

# 非凝縮性ガス計測装置

大和田 明彦

(独)日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 工務技術部

## 概要

加圧水型原子炉の冷却材喪失事故が発生すると非常用炉心冷却系（ECCS）が作動するが、このうち蓄圧注入系が作動すると加圧用の非凝縮ガスが系内へ流入する。原子炉容器や蒸気発生器等にガスが蓄積すると凝縮熱伝達が減少し、蒸気発生器の二次系減圧による一次系減圧の阻害要因となる。

非凝縮性ガスが減圧に及ぼす影響を定量的に把握するため、原子力科学研究所に設置されている実炉を模擬した大型非定常試験装置（LSTF）による事故模擬実験において、压力容器、蒸気発生器に蓄積する高圧蒸気中のガス濃度を定量測定する計測装置を開発した。

LSTF とは、Large Scale Test facility の略で、加圧水型原子炉を模擬し、高さは実炉と同一の約 29m で、体積を 1/48 に縮小した試験装置であり、主に原子炉の各種小破断冷却材喪失事故模擬試験及び過渡状態の模擬試験等を行っている。試験装置としては世界最大の規模となっており、圧力 15.5MP、温度 598K で実炉と同条件での使用が可能となっている。また、1600 点以上の計測点があり、実炉よりも詳細な計測が可能となっており、実炉模擬性は、国際的に高く評価されている。世界 14 ヶ国、17 機関で開発・改良された解析コードの検証・評価に役立てられている。また、LSTF 実験結果は、平成 3 年に発生した美浜 2 号機での蒸気発生器伝熱管破断事故の再現実験による原子力安全委員会への情報提供や、米国原子力規制委員会と次世代型原子炉の安全性に関する型式認証等に貢献した。

今回、本計測装置を LSTF に適用して小破断冷却材喪失事故模擬試験における非凝縮ガスの蓄積場所及びガス濃度による凝縮熱伝達減少を調べた。

## 1 非凝縮性ガス計測装置の構成

非凝縮性ガス計測装置の外観図を図 1 に示す。本計測装置は、酸素濃度計、圧力調整弁、気液分離器、流量計、それらを接続する配管及び各機器を操作制御する制御盤で構成される。

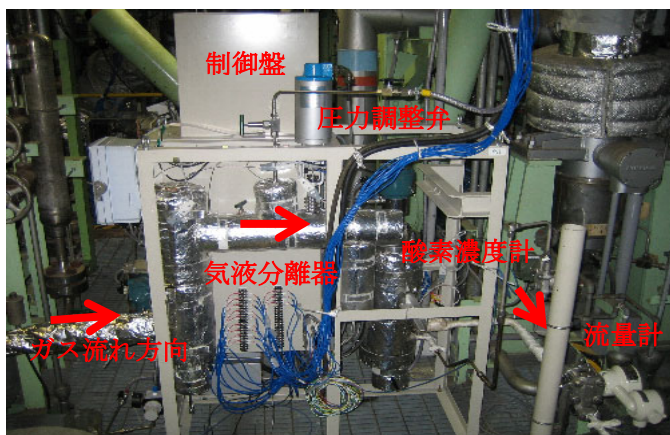


図 1 非凝縮性ガス測定装置外観図

## 1.1 酸素濃度計

非凝縮性ガスの濃度を測定するために、元々は煙突内の燃焼管理に使われている市販のジルコニア酸素濃度計を使用した。測定精度は、指示値の±3%又は0.1%O<sub>2</sub>の大きい方となる。設計上高温には持つが、大気圧仕様なので高圧条件下での使用はできない。今回高温・高圧下で測定する必要があるため、上流側に圧力調整弁を設置し、酸素濃度計内の圧力を制御した。

## 1.2 圧力調整弁

圧力調整弁は、最大 2.0MPa の高圧蒸気を減圧させて酸素濃度を測定するために設けた。また、酸素濃度計の出力が計測時の全圧力の影響を受けることから、できる限り影響を受けないようにするため、本弁は、酸素濃度計の周辺圧力が 3.0kPaG 未満で制御可能な圧力制御弁とした。

## 1.3 流量計

流量計は、少量のサンプリングが望ましく、微少流量の計測が可能なオリフィス型微少流量伝送器を採用した。

## 1.4 気液分離器

気液分離器は、酸素濃度計及び流量計への液滴混入を避けるため、遠心分離により液滴を除去する目的で設けている。

## 1.5 配管等

これらの機器を内径 7.53mm の配管で接続している。また、流体が凝縮するのを防ぐために、それぞれの温度に見合った制御ができる配管ヒータを設けている。

## 2 非凝縮性ガス計測装置の要件

本計測装置は、LSTF の小破断冷却材喪失事故模擬試験時に非凝縮ガスが蓄積すると推測される場所 3カ所に設置し、LSTF 一次系の水蒸気-ガス混合気を小流量でサンプリングし、高温、高圧状態の蒸気中の酸素濃度を直接計測するものである。LSTF 内の高圧蒸気を抽出し、気液分離器で余分な液滴を除去し、圧力調整弁にて最大 2.0MPa の高圧蒸気圧を 2.0kPa まで減圧させ、酸素濃度計の周辺圧力を維持するよう圧力調整を行う。その後、酸素濃度計で蒸気中の酸素濃度を計測する。最後にサンプリングした量を測定するために流量計を介して排出する。全体系統は図 2 のとおりである。

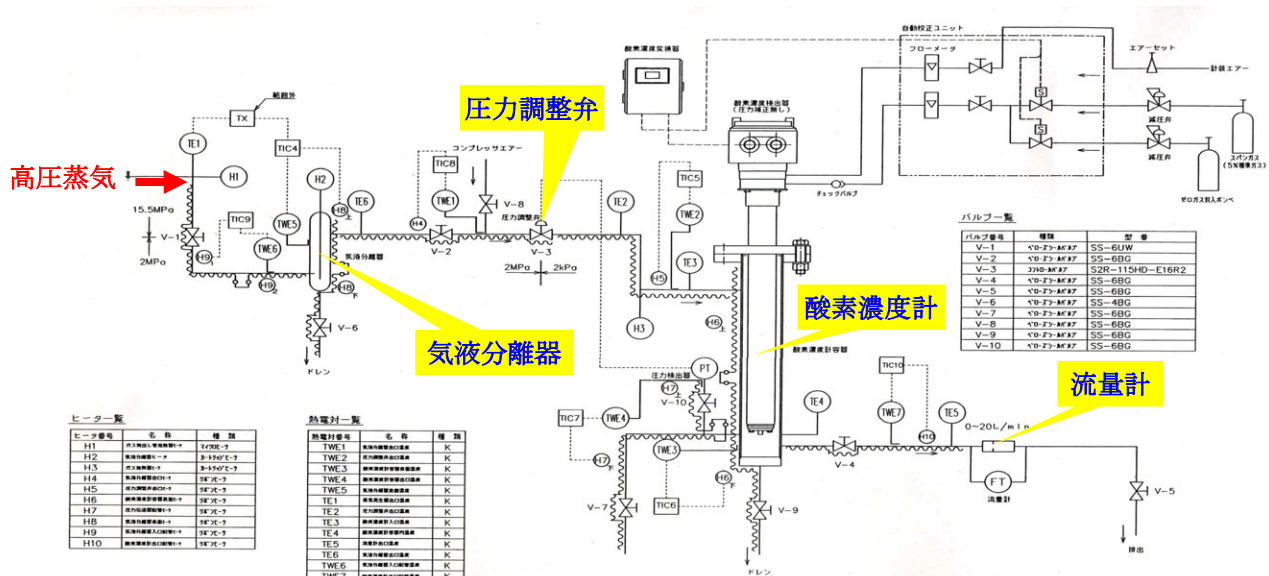


図 2 非凝縮性ガス濃度計測装置 系統図

### 3 非凝縮性ガス計測装置の単体性能試験

LSTF に適用する前に、単独で蒸気を発生させることのできる既設タンクを用いて、ジルコニア酸素濃度計の単体性能試験を実施し、測定精度を含めて本装置の性能について検討した。

圧力、流量、温度の 3 点に着目し、濃度測定にどのような影響を与えるかを確認するため、既知の濃度 21.03% の標準ガスを使用して測定した。測定の結果は図 3 に示すとおり、流量、温度よりも圧力の変動による影響が大きいことがわかった。この結果を踏まえて、非凝縮性ガス計測時には、圧力を一定に保つために圧力調節弁を設けることとした。

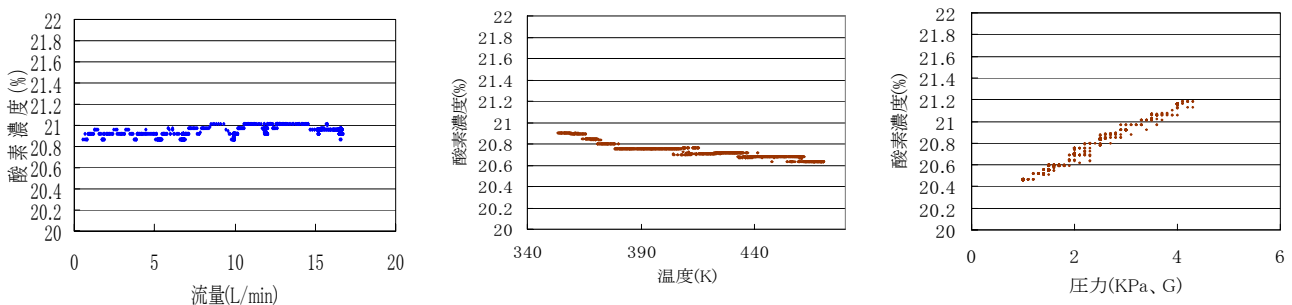


図 3 圧力変動による酸素濃度測定結果

抽出した蒸気の凝縮を押さえるために配管ヒータで加熱をしていたが、蒸気中の水分が液滴となり当初使用していたタービンメータ式流量計のロータに付着し、測定が不能となった。そこで遠心分離式の気液分離器を設置し、蒸気中の水分を除去することにした。また、ピックアップ部が高温となり安定した流量指示値が得られなかったためピックアップ部を空冷して使用していたが、流量を正確に測定するためにタービンメータ式からオリフィス型微小流量伝送器に変更した。

気液分離器を取り付けたことにより、除去された液滴がヒータの加熱によって再沸騰する懸念が出てきた。抽出した蒸気を再沸騰させてしまうと蒸気分圧が変わってしまい、正確な酸素濃度値が得られないためヒータ出力を精度良く制御する必要が出てきた。蒸気を飽和温度のまま保つのはかなり苦労した。

### 4 非凝縮性ガス計測装置の LSTF 適用時の総合試験

本計測装置を 3 基製作し、非凝縮ガスが蓄積されると推測される圧力容器頂部及び蒸気発生器出口プレナム部に設置し、実際に LSTF に適用して、高圧蒸気条件での減圧実験時の濃度を測定した。通常は、蓄圧注入タンクの加圧用ガスは窒素を使用するが、今回製作した計測器は酸素濃度計であるため空気ガスで加圧した。また、蓄圧注入系が作動し、非凝縮ガスが流入する LSTF 内一次側圧力は 2.0MPa 以下であることから、本計測器に抽出する蒸気圧は 1.8MPa から減圧し、温度はそのときの飽和温度以上とした。減圧により蒸気温度が低下すると気液分離器で除去した水分が再沸騰するため、抽出部の蒸気温度を監視し、過熱蒸気にならないようにヒータをコントロールした。

試験結果は、図 4 に示すとおり圧力容器頂部に流れ込んだ非凝縮ガスは通過するだけで、蓄積しないことがわかった。蒸気発生器出口プレナム部は、プレナム部に凝縮水が戻ってしまい、抽出ノズルが水没するという現象が繰り返し起こり、バッチサンプリングとした。サンプリングを 4 回実施したが、酸素濃度はほぼ 10% 前後を示していることがわかる。減圧実験時の酸素濃度測定が精度良く計測されているか実証するために、予想酸素濃度を計算してみた。計算方法は、気相部の蒸気温度を測定し、そこから飽和蒸気圧を求める。次に系内圧と飽和蒸気圧の差が酸素分圧となるため、酸素分圧を系内圧で割れば酸素濃度が計算できる。

計算の結果、実測値と計算値はほぼ合致していることがわかり、測定は精度良く計測されていたと判

断できる。

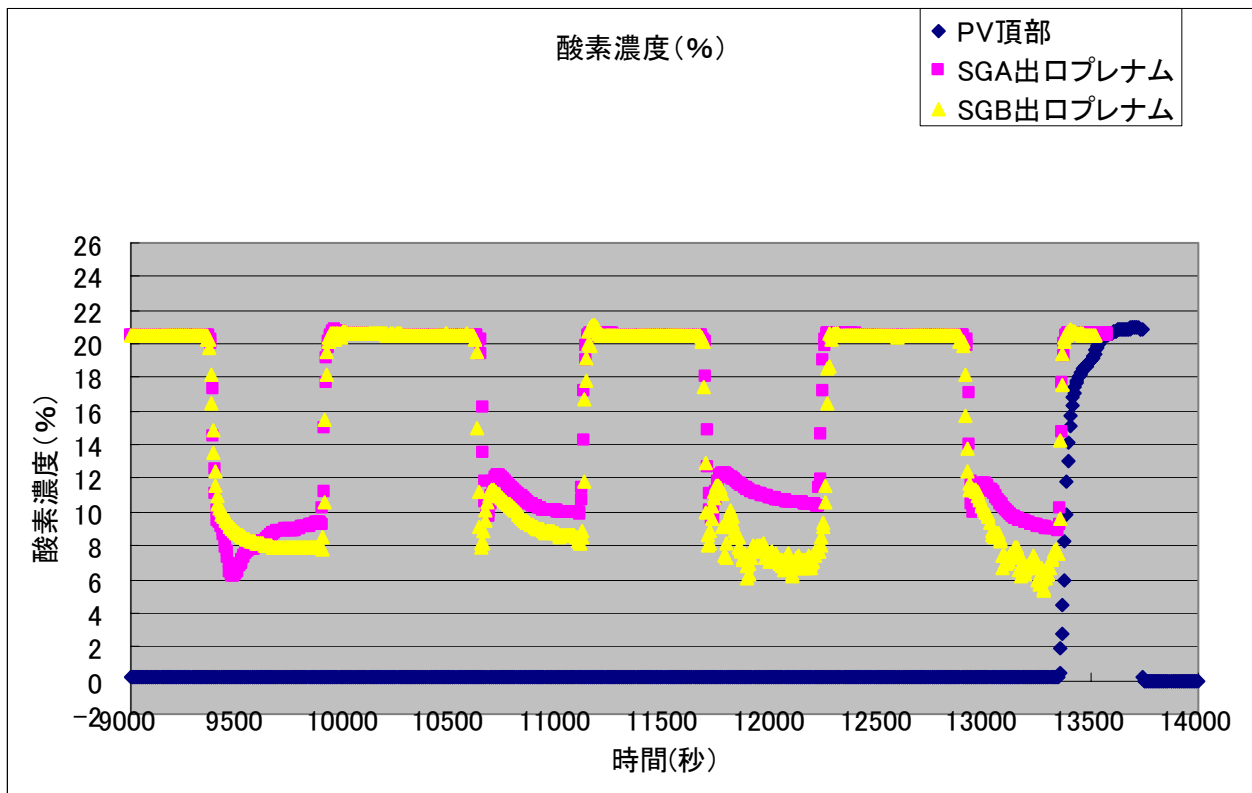


図4 LSTF 適応時の測定結果

## 5 まとめ

今回、高圧蒸気中の酸素濃度を測定する装置を製作し、LSTF を用いて蒸気中の酸素濃度を測定した結果、装置特性、LSTF への適用性を確認することができた。また、圧力容器及び蒸気発生器の蒸気中酸素濃度を測定した結果、蓄圧タンクからの非凝縮ガスは減圧過程に於いて、主に蒸気発生器にかなりの量蓄積されることが確認された。測定された酸素濃度は、計算による推測値ともほぼ合致することが確認された。

今後は、LSTF 実験に、今回開発した非凝縮ガス測定装置を用い、小破断 LOCA 模擬実験に於いて圧力容器、蒸気発生器に蓄積される酸素濃度測定を行うことにより、その都度計算によりガス濃度を評価することなく非凝縮ガスによる熱伝達、減圧阻害過程が解明されることを期待する。