leak that combines a near infrared moisture meter with a moisture absorbent material that absorbs high-temperature steam.

First, the moisture absorbent material was selected based on a survey of the literature. Next, elementary tests were conducted to evaluate the moisture absorbent characteristic of the moisture absorbent material selected. The results of those tests confirmed that this technique can be used as a leak detection system.

**Keywords** leak, infrared rays, moisture absorbent material, moisture meter

## 1. はじめに

原子力発電所構成機器は、運転に伴い経年的な変化が起こることが一般的に知られている。これら経年変化が顕在化する前に予知することは、原子力発電所の信頼性を維持向上のため必要である。しかし、万が一顕在化した場合には早期に検知することが必要である。特に安全上重要な機器、配管等からの漏洩を早期に検知し、漏洩箇所の同定および漏洩量を推定することが重要である。本論文は漏洩蒸気を直

接検知する目的で開発した光学式漏洩検知システムについての研究を記述したものである。

水は近赤外線 ( $0.8\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ ) から赤外線領域 ( $2.5\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$ ) に吸収特性をもつため、水の吸収波長と吸収されない波長の反射率を比較する近赤外線水分計が食料品や木材の水分量を検知する手段として利用されている。そこで近赤外線水分計と高温漏洩蒸気を吸湿し保持する吸湿材を組合せた光学式漏洩検知システムの開発を行った。

高温蒸気を吸湿保持できる吸湿材の調査を文献で

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† 三菱重工業(株) 技術本部 高砂研究所

‡ 三菱重工業(株) 原子力プラント技術部 予防保全センタ

行い吸湿材を選定した。選定した吸湿材の吸湿特性を評価するため要素試験装置を製作し要素試験を行った。要素試験では、各吸湿材の空気中での飽和吸湿レベル、各吸湿材の高温吸湿特性、圧力特性および安定性試験を実施した。

## 2. 原理

水の吸収スペクトルは、図1に示すように近赤外線領域では比較的大きく1.45  $\mu\text{m}$ と1.94  $\mu\text{m}$ に吸収帯をもっており、特に1.94  $\mu\text{m}$ での吸収係数は大きい。物質に1.94  $\mu\text{m}$ の近赤外線を照射した際、水分がある場合には近赤外線は吸収されるため反射されてくる近赤外線量は少なくなる。この近赤外線領域の吸収特性を利用した赤外線水分計と高温蒸気を保持できる吸湿材を組み合わせることにより高温蒸気漏洩を直接計測することができるようになる。

## 3. 吸湿材の選定

次の条件を満足する吸湿材を文献で調査した。

- ・耐熱性 200 以上
- ・耐放射線性が高いもの

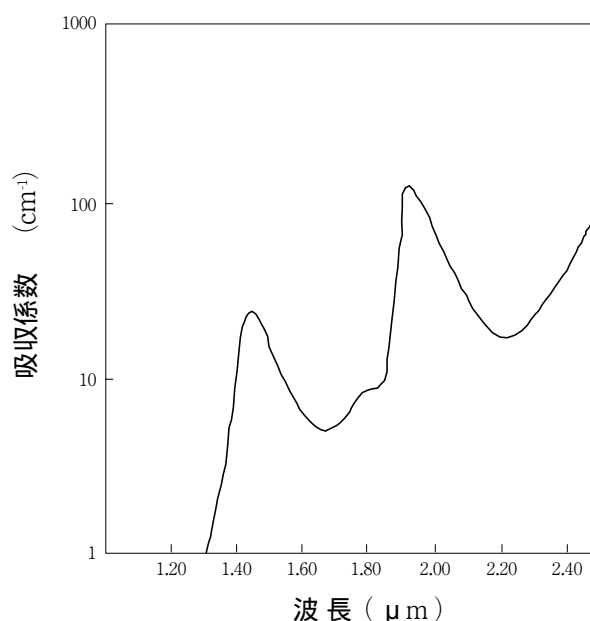


図1 水の吸収係数

・近赤外線の水の吸収波長である1.45  $\mu\text{m}$ と1.94  $\mu\text{m}$ 近傍に吸収ピークがないもの  
7種類の代表的な吸湿材について文献調査を行い比較評価した。評価結果を表1に示す。吸湿材を比

| 名称        | 吸湿可能な乾燥空気1リットル当りの水蒸気圧 (mmHgH <sub>2</sub> O) | 1g当りに吸湿可能な水分量 (g) | 吸湿データの最高温度 ( ) | 取扱い性の良否  | 特徴   | 総合評価 |
|-----------|--|-------------------|----------------|----------|--|------|
| 1.ゼオライト   | 0.001  | 0.18              | ~ 350          | 良        | 分子ふるい作用等の特徴を持ち、水分の吸着性能は五酸化リンに次いで高い   | 適    |
| 2.シリカゲル   | 0.02<br>~ 0.07                               | 0.2               | ~ 280          | 良        | 代表的な乾燥剤  | 適    |
| 3.活性アルミナ  | 0.002<br>~ 0.005                             | 0.2               | ~ 250          | 良        | 触媒, 乾燥剤  | 適    |
| 4.塩化カルシウム | 0.1<br>~ 0.2                                 | 0.15              | ~ 100          | 温度により変わる | 温度によっては溶液となる   | 否    |
| 5.硫酸      |  |                   | ~ 250          | 否        | 200 , 37.5Torrにて5%の吸着データは存在するが、取扱は危険。  | 否    |
| 6.生石灰     | 0.01<br>~ 0.003                              | 0.31              | ~ 547          | 否        | CaO + H <sub>2</sub> O = Ca(OH) <sub>2</sub> の可逆的反応。高温での吸着データはなし<br>化学反応の為、水の赤外吸収が得られなくなる。 | 否    |
| 7.五酸化リン   | 0.00002                                      | 0.5               |                | 否        | 最も強力な吸湿剤<br>吸湿材として利用できる温度は低い<br>化学反応の為、水の赤外吸収が得られなくなる。                                     | 否    |

表1 吸湿材比較評価結果

較した結果，温度特性，取扱いやすさからゼオライト，活性アルミナ及びシリカゲルの3種を選定した。

比較評価で選ばれたゼオライト，活性アルミナおよびシリカゲルの3種について詳細文献調査を行った。調査結果を表2に示す。高温吸湿特性，耐放射線性，赤外線吸湿特性の総合評価から光学式漏洩検知システム用の高温吸湿材として最も適しているのはゼオライトで，次に活性アルミナであることがわかった。これら3種について高温吸湿特性試験を行うことにした。

#### 4. 要素試験

選定した吸湿材に対する高温蒸気雰囲気中での吸湿特性を明らかにするため，図2に示す高温蒸気発生装置を製作し，各吸湿材の吸湿特性試験を実施した。

##### 高温蒸気発生装置の設計仕様

- 蒸気最高温度 400
- 蒸気圧力 2kg/cm<sup>2</sup>
- 蒸気流量 0.5kg/h

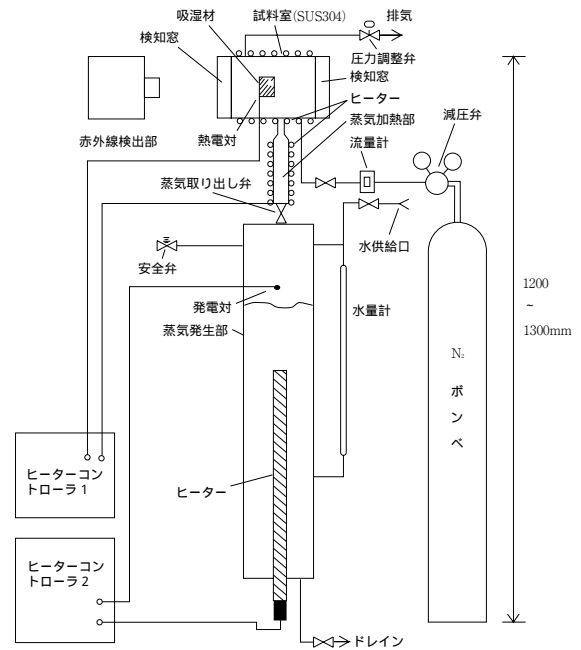


図2 高温蒸気発生装置

試験は加熱された試験容器内にサンプルを設置し，加熱蒸気を試験容器内に送り込み，この時のサンプル表面の水分量変化を検知窓を介して赤外線水

| 吸湿材       | 高温特性                                       | 赤外線特性   | 耐放射線性   | 総合評価                          |
|-----------|--|---|---|-------------------------------|
| 1. ゼオライト  | ~ 350 までの吸湿特性データ有り<br>高温での吸湿特性は最も優れている。    | 3 ~ 50 μm で中赤外線領域に吸湿帯を持ち，今回問題となる近赤外線領域に吸湿帯は確認されなかった。            | 放射線性物質の吸着材としての試験実績をもち， <sup>60</sup> Co照射実験（10 <sup>6</sup> ~ 10 <sup>8</sup> Rad）にて，イオン交換能，イオン選択性に何等の損傷も見られない。 | 光学式漏洩検知用の仕様に最も適した吸湿材と言える      |
| 2. 活性アルミナ | ~ 250 までの吸湿特性データ有り<br>高温での吸湿特性はゼオライトに次いで高い | 表面の水酸基が2.6 ~ 2.7 μm の間に吸湿帯をもち，また，バインダーによると見られる吸収ピークが近赤外付近に4つある。 | 最も放射線に強いセラミック材の一つ<br>4 × 10 <sup>20</sup> n/cm <sup>2</sup> の中性子照射に対し+6.8%の密度変化線，X線にてカラーセンターが生じる                | 吸湿特性は劣るが，ゼオライトに次いで優れた吸湿材と言える。 |
| 3. シリカゲル  | ~ 280 までの吸湿特性データ有り<br>高温での吸湿特性は最も低い        | バインダーを含め，近赤外付近に5つの吸収ピークがある。                                     | 特性データ無し   | 高温での吸着特性は低いが，温度的には使える。        |

表2 詳細評価結果

分計（CHINO IR-M100）にて計測し，高温蒸気の吸湿量を評価した。

## 5. 試験結果

### 5.1 含水率の較正試験

赤外線水分計は水分計に付属している較正板を用いて0点とフルスケールの調整を行っている。つまり，水分計は値を指示するだけであり，吸湿材の含水率（水分の重量 / 吸湿材の重量）は表示していない。このため赤外線水分計と含水率の関係がわかる較正試験を実施した。

#### 5.1.1 試験方法

選定した吸湿材は強力な吸湿特性をもつため，加熱乾燥しても常温降下時に吸水してしまうため，含水率の基準サンプルが製作できない。このため加熱式水分計を用い，吸湿材を加熱式水分計の上に置き温度を上昇させ，加熱乾燥後温度降下を行う。温度降下時の吸湿材の吸湿に伴う重量変化を加熱式水分計で計測した。

#### 5.1.2 試験結果

図3に示すような赤外線水分計の出力に対する含水率の較正曲線を得た。

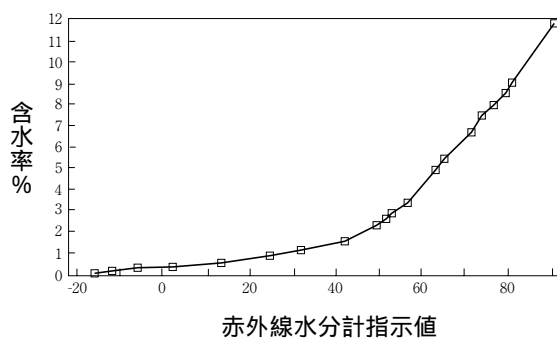


図3 シリカゲルの較正曲線

### 5.2 空気中での飽和レベルの計測

各吸湿材は強力な吸湿特性を有するため，高温でも空気中の水分を吸湿している。実機適用の場合，

空気中における各温度での飽和状態が漏れなしのレベルとなるため，このレベルを各吸湿材について確認した。

#### 5.2.1 試験方法

各吸湿材を1週間常温の空气中に放置し，飽和状態とする。次に吸湿材を加熱し，各温度での飽和吸湿状態を赤外線水分計にて計測した。

#### 5.2.2 試験結果

図4に示すように活性アルミナ，シリカゲルについては100 でも急激な水分の放出が得られるが，ゼオライトでは100 程度ではほとんど水分の放出はなく，100 以上でも放水量は少ないことがわかった。

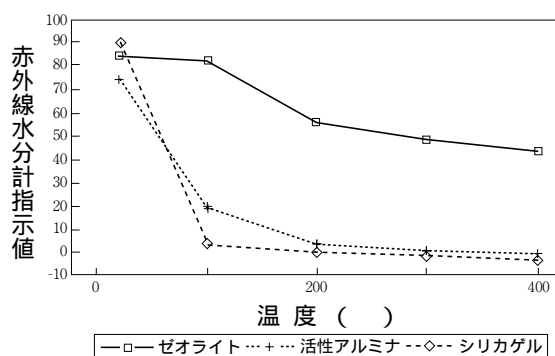


図4 空気中での飽和含水率

### 5.3 各温度での吸湿特性試験

各吸湿材の温度を変化させた時の吸湿量および立ち上がり特性（応答性と感度）を評価した。

#### 5.3.1 試験方法

各温度にて赤外線水分計の指示値が飽和するまで窒素ガスを流し乾燥処理する。その後蒸気流量10g/分，蒸気圧力0.5kg/cm<sup>2</sup>で吸湿特性試験を実施した。

#### 5.3.2 試験結果

試験の結果，図5～9に示すデータを得た。図よ

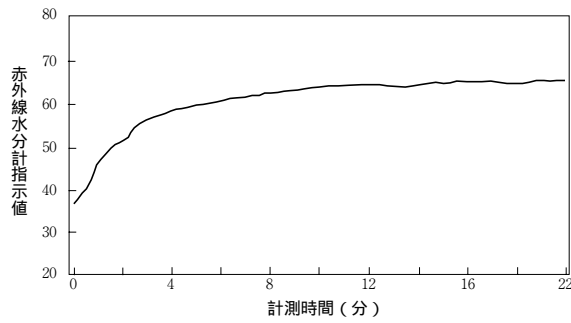


図5 ゼオライトの吸湿応答特性(300℃, 0.5Kg/cm<sup>2</sup>)

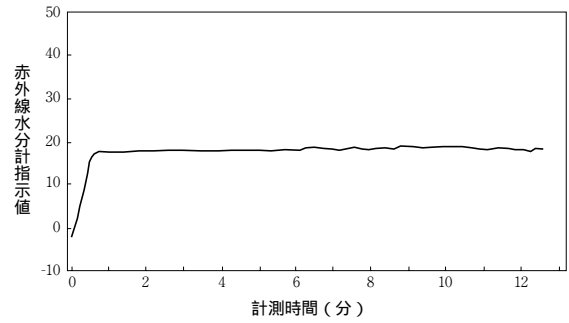


図7 シリカゲルの吸湿応答特性(300℃, 0.5Kg/cm<sup>2</sup>)

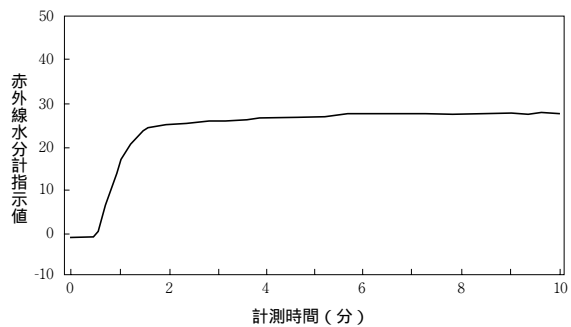


図6 活性アルミナの吸湿応答特性(300℃, 0.5Kg/cm<sup>2</sup>)

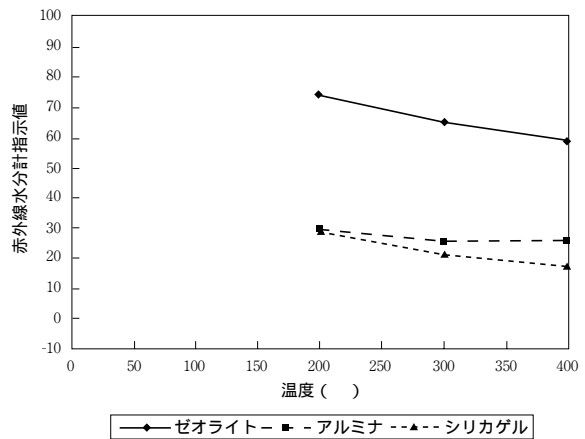


図8 各温度の吸湿特性(0.5Kg/cm<sup>2</sup>)

り次のことがわかった。

- ・各吸湿材共高温蒸気の吸湿を赤外線水分計で検出することができた。
- ・吸湿特性の大きなゼオライトについては、蒸気吸湿に伴う指示値は大きいですが、初期状態で多くの水分を吸収しているため指示値変化量は少ない。
- ・吸湿特性の低い活性アルミナ、シリカゲルは、蒸気吸収に伴う指示値は小さいが、初期状態が低いいため指示値変化量は大きい。
- ・立ち上がりの早い吸湿材は、シリカゲル、活性アルミナ、ゼオライトの順となり、吸湿特性の低い順と対応している。これは吸湿特性の低い材料ほど初期状態が乾燥状態に近く、吸湿できる蒸気量も僅かなため飽和に至る時間が短いと考えられる。

### 5.4 蒸気圧特性試験

蒸気圧を変化させた時の吸湿材の吸湿特性を評価した。

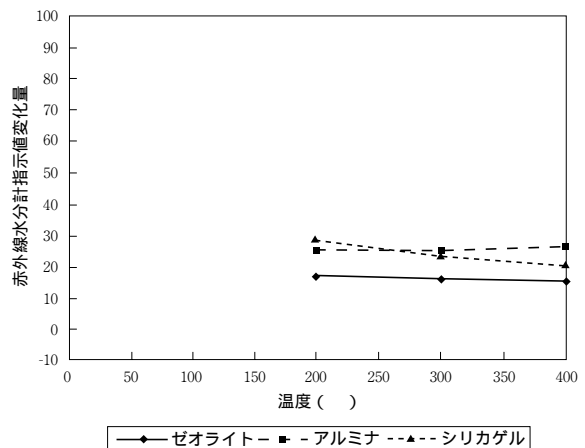


図9 空気中の飽和データとの差

#### 5.4.1 試験方法

各温度にて赤外線水分計の指示値が飽和するまで窒素ガスで乾燥処理する。その後蒸気を流し圧力を

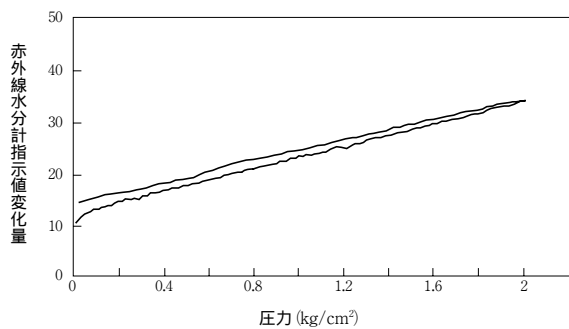


図10 ゼオライト圧力特性(300 )

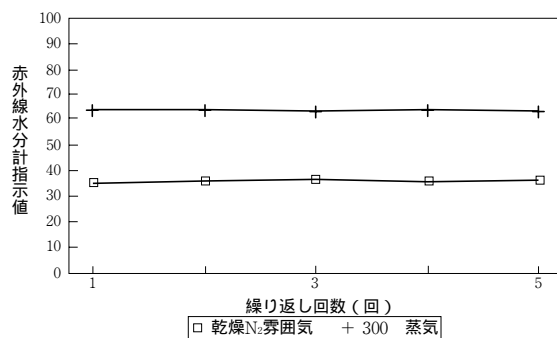


図13 ゼオライトの繰り返し安定性試験結果

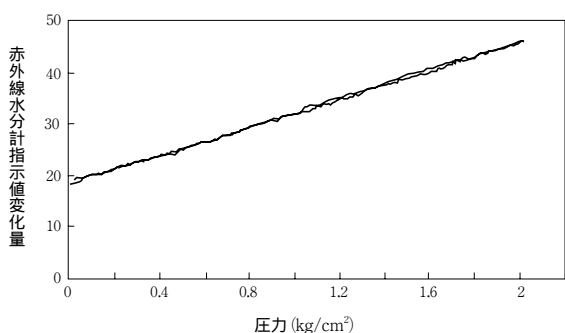


図11 活性アルミナ圧力特性(300 )

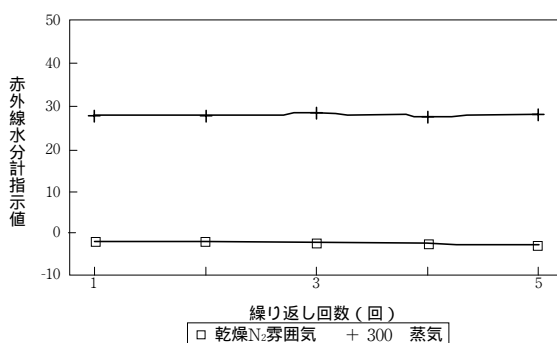


図14 活性アルミナの繰り返し安定性試験結果

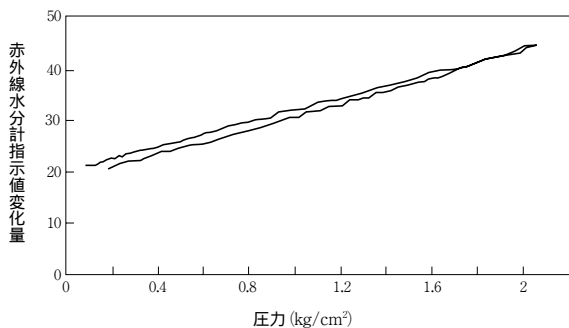


図12 シリカゲル圧力特性(300 )

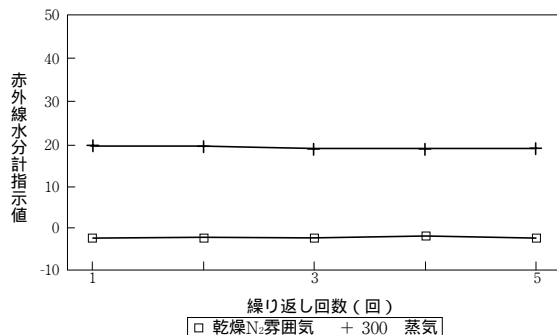


図15 シリカゲルの繰り返し安定性試験結果

0 2 0 kg/cm<sup>2</sup>に変化させた時の吸湿特性試験を実施した。

### 5.4.2 試験結果

試験の結果、図10, 11, 12に示すデータを得た。図より各吸湿材共蒸気圧を上げた場合、検出感度は向上することが確認できた。

## 5.5 繰り返し安定性試験

吸湿材が吸湿と乾燥を繰り返した時の吸湿特性の再現性を評価した。

### 5.5.1 試験方法

乾燥処理と蒸気吸収を5サイクル繰り返し、この時

の乾燥時と蒸気吸収時の水分計出力変化を確認した。

### 5.5.2 試験結果

試験の結果、図13, 14, 15に示すデータを得た。図より乾燥・吸湿を繰り返しても、各吸湿材共吸湿特性は変化しないことが確認できた。

## 5.6 高温保持試験

吸湿材の高温保持に伴う吸湿特性変化を確認し、長期的な吸湿特性の安定性を評価する。

### 5.6.1 試験方法

長期加熱（300℃, 30日間）前後で吸湿特性試験を実施し、吸湿特性に変化があるか確認した。

### 5.6.2 試験結果

試験結果を表3に示す。表より長期加熱保持してもゼオライト、活性アルミナおよびシリカゲルの吸湿特性は変化しないことが確認できた。

## 6. まとめ

高温吸湿特性試験の結果、プラント運転状態にお

いて高温蒸気の吸湿を赤外線水分計により検出できる目途を得た。蒸気漏洩検知の感度としては、各温度での吸湿材の初期状態と吸湿特性との兼ね合いで決まる。また、繰り返し安定性試験、高温保持試験等で吸湿材の信頼性が確認できた。今後、放射線特性試験を行った後、最適な吸湿材を選定し、実機に向けた漏洩監視技術を確立する予定である。

## 参考文献

- (1) J.A.Dean: "Lange's Handbook of Chemistry", McGraw-Hill Book Company
- (2) G.Joos, "Landolt-Bornstein" Springer-Verlag, Vol.4 (1972)
- (3) G.Joos, "Landolt-Bornstein" Springer-Verlag, Vol.2 (1960)
- (4) 原 伸宣 他, "ゼオライト基礎と応用", 講談社
- (5) 堀岡, "ゼオライトによる放射性廃液から<sup>137</sup>Csの分離回収に関する基礎研究", 原子力学会誌, Vol.11, No9 (1969)

| 項 目  | 高温保持前 | 高温保持後 |
|--|-------|-------|
| ゼオライト  |       |       |
| ・立ち上がり (300℃)  | < 8分  | < 8分  |
| ・吸湿量ピーク <sup>*1</sup><br>(300℃, 0.1kgf/cm <sup>2</sup> ) | 65.5  | 66.2  |
| ・圧力特性 <sup>*2</sup><br>(300℃, ~ 2kgf/cm <sup>2</sup> )   | 34.2  | 33.8  |
| 活性アルミナ   |       |       |
| ・立ち上がり (300℃)  | < 2分  | < 2分  |
| ・吸湿量ピーク <sup>*1</sup><br>(300℃, 0.1kgf/cm <sup>2</sup> ) | 27.5  | 27.7  |
| ・圧力特性 <sup>*2</sup><br>(300℃, ~ 2kgf/cm <sup>2</sup> )   | 46.5  | 47.0  |
| シリカゲル  |       |       |
| ・立ち上がり (300℃)  | < 1分  | < 1分  |
| ・吸湿量ピーク <sup>*1</sup><br>(300℃, 0.1kg/cm <sup>2</sup> )  | 18.5  | 18.9  |
| ・圧力特性 <sup>*2</sup><br>(300℃, 2.0kg/cm <sup>2</sup> )    | 44.2  | 43.5  |

\*1 赤外線水分計指示値

\*2 赤外線水分計指示値変化量（空気中の飽和データとの差）

表3 高温保持試験前後の特性比較