

過酷事故対応のドライウェル冷却器の除熱特性

Heat Removal Characteristics of Dry-well Cooler for a Severe Accident

日立製作所	石田 直行	Naoyuki ISHIDA	Non-Member
日立製作所	綿引 直久	Naohisa WATAHIKI	Non-Member
日立製作所	細井 秀章	Hideaki HOSOI	Non-Member
日立 GE	渡邊 亮平	Ryohei WATANABE	Non-Member
日立 GE	佐藤 大樹	Daiki SATO	Non-Member
日立 GE	安藤 浩二	Kouji ANDOU	Non-Member

Abstract

The new dry-well cooler (DWC) for a severe accident has been developed to avoid release of radioactive materials to environment caused by primary containment vessel failure. The DWC can be operated using natural driving force to remove decay heat. The element tests using copper tube bundle with 3 rows and 5 levels were conducted under existing nuclear power plant conditions to estimate heat removal ratio with non-condensable gas (N₂) and to confirm occurrence of natural circulation through the DWC due to density difference. Test data showed that condensation continued in the DWC even under 30vol% N₂ condition. Occurrence of natural circulation was confirmed from N₂ fraction distribution estimated by temperature distribution in the DWC. As a result, it was confirmed that the DWC could remove heat under high N₂ fraction condition and heat removal continued with consecutive steam flow into the DWC by natural circulation.

Keywords: Dry-well cooler, Severe accident, Primary containment vessel, Condensation, Non-condensable gas, Heat removal, Natural circulation, Element test

1. 諸言

福島第一原子力発電所の事故を受け、新規制基準が制定され、過酷事故に対して基準を満たす設備の設置が義務化された。過酷事故対策の主な規制要求として、炉心損傷防止対策、格納容器破損防止対策、使用済み燃料プールにおける燃料損傷防止対策が挙げられる。

本研究では、過酷事故時の沸騰水型原子炉の格納容器破損防止策を対象としている。現状、格納容器ベントで破損を防止することとしている。格納容器ベントで放射性物質の環境への放出を極小化するため、フィルタベントで対応している。一方、原子力プラントの更なる安全性向上のため、格納容器冷却手段の多様化が検討されている。格納容器内のガスを環境に放出しないで格納容器破損が防止でき、既設炉への適用を考慮すると設備対応が比較的容易な手段であることが望ましい。

そこで、格納容器内で蒸気を凝縮させ、格納容器内の

ガスを環境へ放出することなく格納容器の加圧を抑制する新型ドライウェル冷却器 (DWC) を開発している。過酷事故時には、格納容器内での動的機器の作動が期待できない場合があることから、自然力を用いて必要な除熱量を達成できる DWC を開発することとした。通常運転時には、格納容器内は窒素で置換されている。窒素は非凝縮性ガスであり、伝熱管表面での蒸気の凝縮熱伝達を阻害する要因となる。一方で、窒素は蒸気よりも密度が大きいので、蒸気の凝縮に伴い DWC 内の窒素濃度が上昇すると、DWC 内の混合ガスの平均密度が DWC 周囲の混合ガスの平均密度よりも大きくなり、混合ガスは DWC 内を下方へ向かって流れる。下方から排出された混合ガスの量だけ、DWC 上部から周囲の混合ガスが DWC 内に流入し、DWC 内部を上から下へ向かう自然循環流が形成される。この自然循環流により、継続的に DWC 内に混合ガスが流入して、混合ガス中の蒸気が伝熱管表面で凝縮し、動的機器がなくても冷却が可能となる。

窒素による凝縮熱伝達の阻害効果と自然循環流の形成を確認するため、小規模の試験体を用いた要素試験を実施し伝熱データを取得した。

連絡先: 石田直行、〒319-1292 茨城県日立市大みか町
7-1-1、日立製作所
E-mail: naoyuki.ishida.sx@hitachi.com

2. 新型ドライウェル冷却器の構造

図1に DWC を適用した冷却システムの概略構成を示す。格納容器内に DWC を設置し、原子炉格納容器外に設置した熱交換器と冷却水循環ポンプに接続して、DWC の伝熱管に冷却水を通水して格納容器を冷却する。外部熱交換器では、二次冷却水として海水等を用い、格納容器内の熱を海等の最終ヒートシンクへ放出する。使用する外部熱交換器と冷却水循環ポンプは可搬式のものを想定している。

図2に DWC の概念構造を示す。水平および鉛直方向に正方格子配列で並べた複数の伝熱管を上下面が開口したケーシングで囲っている。このようにして、鉛直方向の流れを妨げないようにしている。また、伝熱管表面での凝縮熱伝達率が気体の強制対流熱伝達率よりも十分に大きいことから、既設のドライウェル冷却器のように伝熱フィンを取り付けていない。このため、フィンで生じる流動抵抗がない。さらに、煙突効果を得るために、ケーシングを設置スペースが許す限り高さを大きくし、伝熱管の下に高さ h [m] のチムニ空間を設けている。チムニにより、 $\Delta \rho gh$ [Pa] ($\Delta \rho$ [kg/m³]:DWC の内外密度差、 g [m/s²]: 重力加速度) の水頭差が加わるため、自然循環流量が増大し、DWC により多くの混合ガスを取り込むことができるようにしている。

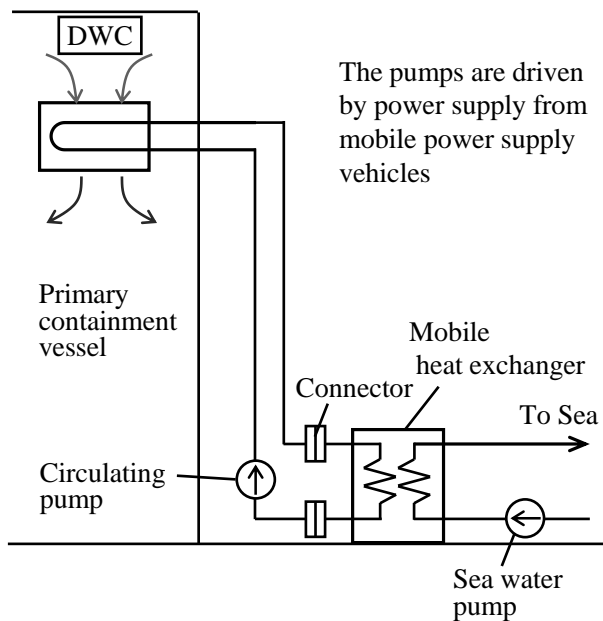


Fig.1 Cooling system with the dry-well cooler

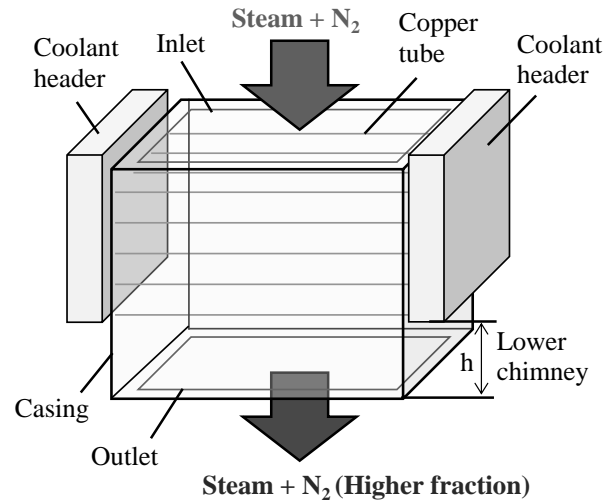


Fig.2 Conceptual design of a new dry-well cooler

3. 要素試験

3.1 試験目的

DWC 性能を評価する上で考慮すべき現象として以下が挙げられる。

- ① 非凝縮性ガス（窒素）による伝熱阻害効果
- ② 凝縮に伴う窒素濃度の変化による自然循環の発生
- ③ 多段効果（鉛直方向の窒素濃度分布）

これらの現象を再現した伝熱データを取得し、窒素濃度が高い条件でも、自然循環により冷却が継続されることを確認することを目的として、小型の試験装置を用いた要素試験を実施した。

3.2 試験ループと試験体

図3に試験ループを示す。最大圧力 3.5MPa、最大流量 3.3t/h で蒸気を供給可能なボイラから試験容器に蒸気を供給した。試験体で蒸気を凝縮させ、凝縮水は試験容器下部から排出した。試験体での蒸気の凝縮にともない、試験体を通じた混合ガスは窒素濃度が高くなって密度が大きくなり、試験容器下部に滞留しやすくなる。このため、試験容器下部に蒸気注入管を配置し、注入される蒸気によって窒素濃度の高い混合ガスを攪拌し、試験体の上から流入する混合ガスの窒素濃度が一定になるようにした。

試験体には、循環ポンプを用いて所定の流量で冷却水を供給した。冷却水流量は電磁流量計で測定した、試験体を通して温度が上昇した冷却水を熱交換器でクーリ

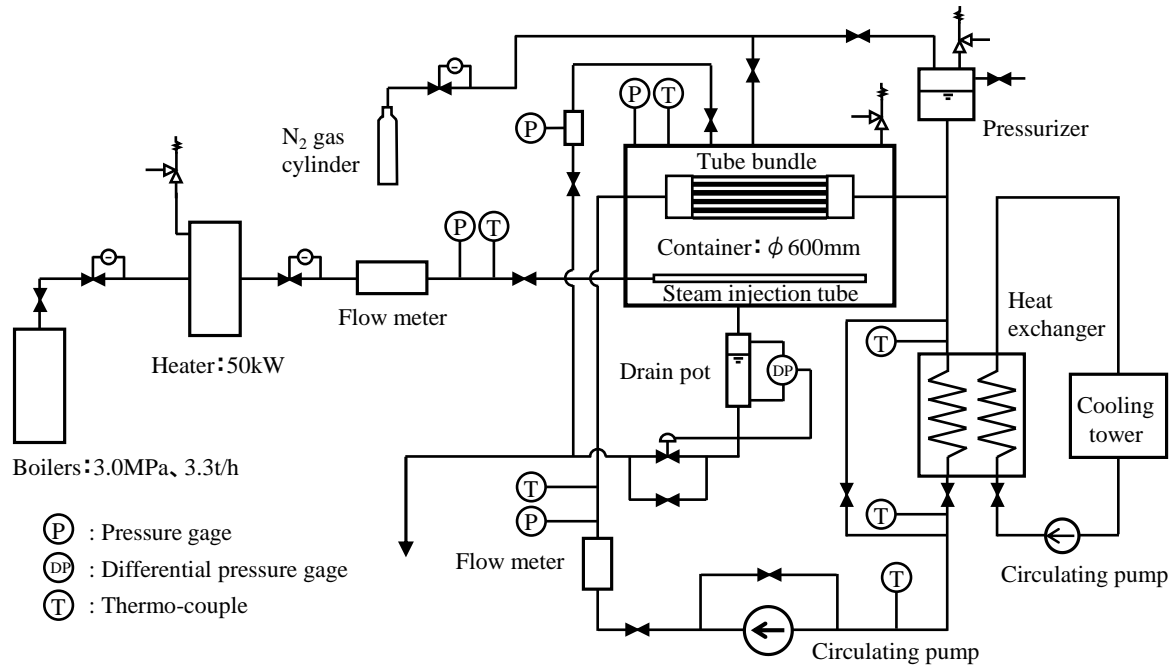


Fig.3 Diagram of the test loop

ングタワーからの二次冷却水で冷却し、所定の温度で試験体に供給できるようにした。また、試験体の伝熱管内で冷却水が沸騰しないように、加圧器を冷却水ループに設置し、加圧器内に窒素を封入して冷却水を約0.2MPaまで加圧した。

図4に試験体を示す。伝熱管群は外径15.9mm、厚さ1.2mmの銅管を用いた3列×5段構成とし、仕切板で伝熱管群を囲っている。水平方向ピッチ33mm、鉛直方向ピッチ38mmの正方格子の伝熱管群である。伝熱管長さは、伝熱管出入口の冷却水の温度差を十分に確保できる1mとした。水平方向に3列とすることで、中央の伝熱管で両側にある伝熱管の影響を考慮した。また、鉛直方向には、上段から滴下する凝縮水や凝縮に伴う窒素濃度増加の影響（多段効果）を受け、下段の伝熱管ほど除熱量が小さくなるため、5段の伝熱管の除熱量の変化から、多段効果を確認した。15本の伝熱管すべての出入口に熱電対を挿入し、冷却水温度を測定した。熱電対の測定部が伝熱管中心になるようにスペーサで位置を固定した。図4の下側の図に示すように、各段の間の伝熱管外側に窒素濃度評価用の熱電対を設置した。蒸気と窒素の混合ガスの温度は、蒸気分圧での飽和温度となるため、測定した温度 T [°C]における蒸気の飽和圧力 P_{sat} [MPa]を算出することで、試験容器内圧力 P_{tot} [MPa]から(1)式により窒素の体積濃度 α [vol%]を求めることができる。

$$\alpha = \frac{P_{tot} - P_{sat}(T)}{P_{tot}} \quad (1)$$

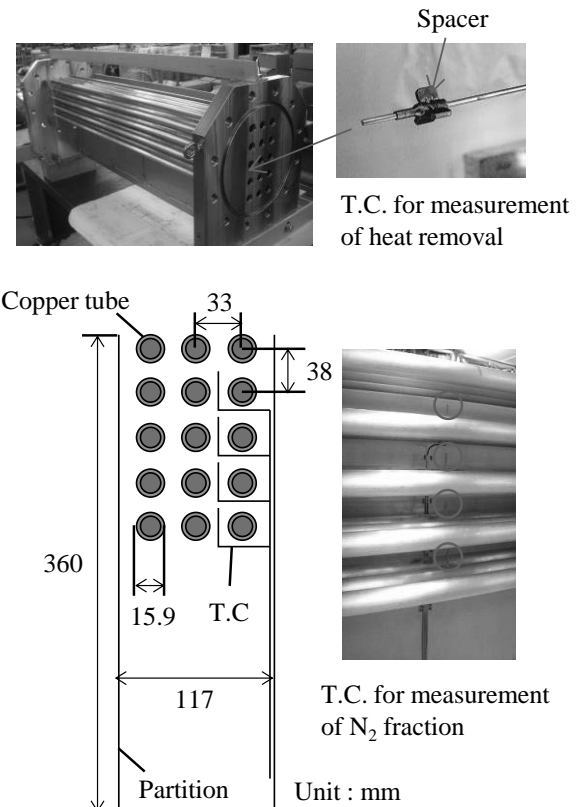


Fig.4 Tube bundle for the element test

3.3 試験条件と試験方法

表 1 に試験条件を示す。圧力は、沸騰水型原子炉でベント基準となる 0.85MPa までとした。この条件は、改良型沸騰水型原子炉のベント基準である 0.62MPa を包括している。冷却水温度は、外部熱交換器の想定される仕様を考慮して、30~85℃の範囲とした。冷却水流速は基本仕様である 2m/s をベースとしているが、伝熱管内部の強制対流熱伝達の影響を確認するため、窒素濃度 0vol% の条件で 1m/s と 4m/s に流速を変えてデータを取得した。想定している過酷事故事象（大破断冷却水喪失+全電源喪失+緊急炉心冷却システム機能喪失）では、事故進展中のドライウエルの窒素濃度は最大で 30vol% と見込んでいるため、窒素濃度の範囲は 0~30vol% とした。

試験では、まず、伝熱管に冷却水を流し、ドレン弁を開けたまま試験容器に蒸気を供給し、初期に試験容器にある空気を排出する。試験容器内で測定している温度がすべて飽和温度以上になったら空気がすべて排出されたと判断し、ドレン弁を閉じる。その後、蒸気供給量を減らして試験容器圧力を低下させたのち、窒素ボンベから所定量の窒素を試験容器に封入する。試験容器内上部の熱電対で測定した温度から評価した飽和蒸気圧と、試験容器内圧力との比から、所定の窒素濃度になっていることを確認する。所定の試験容器圧力と冷却水温度となるように、蒸気ラインの供給圧力と熱交換器への冷却水の分岐流量を調整する。蒸気の供給量と凝縮量が釣り合って圧力が一定となったことを確認してからデータを取得した。

Table 1 Element test conditions

Pressure in the container	0.2–0.85 MPa
Temperature in the container	120–180 °C
Coolant pressure	0.2 MPa
Coolant temperature	30–85 °C
Coolant velocity	1.0–4.0 m/s
N ₂ volume fraction	0–30 vol%

3.4 試験結果

各伝熱管の除熱量 Q [W] を(2)式で評価した。

$$Q = G \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

ここで、 G [kg/s] : 冷却水流量、 c_p [J/kgK] : 冷却水の定圧比熱、 T_{in} [°C] : 伝熱管入口冷却水温度、 T_{out} [°C] : 伝熱

管出口冷却水温度である。

図 5 に上から 1 段目の中央伝熱管の除熱量と窒素濃度の関係を示す。1 段目では、上段から滴下する凝縮水の影響を排除して、非凝縮性ガスである窒素による伝熱阻害効果を評価することができる。除熱量は、各圧力での純粋蒸気条件での除熱量で規格化している。窒素濃度の増加に伴い、除熱量が単調に低下している。窒素濃度が低い領域で除熱量低下の勾配が大きく、窒素濃度が高くなると除熱量の低下が緩やかになる。窒素による伝熱阻害効果で除熱量は低下するが、小規模の要素試験体系で窒素濃度 30vol% でも純粋蒸気条件の 15% 程度の除熱量を確保できることを確認した。窒素による伝熱阻害効果は、蒸気が凝縮することにより伝熱管表面に窒素が集積するためであるが、伝熱管段数が多い実機 DWC では、より多くの混合ガスを DWC 内に引き込むことができ、混合ガス流速が増加するため、集積した窒素を攪拌する効果が期待でき、除熱量の低下が抑制されると予想される。

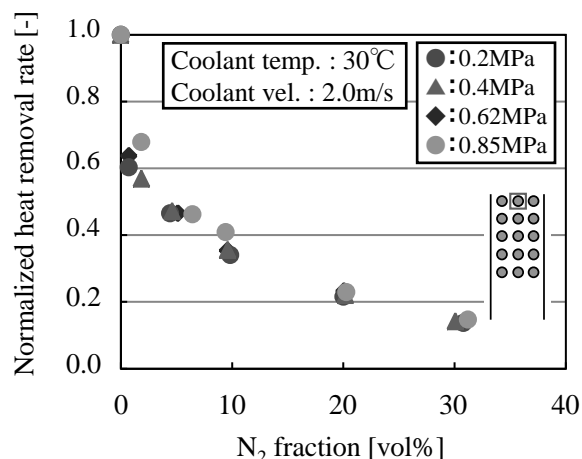


Fig.5 N₂ volume fraction vs heat removal rate

図 6 に中央伝熱管の 1~5 段目の除熱量の変化を示す。各段の除熱量は 1 段目の除熱量で規格化している。上段から下段に向かって除熱量は単調に低下していく。上段から落下してくる凝縮水による伝熱阻害効果、および伝熱管での蒸気の凝縮にともなう下段に行くにつれて窒素濃度が増加して伝熱を阻害する効果が大きくなることによるものである。試験容器内の窒素濃度が低いほど、除熱量の低下がやや大きくなる傾向にある。これは、図 5 に示したように窒素濃度が低い領域では、窒素濃度の増加に対する除熱量低下の感度が大きいためである。

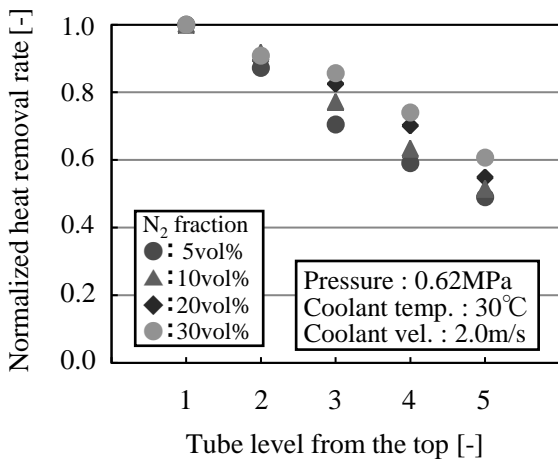


Fig.6 Tube level vs heat removal rate

図7に伝熱管各段の間に設置した熱電対で測定した温度から(1)式で評価した窒素濃度分布を示す。伝熱管を通過するたびに窒素濃度が単調に増加している。窒素濃度が単調に増加していることから、蒸気と窒素の混合ガスが上部から伝熱管群内に流入し、伝熱管で蒸気が凝縮しながら伝熱管群を下に向かって流れていると推定できる。

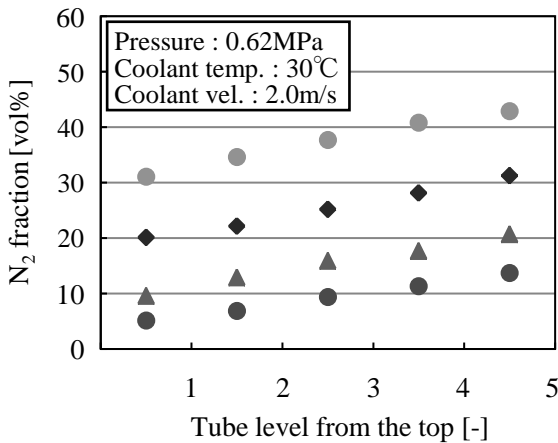


Fig.7 N₂ volume fraction distribution

以上から、蒸気よりも密度の大きい窒素を含む混合ガスは、伝熱管で蒸気が凝縮して窒素濃度が上昇し密度が増加することにより、伝熱管群を上から下に向かう自然循環流が発生し、常に DWC に蒸気が供給されることを確認した。また、窒素による伝熱阻害効果はあるが、一定の除熱量を確保できることを確認した。

4. 結言

過酷事故時の格納容器冷却手段の多様化の一つとして、蒸気を凝縮して格納容器を減圧する新型ドライウェル冷却器 (DWC) を開発している。窒素による伝熱阻害効果と蒸気と非凝縮性ガスである窒素との密度差によって生じる自然循環流の形成を確認するため、外径 15.9 mm、厚さ 1.2 mm、長さ 1m の銅管を用いた 3 列× 5 段の伝熱管群を用いた要素試験を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 窒素濃度の増加に伴い除熱量は低下するが、想定している過酷事故事象での最大窒素濃度 30vol% の条件でも、純粋蒸気に対する除熱量の 15% 程度は確保できる。
- (2) 蒸気と窒素の密度差により DWC 内を上から下に向かう自然循環流が形成される。この自然循環流により常に DWC 内に蒸気が供給され、継続的に除熱が行われる。

今後、要素試験で取得した伝熱特性データを基に DWC の伝熱モデルを構築して精度を確認し、実機仕様の検討に適用していく。また、実機 DWC では、自然循環力が大きくなり、除熱性能が向上すると予想されることから、CFD を活用した評価と実機大の試験を計画していく予定である。