

長尺ヒートパイプを利用する 乾式キャスク冷却システムの開発

野田 英彦[†]・小林 正樹[†]

Development of Cooling System for Dry Cask using Long Heat Pipe

Hidehiko NODA[†] and Masaki KOBAYASHI[†]

ABSTRACT

Spent nuclear fuels discharged from nuclear power plants are stored in a spent fuel pool under wet condition until they undergo reprocessing. The capacity of spent fuel pools, however, is less than the amount of wasted spent nuclear fuels, it is inevitable to shorten the period of wet storage and the transfer to dry storage in the air using a cask made of metal is progressing. The shortening of wet storage period means that the decay heat inside a spent nuclear fuel is larger than the case of longer period storage when a fuel is drawn out of fuel pool, therefore, some alternative cooling system substituting a conventional natural cooling is required. In this paper, experimental and numerical study were carried out to develop a cooling system for dry cask using long heat pipes. As a result, a long heat pipe with sufficient performance was produced and the possibility of a new cooling system for dry cask using the heat pipes was shown.

Key Words: heat pipe, spent nuclear fuel, interim storage, dry cask, natural cooling, forced cooling

キーワード: ヒートパイプ、使用済み核燃料、中間貯蔵、乾式キャスク、自然冷却、強制冷却

1. 緒言

1.1 背景

地球温暖化対策のため、我が国はパリ協定を批准し、2030年までに2013年比26%の温暖化ガス排出量削減を行うこととなった。石油や天然ガス資源に乏しい我が国では、自国供給のエネルギー資源を求めて原子燃料サイクルに取り組んでおり、CO₂排出量が少ない原子力発電は、廃棄

物処理問題が未解決であるものの、今後再稼働が進んでいくものと推察される。一方、使用済み核燃料はリサイクル燃料に加工されるまで中間貯蔵されているが、その排出量は日本原燃の最大再処理量 (800t/年)を超過している現状があり、かつ、湿式保管用の燃料プール容量に限界があることから、7年程度の湿式保管後に空気中でキャスクと呼ばれる金属容器内で一時保管する乾式保管が導入されつつある。原子力規制委員会でも2016年11月22日の定例会合で、乾式キャスク保管の安全性を考慮しつつ、その規制基準を緩和する方針とした¹⁾。これを受けて2018年12月5日の定例会合では、耐震性や強度の新基準案

令和1年12月10日受付

[†] 八戸工業大学大学院工学研究科・教授

をまとめ²⁾、2019年3月13日に正式決定した³⁾。この新基準は全国共通であるため、審査で認証された型式のキャスクは、国内のどの原子力発電所でも導入する際に審査を省略できるという大きいメリットがある。また、玄海原子力発電所は、乾式保管の申請をするとともに、燃料プール内の燃料間隔を縮める申請を行っている⁴⁾。

一方、全国の原子力発電50基のうち33基の燃料プールは、すでに満杯に近く、稼働後数年分しかない状態である⁵⁾。燃料プールの拡張は困難であり、発電所の再稼働が進む中、使用済み燃料の乾式キャスク保存への移行が加速されることとなる。湿式保管から乾式保管に短期間で移行できれば、目標とする発電量は維持可能となる。

原子力発電所燃料プールで貯蔵されている使用済み核燃料を頑丈な金属キャスク内に密封し中間貯蔵するために、東京電力ホールディングス㈱と日本原子力発電㈱が出資してリサイクル燃料備蓄センターをむつ市に建設した。この施設は、131m×62m×28m（高さ）の巨大な建屋である。図1にリサイクル燃料備蓄センターの概観を示す⁶⁾。最終的な貯蔵量は将来の建設予定も含めて、3棟で5,000 tUを想定しており、最長50年の貯蔵を予定している。現在、3,000 tU規模の貯蔵施設が建設されており、東京電力や日本原子力発電の原子力発電所使用済み核燃料を、乾式保管する予定である⁷⁾。

日本原子力燃料㈱乾式キャスクを図2に示す。金属キャスクは直径約2.4m、高さ約5.7mの金属製円筒状であり、ヘリウムを充填させた2重の金属容器である。使用済み核燃料は、臨界防止をし

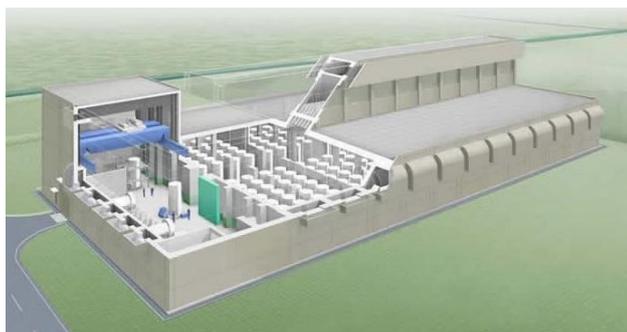


図1 リサイクル燃料備蓄センター概観

た上で、キャスク内に密封されている。内部からの漏洩防止のために、2重に蓋を設置し、蓋の間の圧力を監視することで、漏洩の有無を確認している。崩壊熱は、仕切り板から胴部へ、フィンで熱伝導で移動する。このキャスクを前述のリサイクル燃料備蓄センターで保管貯蔵する。キャスクは、崩壊熱により昇温するキャスク表面（胴体）温度と周囲空気温度との温度差を利用した自然対流により冷却される。床はコンクリート製であり、キャスクは支持構造物で固定されて持ち上げられているため、キャスクからの伝導伝熱による床の加熱は防がれているが、コンクリートの劣化を防ぐためにキャスク表面温度には60℃以下という制限があり、自然対流熱伝達の冷却能力からキャスクの発熱量は5kW以下であることが必要となる。その結果、7.5年以上の湿式保管期間が必要となる。世界を見ると、乾式キャスク保管は、野天で貯蔵している例や、コンクリートキャスクを用いる例も見受けられる。しかし、我が国の原子力に対する市民感情を考慮すると、今後も金属キャスクで密閉し、コンクリート建屋内で保管する方式になるであろうと推察する。

キャスクは、風通しが良く雨や雪が流入しないように設計された建屋内に垂直に設置され、周囲空気との自然対流熱伝達で冷却される。キャスク表面温度は60℃以下であることを期待しているため湿式保管を5年程度要しているが、この保管年数を減少させることが将来の原子力発電所再稼働に向けて直近の課題となる。しかし、湿式保管年数の短期化は、プール取り出し時点での使用済み燃料の崩壊熱発熱量が従来より増大することを意味し、空気との自然対流冷却のみでは、キャスク表面温度が上昇し過ぎてしまうことになるため、強制対流熱伝達等による新しい冷却システムが必要となる。

1.2 目的

本研究は、乾式キャスク内の発熱をヒートパイプで冷却ジャケットに集約してキャスク内温度を制御する新しい冷却システムの開発を目的

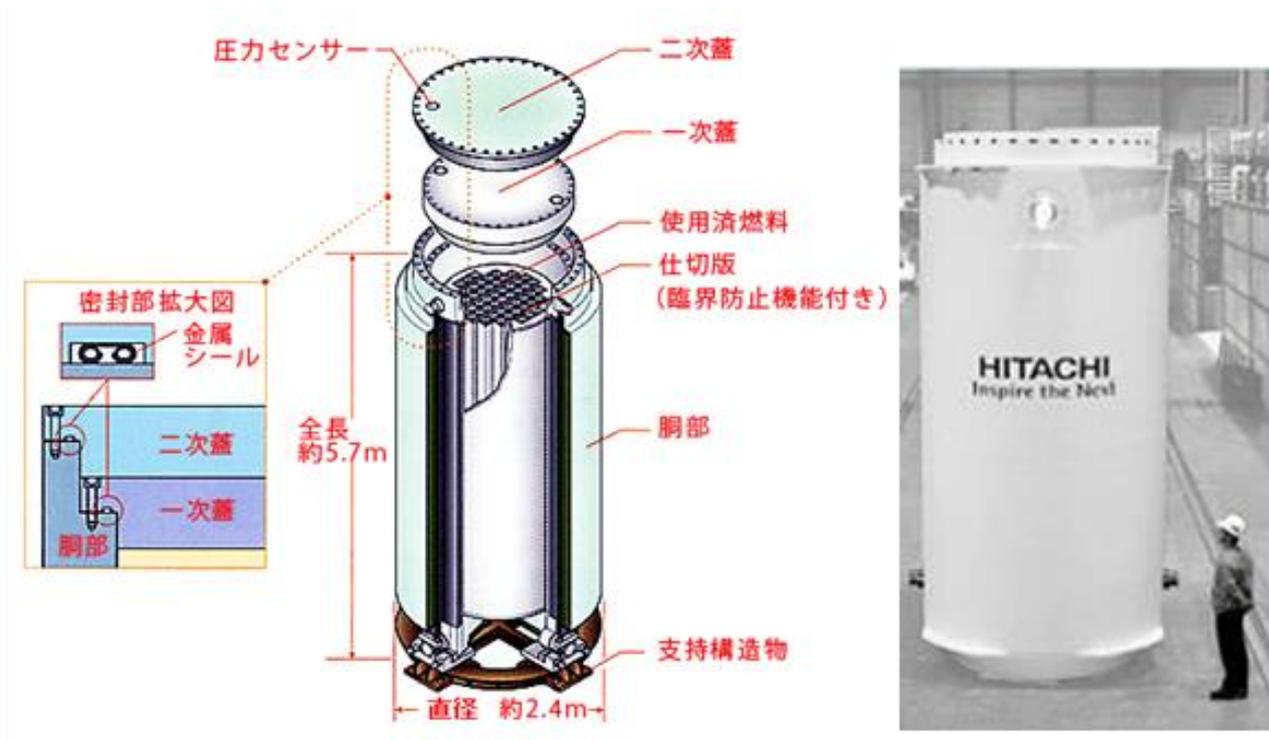


図2 日本原子力燃料貯蔵株式が導入する乾式キャスク^{8),9)}

【出典：左-日本原子力発電(株)、右-清水、他3名；日立評論 Vol.86.No.2(2004)】

とする。

ヒートパイプは、コンテナ内部にウィックとよばれる多孔質材料を設置して作動流体を封入したものであり、作動流体の蒸発と凝縮を利用して熱を移動させる伝熱素子である。コンテナ内部は飽和状態であり、コンテナ表面は蒸気圧に対応する温度となるため、熱を吸収して蒸発した蒸気が放熱部に移動する際の圧力損失が小さい場合は、ほぼ均一温度となる。現存する最も優れた伝熱素子であり、無重力状態でも動作するため宇宙用の電子機器冷却デバイスとして用いられている。重力場では、ウィックの毛細管圧力を利用できるため、パーソナルコンピュータのCPU冷却に代表される電子機器冷却にも用いられている。また、熱を下方から上方にのみ輸送できるため、ツンドラ地帯の地盤の永久凍土化、地下水熱を利用する道路融雪デバイス等に利用されている。ヒートパイプの熱輸送方向の温度は、小さな温度差で多量の熱を輸送できるため、多方面で実用化されている。

そこで本研究では、金属キャスクの内部にこのヒートパイプを設置し、使用済み核燃料の崩壊熱を、キャスク上部に設ける放熱部に輸送し、放熱部冷却を制御する手法を開発する。

これまで、使用済み核燃料の発熱量の経年変化からキャスク表面温度に及ぼす湿式保管年数の影響を検討し、自然対流冷却ではキャスク表面温度が60℃以下になるために7.5年以上の湿式保管年数が必要であることを示している。また、キャスク表面から周囲空気への熱伝達係数は、従来の垂直平板自然対流熱伝達の予測手法で求めた予測値と数値解析からの予測値がほぼ一致することを示した。さらに、使用済み燃料の崩壊熱は、湿式保管3年の崩壊熱は最大出力時の0.0062%、5年では0.0034%となることを示した¹⁰⁾。また、乾式キャスクは、高さ5.7m、直径2.4mであり¹¹⁾、1基当たり61体の燃料を貯蔵する。東通原発（燃料764体、最大出力3.3GW）を参照し、30℃雰囲気での自然対流冷却時のキャスク表面温度を計算すると、湿式保管3年は81℃、5年は57℃と

なる。そこで、キャスクから8kWの除熱を行うことができれば、湿式保管3年で乾式保管に移行できることになる^{10,12)}。

従来のキャスクは、使用済み燃料を2重の金属管で保存している。本システムは、内管表面に長さ4.4mの蒸発部を持つ長尺ヒートパイプを設置し、上部に配置する冷却水ジャケットに熱を輸送する。蒸発部には金網で製作する部分ウィックを設置し、使用済み燃料の熱でウィック内の作動液が蒸発することで吸熱する。蒸気は低温低圧の凝縮部に移動し、凝縮して冷却水ジャケットに排熱する。凝縮した作動液が重力により蒸発部に還流することで、作動流体の循環が形成される。冷却ジャケットに外部から冷却水を注入排出することで、冷却水およびキャスク温度を制御する。乾式キャスク1基に対し、長尺ヒートパイプをキャスク周方向に12本設置することを想定している。使用済み燃料の発熱量は、5年湿式保管で7.27kWが想定されるため、ヒートパイプ1本あたり600W以上の熱輸送能力が必要となる。

本研究では、長さ4.4mの長尺ヒートパイプを製作し、ヒートパイプを垂直に設置した場合の、内部に封入する作動液量の影響を実験的に検討した。また、CFDソフトを用いてヒートパイプ凝縮部の作動に十分な温度条件を確保するための冷却ジャケットの設計指針について検討した。

2. ヒートパイプの製作と実験および数値解析

2.1 長尺ヒートパイプの形状と最大除熱量の関係

(1) 長尺ヒートパイプの形状

本冷却システムは、キャスク内に長尺ヒートパイプを設置し、内部で発生する崩壊熱をヒートパイプで吸収して、上部の冷却ジャケットに集約し、冷却ジャケット内の冷却水を制御することによって、キャスクの表面温度を制御しようとするものである。ヒートパイプは4.4m、冷却ジャケットの高さは1m程度を考えている。内管

による十分な遮蔽を期待して、作動液や冷却水ジャケットの冷却媒体には水を用いることとする。

本システムは、リサイクル燃料備蓄センターのようなサイロ貯蔵に対応する技術であるが、貯蔵密度が高く積極的な熱除去を要する地下貯蔵（ボールド貯蔵）への応用にも展開が可能である。

(2) 実験装置

研究で製作した長尺ヒートパイプの実験装置を図3に示す。外径22mm、内径20mmの黄銅管をコンテナとし、ソケット継手で2mと2.4mのコンテナを連結している。上部には凝縮部を連結し、水冷ジャケットに冷却水を流すことで放熱している。図中に示す場所に29本の熱電対を設置しており、温度を計測できる。

ソケット継ぎ手とエンドキャップを図4に示す。ソケット継手の内壁にニトリルゴム製Oリング（1A-P22）を設置し、コンテナを気密している。最下部のエンドキャップもまた、内壁にOリング（1A-P22）を設置し、気密している。いずれもコンテナと同素材の黄銅棒を切削加工して製作している。

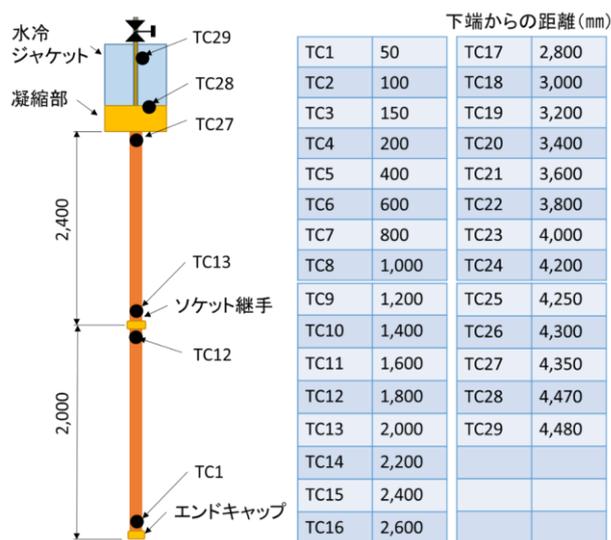


図3 実験装置



図4 エンドキャップ (左) とソケット継手 (右)

上部の凝縮部は、図5に示す組み立て式とし、コンテナをOリング(1A-P22)で連結密閉している。蒸気が凝縮する凝縮部内径は120mmであり、凝縮面積は $1.65 \times 10^{-2} \text{m}^2$ である。投げ込みクーラーと恒温槽で制御した 11°C の冷却水を水冷ジャケットにポンプで給水することで冷却した。恒温槽と水冷ジャケットは管を渡すことで、サイフォンの原理を用いて水面制御を行った。なお、ニトリルゴム耐熱温度は 100°C である。

製作したヒートパイプコンテナの外観を図6に示す。使用済み燃料は等熱流束発熱であることを考慮して、コンテナ外壁をジュール加熱している。コンテナ外壁は耐熱温度 200°C の日東電工製ニトリロン耐熱絶縁テープで絶縁し、幅3.2mm、厚さ0.14mmの鉄クロム電熱帯 ($2.86\Omega/\text{m}$) をピッチ5.3mmの1条巻きで設置し、同耐熱絶縁テープで固定した。電極には銅板を用いてホースバンドで固定した。電熱帯の隙間にシート型熱電対を長手方向に27点設置し、各点の温度を計測した。また、凝縮部表面 (TC28) および不凝縮ガス除去管 (TC29) にも熱電対を設置し、温度を計測した。

本研究室で開発した部分ウィックを図7に示す。ヒートパイプコンテナ内壁には、素線径0.073mm、厚さ0.150mmの100メッシュ平織り金網を高さ方向90mm、横方向70mmに切り出し、ピッチ100mm

で装着している。コンテナ内周は62.8mmであり、7mmほど2層が重なることになる。

筆者は、ヒートパイプのウィックに用いられる平織金網の目開きに形成されるメニスカスの破壊形態を解析し、実験値との比較から、1層の金網の最大毛細管圧力 $P_{c^*}^*_{1,est}$ を3%の精度で予測する次式¹³⁾を導出している。

$$P_{c^*}^*_{1,est} = \frac{4\sigma \cos(\theta - \alpha) \{-0.106(\theta - \pi) + 0.5\}}{(1 - D \cos \alpha)(d + w)} \quad (1)$$

ここで、 d 、 w 、 D 、 σ 、 θ 、 α はそれぞれ、素線径、目開き、無次元素線径 ($= d / (d + w)$)、表面張力、接触角、素線とメニスカスが接触する点の伏角であり、次式で与えられる。

$$\alpha = \theta - \sin^{-1}(D \sin \theta) \quad \text{at } \theta < \tan^{-1}(-1/D) \quad (2)$$

$$\alpha = \pi/2 \quad \text{at } \theta \geq \tan^{-1}(-1/D) \quad (3)$$

ステンレス鋼と水の接触角 θ は 8° であり、水の表面張力が 0.072N/m の場合、式(1)から、供試金網の最大毛細管圧力は 1.26kPa ($126\text{mmH}_2\text{O}$) となる。したがって、高さ方向90mmの部分ウィック全体の濡れを維持できることになる。

平織金網の幾何形状を図8に示す。金網は横線 (S-S) と縦線 (w-w) で曲がり率が異なる。素線形状を円弧の連続として解析すると、縦線、横線の開き角 ϕ_w 、 ϕ_s はそれぞれ次式で算出される。

$$R_w - R_w \cos \phi_w = \Delta_l / 2 - D / 2 \quad (4)$$

$$R_s - R_s \cos \phi_s = \Delta_l / 2 - \{(\Delta_l - 2D) + D / 2\} \quad (5)$$

$$R_w = 1 / (2 \sin \phi_w) \quad (6)$$

$$R_s = 1 / (2 \sin \phi_s) \quad (7)$$

$$\phi_w = 2 \tan^{-1}(\Delta_l - D) \quad (8)$$

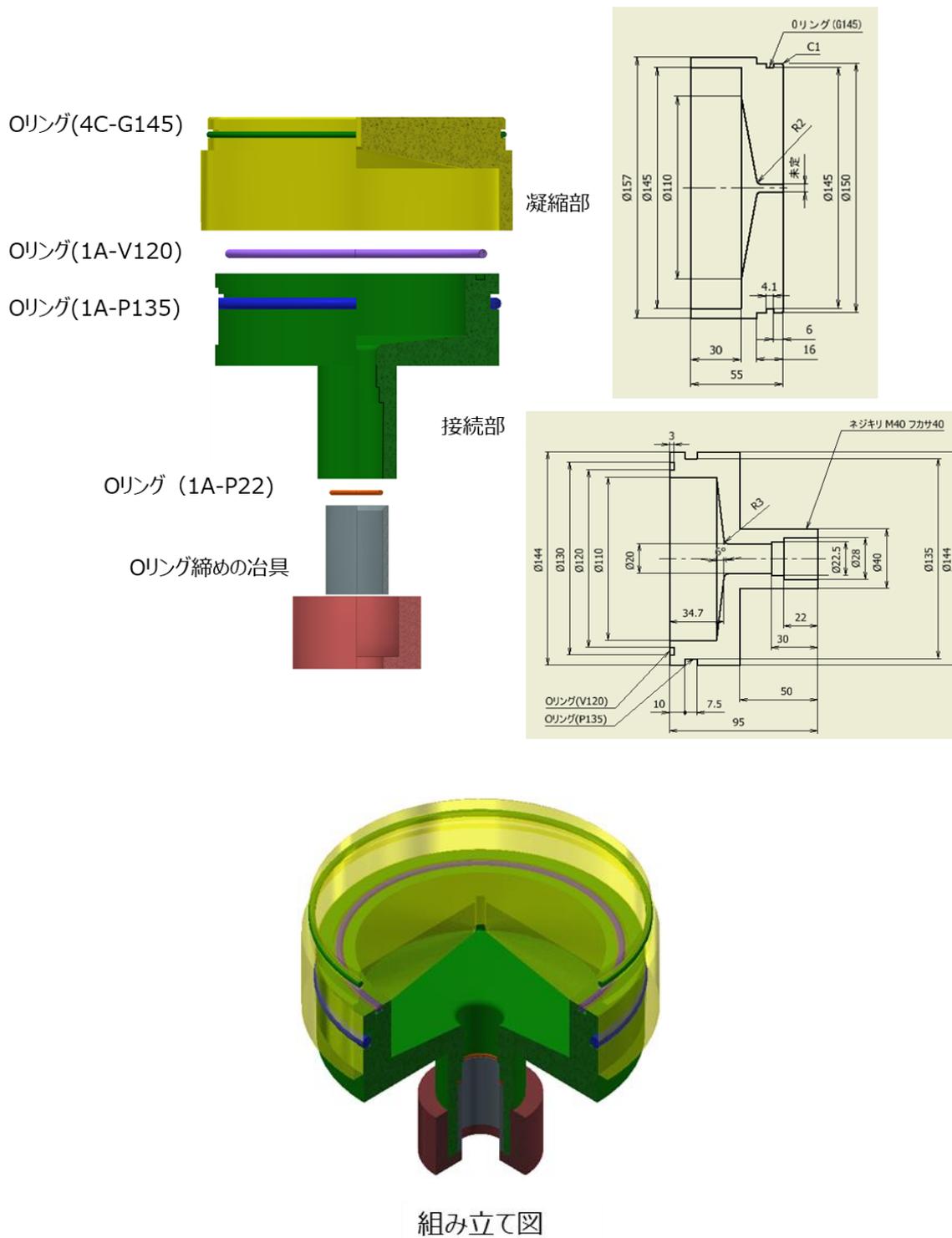
$$\phi_s = 2 \tan^{-1}(3D - \Delta_l) \quad (9)$$

したがって、曲り率 R_w 、 R_s はそれぞれ1.060、1.049となる。このことから金網1層の有孔率 (空隙率) ϵ_l は0.863と算出される。

42段の部分ウィックの孔体積は、1段に90×70の金網を使用していることから、34.2 mLとなる。

(3) 実験手法

本長尺ヒートパイプは4.4mであり、実験室内に設置できない。そこで、学内の1、2階吹き抜けとなっているピロティに装置を垂直方向に設置した。その様子を図9に示す。ヒートパイプは耐熱保温チューブで断熱したのち、塩ビ管で保護



組み立て図

図 5 凝縮部

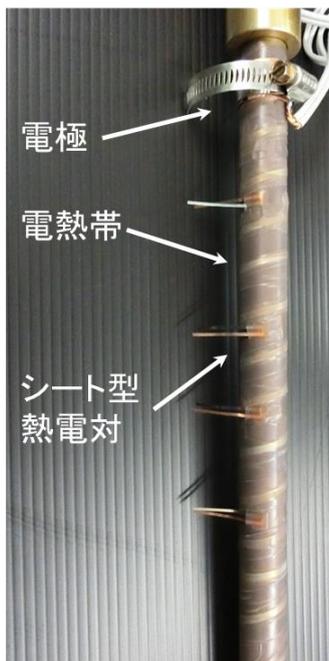


図6 実験装置の絶縁、ヒータ、熱電対

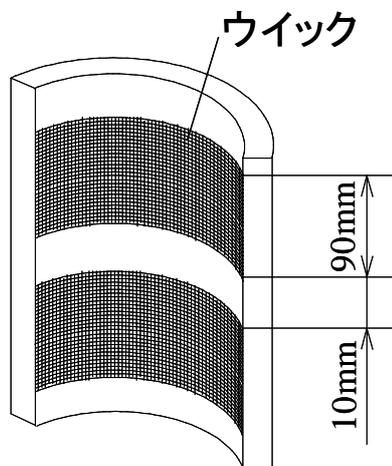


図7 部分ウイック

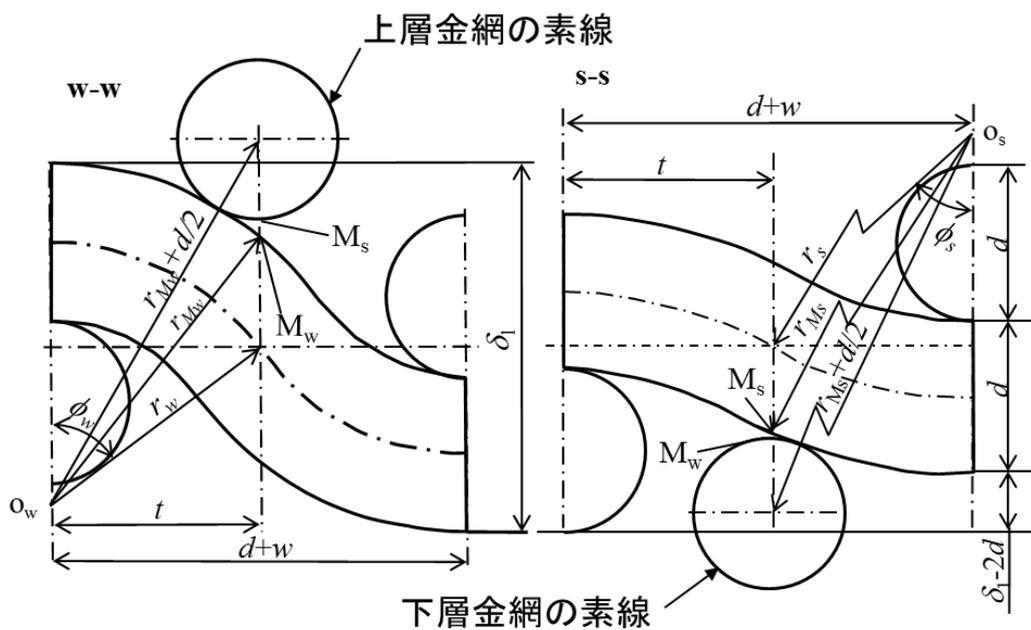


図8 金網ウイックの幾何形状



図9 実験装置外観



図10 データ計測システム

して、垂直に設置した。ヒートパイプの最下部は、木製の断熱板上で固定した。熱電対や電熱帯加熱用の電線は、塩ビ管に開けた穴を通して、2階の計測システムに連結した。

データ計測システムを図10に示す。熱電対はデータロガー（GR3000）で計測した。電熱帯にはポットスライダで電力を供給した。なお、供給電力はポットスライダ電極間の電圧を計測し、抵抗値から算出した。凝縮部には投げ込みクーラーと恒温槽で温度制御した冷却水を冷却ジャケットにポンプ輸送した。冷却水の恒温槽への還流は、塩ビパイプによるサイフォンの原理を利用した。ヒートパイプ内部には作動液が封入されているため、ヒートパイプ内の不凝縮ガスは、循環水に氷を入れることで0℃にした

アスピレーターを利用し、凝縮部上部に設けたバルブから除去した。

実験は以下の手順で行った。

- ①計量した作動液（蒸留水）を凝縮部上部のバルブからシリンジで注入
- ②凝縮部上部から、アスピレーターで不凝縮ガスを吸引除去
- ③凝縮部に11℃の冷却水を循環
- ④電熱帯にポットスライダから所定の電圧で電力を供給
- ⑤30分間放置し、定常状態を確認したのち、供給電力を増加
- ⑥ヒートパイプ各部の温度を監視し、一部が110℃を越す電力、あるいはポットスライダによる供給電力が900Wになるまで⑤を繰り返す

(4) 結果と考察

実験は100Wずつ加熱量を増加させ、30分間放置することを繰り返し、一部が装置の耐熱温度110℃を超えるまで、あるいはポットスライダの最大供給電力900Wを超えるまで行った。これらの実験を、作動液量を40、50、60、70mLについて行った。

各作動液量の場合の100W加熱開始時の各部の温度経時変化を図11に示す。ヒートパイプは、長さ4.4mであり垂直に設置している。ヒートパイプには図4に示した29か所の温度計測点がある。そこで、最下部0.05m (TC1) と下部0.2m (TC4) から1mおきに上部4.2m (TC24) の位置の温度変化で代表して示している。また、各図の縦軸は各部温度と凝縮部温度 (TC28) の温度差で示している。

作動液量40mLの場合、ウィックを濡らす液量が34mLのため、蒸発して凝縮部で凝縮し、蒸発部に還流する液量が6mLとなる。位置1.2m (TC9) の温度が加熱開始直後から上昇しているが、開始10分後には温度が下降し、15分後には全体が同一温度になっている。これは、循環液量が少ないため、凝縮液が位置1.2mに到達する時間差によると考えている。

作動液量50mLの場合も位置1.2mが加熱開始10

分後から上昇している。40mLと同様である。

一方、60mL、70mLの場合、最下部位置0.05m (TC1) や下部位置0.2m (TC4) の温度が低い。これは、実験開始時の周囲気温が凝縮部温度より低かったのが原因である。ヒートパイプ内部は飽和状態であり、蒸気圧力は温度と対応するため、ウィックから蒸発した蒸気の一部は、上部の凝縮部ではなく下部を温めるために移動することになる。作動液は重力を利用して還流するため、下部に液だまりが生じて、循環作動液量が減少することになる。0.05m、0.2m位置の温度が、加熱によって徐々に上昇することで、凝縮部に移動する蒸気が増加し、温度均一の方向に変化している。

熱輸送限界に及ぼす作動液量の影響を図12に示す。横軸軸は加熱量、縦軸は各点の温度に加えて凝縮部温度 (TC28) を示している。作動液量40mLの場合は、500Wから600Wに加熱量を増加させると、位置0.12mでドライアウトし、100°Cを超えてしまった。作動液量50mLの場合も700Wから800Wに加熱量を増加させると、位置0.12mドライアウトした。

一方、60mL以上の場合は、加熱開始時は最下部0.05mの温度が低いが、加熱量を増加させると、最下部への加熱に加えて蒸気流で熱供給され、加熱量が200Wのデータではヒートパイプ全体が同一温度となり、ヒートパイプ表面から凝縮部に熱が正常に輸送されていることが分かる。

本システムの目標は、800W以上の熱輸送限界を持つヒートパイプの開発である。本研究により、内径20mmのヒートパイプに100メッシュ平織金網の部分ウィックをピッチ100mmで設置し、封入する作動液量を70mLとすれば、乾式キャスクから発生する熱を冷却ジャケットに輸送できることが分かった。

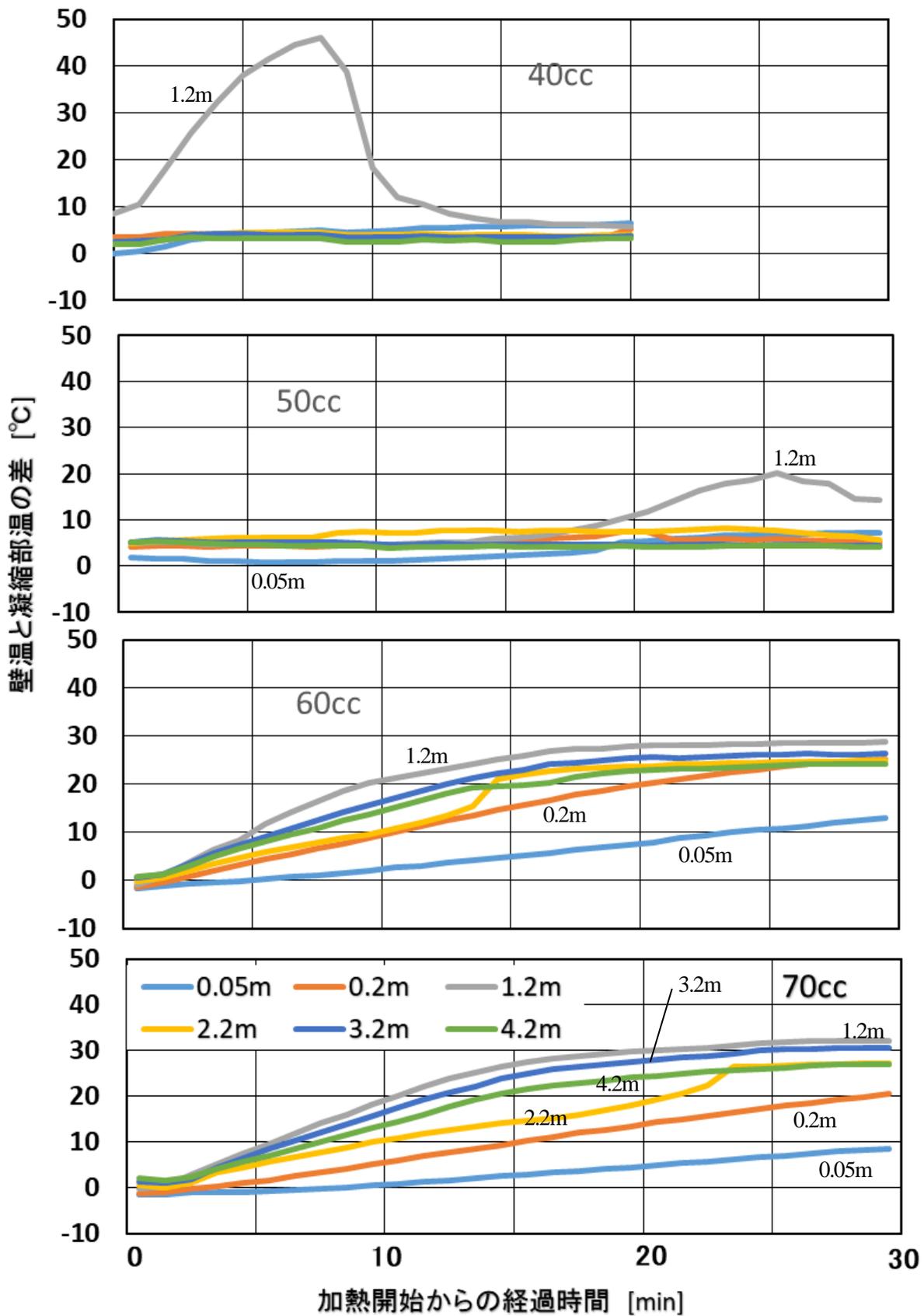


図 11 100W 加熱開始時の温度経時変化に及ぼす作動液量の影響

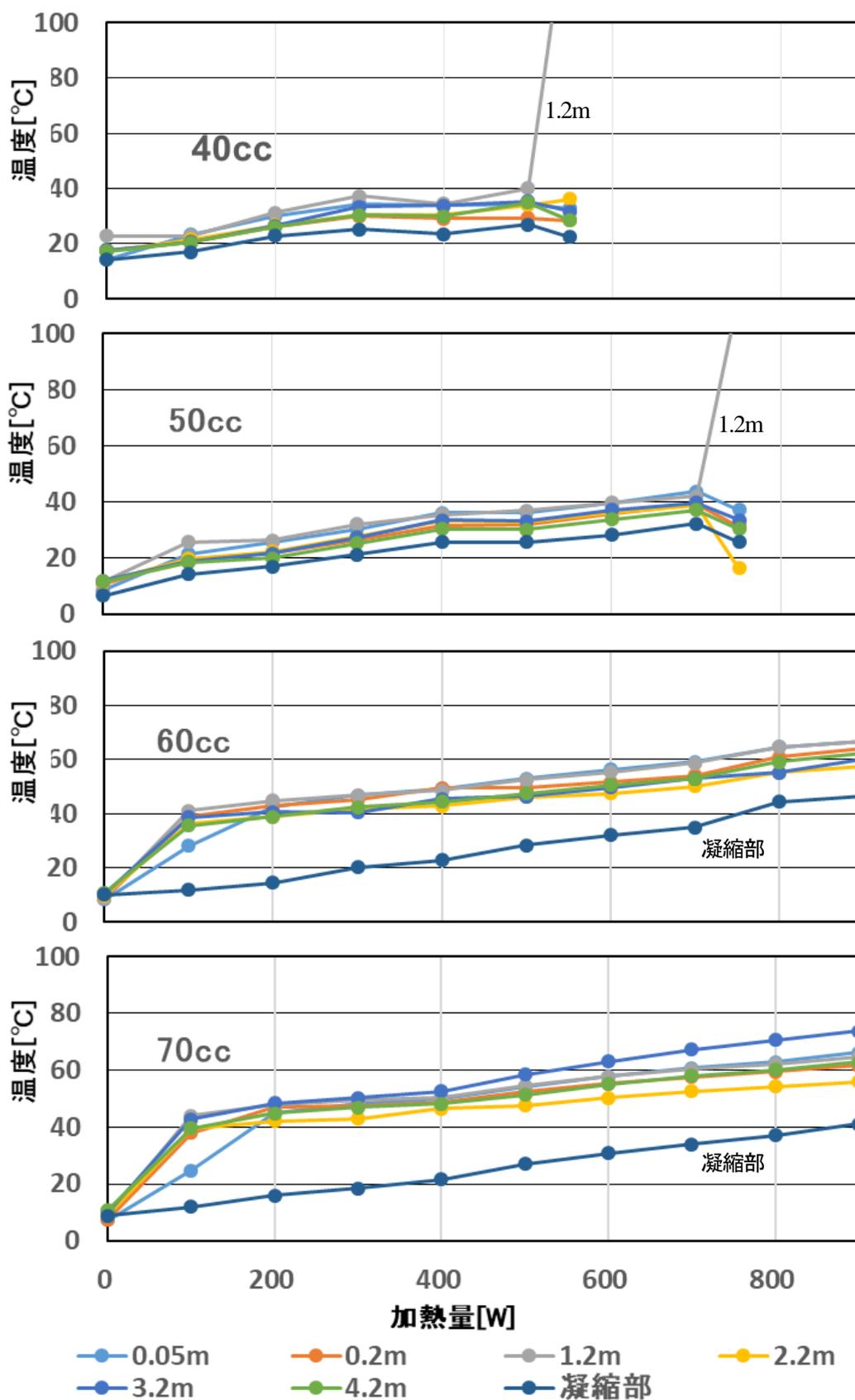


図 12 熱輸送限界に及ぼす作動液量の影響

2.2 CFD ソフトを用いたヒートパイプ凝縮部の除熱設計

(1) 解析条件

本節では、2.1節で述べたキャスク内にヒートパイプと冷却ジャケットを配置した新たな冷却システムに関し、冷却ジャケット内におけるヒートパイプ凝縮部の除熱能力についてCFDソフトを用いて数値解析し、冷却部の設計指針を得ることを目的として検討を行った。数値解析には、市販の熱流体解析ソフトSTREAM（株式会社ソフトウェアクレイドル）を使用した。

解析対象としたモデルの代表例を図13に示す。本モデルは、周囲6面を冷却ジャケット壁（長さ7479mm、幅300mm、高さ750mm）に囲まれており、その内部に発熱体であるヒートパイプ凝縮部（高さ500mm、直径22mm、発熱量1kW/1本）が、その中心間隔を577mmとして12本配置されている系である。本来は、使用済み燃料を囲む形でヒートパイプが円形に配列されるはずであるが、ここでは単純化のためにヒートパイプを直線状に配置した。

解析は、固体であるヒートパイプ凝縮部とその周囲の冷媒の流れ及び温度を対象として3次元定常解析を行った。また、冷却ジャケット内の冷媒は空気または水で満たした場合を検討し、自然対流による冷却と強制対流による冷却を検討した。

解析ソフトで設定した基本的な条件を以下に示す。

（熱に関する条件）

- ・初期温度：30℃
- ・冷却ジャケット壁面温度（底面以外）：30℃
- ・冷却ジャケット底面温度：60℃（キャスクの温度を考慮）
- ・流体と固体の境界：熱伝達条件（温度対数側）

（流れに関する条件）

- ・乱流：標準k-εモデル（高レイノルズ数）
- ・X_{min}面（冷却ジャケット入口）：ノースリップ条件（壁面上で流体速度はゼロ）または流入速度規定
- ・X_{max}面（冷却ジャケット出口）：ノースリップ条件（壁面上で流体速度はゼロ）または自然流出条件
- ・Y_{min}面（冷却ジャケット側面）：ノースリップ条件（壁面上で流体速度はゼロ）
- ・Y_{max}面（冷却ジャケット側面）：ノースリップ条件（壁面上で流体速度はゼロ）
- ・Z_{min}面（冷却ジャケット底面）：ノースリップ条件（壁面上で流体速度はゼロ）
- ・Z_{max}面（冷却ジャケット上面）：ノースリップ条件（壁面上で流体速度はゼロ）
- ・空気と固体表面の境界：ノースリップ条件（固体表面での流体速度はゼロ）

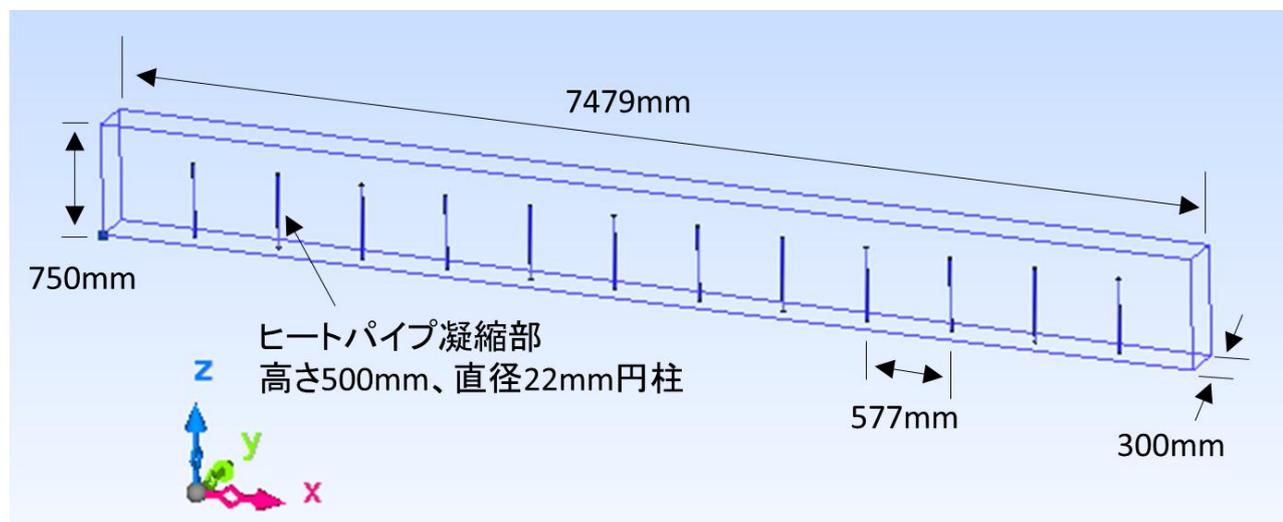


図13 解析対象モデル

解析に用いた各部品の材質および物性値を下記に示す。

- ・ヒートパイプ凝縮部：ステンレス鋼SUS405
 - 密度 : 7800 kg/m³
 - 比熱 : 460 J/(kg·K)
 - 熱伝導率: 27 W/(m·K)
- ・冷却ジャケット内冷媒：空気 (非圧縮性)
 - 密度 : 1.206 kg/m³
 - 粘性係数: 1.83 × 10⁻⁵ Pa·s
 - 比熱 : 1007 J/(kg·K)
 - 熱伝導率: 0.0256 W/(m·K)
 - 体膨張率: 3.495 × 10⁻³ K⁻¹
- ・冷却ジャケット内冷媒：水 (非圧縮性) 20°C
 - 密度 : 998.2 kg/m³
 - 粘性係数: 1.016 × 10⁻³ Pa·s
 - 比熱 : 4183 J/(kg·K)
 - 熱伝導率: 0.5991 W/(m·K)
 - 体膨張率: 2.2544 × 10⁻⁴ K⁻¹

(2) 冷媒を空気として自然対流冷却を行った場合

まず、冷却ジャケット内の冷媒を空気とした場合の解析結果を図14に示す。なお、本条件での解析においては、図13で示した解析対象モデルにおいて冷却ジャケット高さを1500mmとし、冷却ジャケットの壁面は底面以外考慮せず、外気の流入流出がある条件で検討を行った。これは、冷却ジャケットを設置せず、単にヒートパイプ凝縮部が外気中に露出している条件に相当する。解析結果より、ヒートパイプ側面を空気が上昇していくことにより熱が奪われ、そのまま上方に流れていくことがわかる。温度境界層は10mm程度で空気のおよそほとんどの部分は環境温度である30°Cのままであるが、ヒートパイプ凝縮部の最大温度は1304°Cとなってしまう、冷却システムとして不十分であることがわかった。

(3) 冷媒を空気として強制対流冷却を行った場合

(2)節で、空気による自然対流冷却では除熱量が不足することがわかったので、ここでは冷却ジャケット内の空気を流通させ、ヒートパイプ凝縮部を強制対流により冷却する系を解析した。

(2)節では冷却ジャケットを考慮しない条件であったが、ここでは図13の解析対象モデルで解析した。図13において左端の面から30°Cの空気を5m/sの流速で流し、12本のヒートパイプ凝縮部を冷却した空気は右端に流出する系である。

解析結果を図15に示す。強制的に空気を流したことにより、温度場、流れ場の様相は自然対流冷却の場合とかなり異なっており、ヒートパイプ後方には熱を奪った空気による高温部が形成されている。しかし、強制対流冷却を行ったこの場合でもヒートパイプ凝縮部の最大温度は484°Cとなり、必要な除熱量が得られない結果となった。ここまでの結果から、冷媒を空気として冷却するシステムは実用上、無理があると考えた。

(4) 冷媒を水として自然対流冷却を行った場合

(2)節、(3)節の検討により、空気を冷媒としたヒートパイプ凝縮部の除熱は困難であると考えられたため、次に冷媒を水として検討を行った。本解析では、図13のモデルにおける冷却ジャケット内に冷媒である水を満たして密閉し、自然対流のみで冷却した場合を検討した。

解析結果を図16に示す。冷媒を空気から水に代えた結果、ヒートパイプ凝縮部の最大温度は70.5°Cまで大幅に減少した。冷却水を流通せず、冷却ジャケット内に満たしただけの系であるが、空気より熱伝達率の良い水が冷却ジャケット内で循環し、ヒートパイプ凝縮部から奪った熱をジャケット上面および側面に放熱することで大きな熱移動が生じたと考えられる。

しかし、著者らがヒートパイプ凝縮部の作動に想定している温度は55°Cであり、この冷却条件でもまだ十分な冷却性能であるとはいえない。

(5) 冷媒を水として強制対流冷却を行った場合

(4)節の検討により、冷却ジャケット内の冷媒を水とした場合には、ヒートパイプ凝縮部の除熱能力が空気を冷媒とした場合よりも顕著に向上することが確認できた。しかし、それでもなお目標とするヒートパイプ凝縮部の作動温度に達していないため、冷媒を水とした強制対流による冷却を検討した。本解析は、図13のモデル

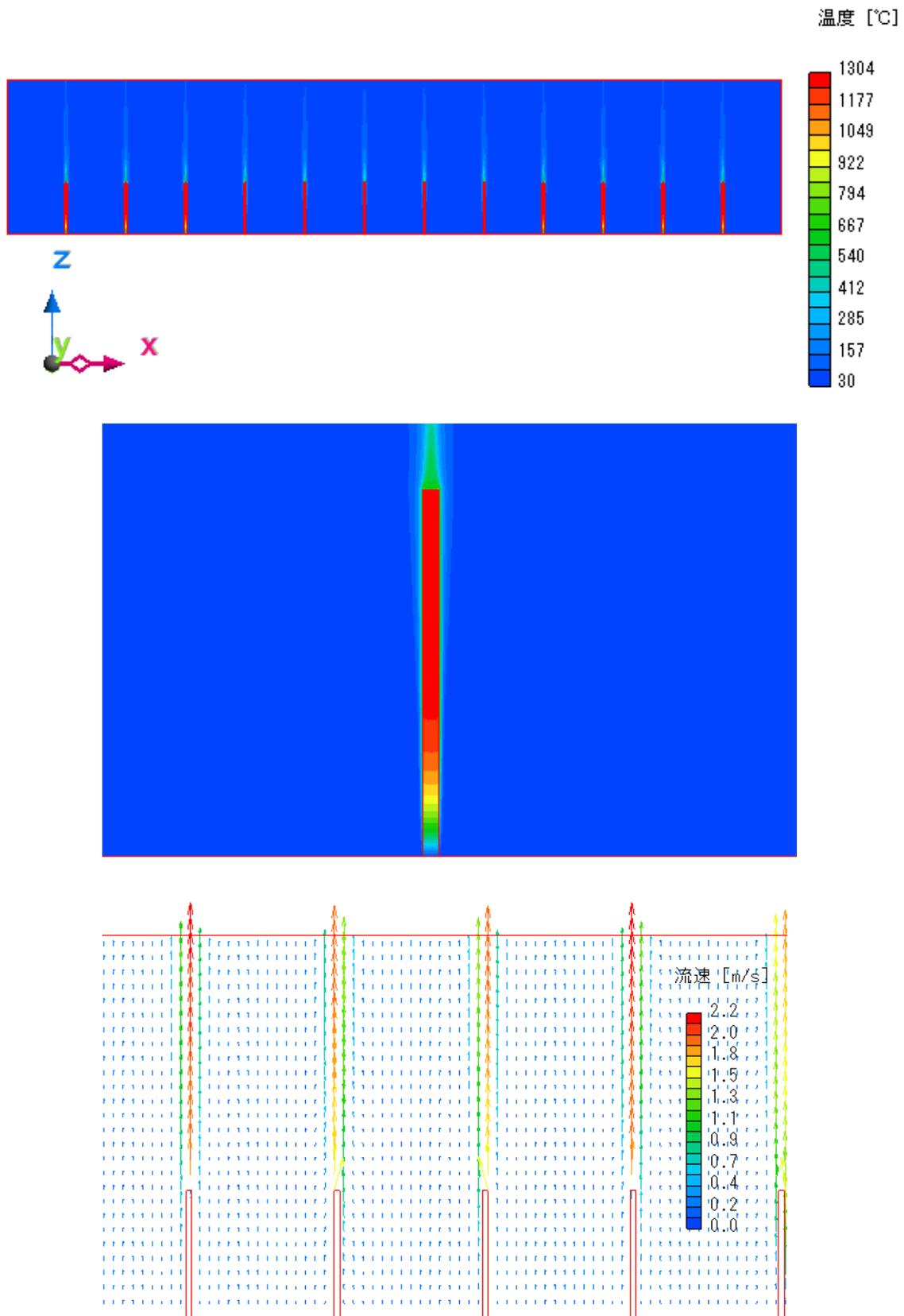


図 14 空気による自然対流冷却 (凝縮部 500mm)

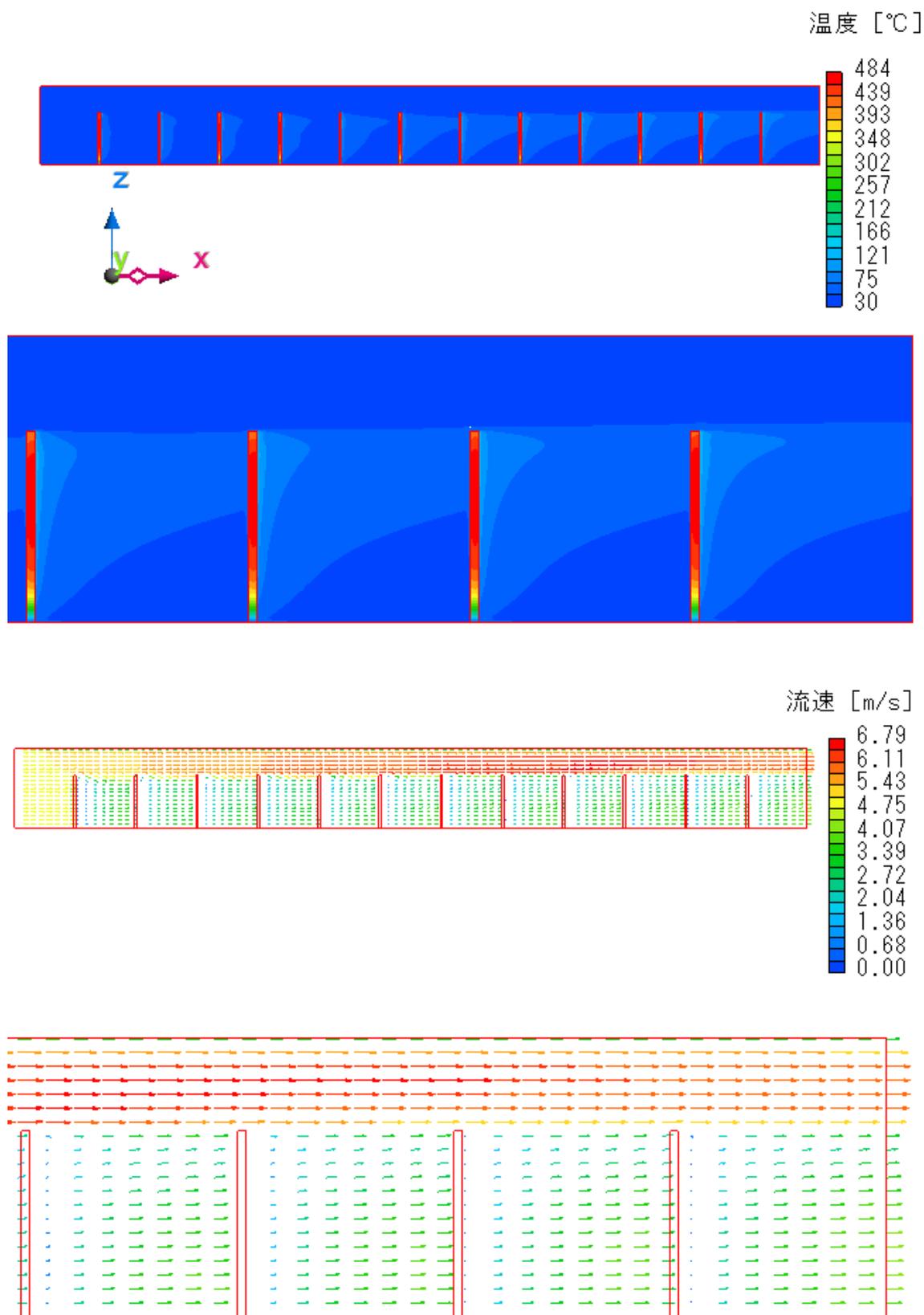


図 15 空気による強制対流冷却 (凝縮部 500mm)

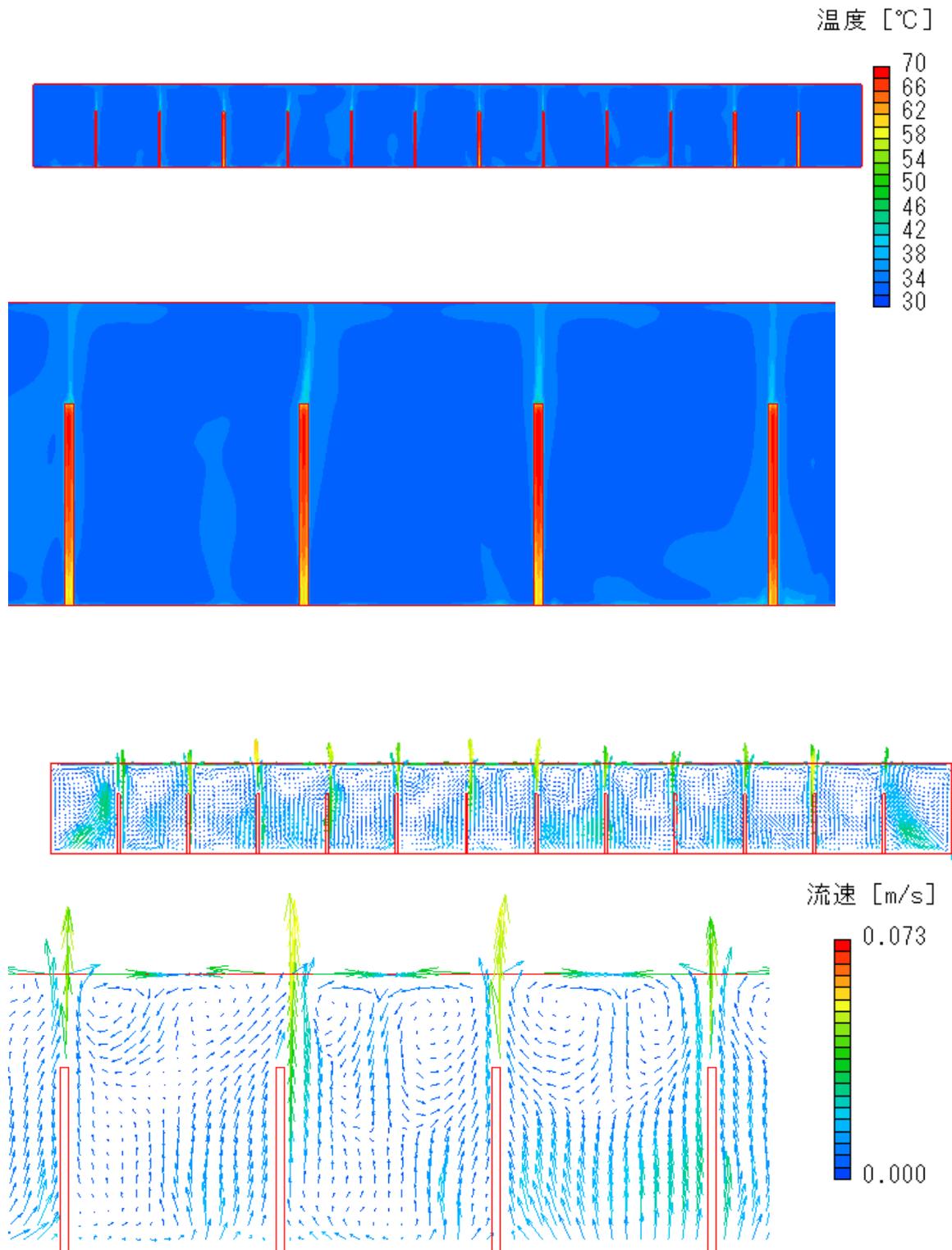


図 16 水による自然対流冷却 (凝縮部 500mm)

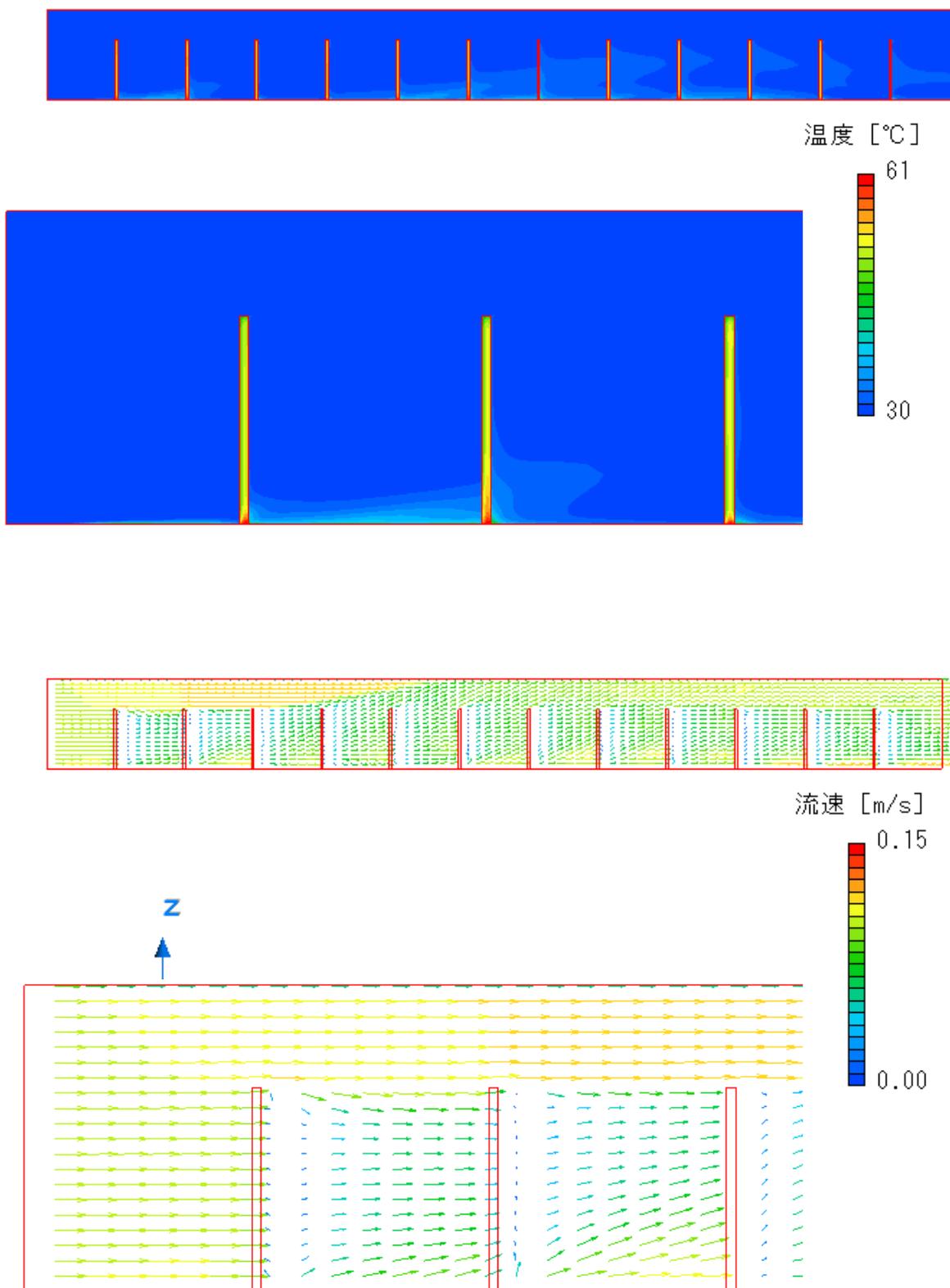


図 17 水による強制対流冷却 (凝縮部 500mm)

において左端の面から 30°Cの水を 0.1m/s の流速で流入させ、右端の出口から流出させる系である。解析結果を図 17 に示す。本解析より、ヒートパイプ凝縮部は底面（キャスク表面温度として 60°Cに設定）を除くほぼ全体で目標とする作動温度である 55°Cを下回る結果となり、これは 12 本のいずれの凝縮部においても同様であった。これにより、水を冷媒として流通させることで、ヒートパイプ凝縮部の作動に必要な温度環境を設計可能なことが示された。

(6) 冷媒を水として自然対流冷却を行う場合におけるヒートパイプ凝縮部の長尺化

(5)節の検討により、冷媒として水を用いて強制対流冷却を行うことで、ヒートパイプの作動に必要な冷却系を設計できる可能性が示された。しかし、水を冷媒として流通させるためには、冷却ジャケット通過後の水を冷却するシステムが必要であり、その結果システムが大型化、複雑化してしまう。また、なにより冷媒を流動させるための動力が必要となり、停電時など緊急時にはシステムの維持が困難となる。

そこで本節では、前節までの検討で500mmとしていたヒートパイプ凝縮部を長尺化して冷媒との伝熱面積を増大させ、水を流通させることなく自然対流のみで凝縮部の作動目標温度である 55°Cを保てないか検討した。なお、ヒートパイプ凝縮部を長尺化した場合でも、凝縮部の発熱量は1本あたり1kWであるとした。

ヒートパイプ凝縮部を700mmとした場合、凝縮部長さが500mmであったときに最大温度が70.5°Cであったものが、62.3°Cまで低下した。しかし、凝縮部の大部分は55°C以上と凝縮部の作動温度を越えてしまっており、十分な冷却は得られない結果となった。

そこで、ヒートパイプ凝縮部をさらに長尺化して1000mmとした場合を検討した。この場合には、図 13 で示した冷却ジャケットの高さを 1200mmまで拡張した。解析結果を図18に示す。この場合には12本いずれの凝縮部もキャスク近傍の底面付近を除く大部分が50°C以下となり、凝縮部の作動条件を十分に満足できる結果が得られ

た。

3. 結言

湿式保管5年の使用済み核燃料を乾式キャスク貯蔵する際の1基当たりの発熱量を7.3kWとし、長尺ヒートパイプ12本を周方向に設置した場合のヒートパイプの熱輸送について、熱輸送限界に及ぼす作動液量の影響を実験的に検討した。また、CFDソフトを用いてヒートパイプにより輸送された熱を排熱するための冷却ジャケットの設計について検討した。

その結果、以下の知見を得た。

1. 内径20mm、長さ4.4mの長尺ヒートパイプの場合、作動液量を70mL以上封入すれば、900W以上の熱を輸送できる。
2. 動作開始直後は、ヒートパイプ内で蒸発する蒸気が、温度均一化に向けて移動するため、一部でドライアウトの可能性はあるが、20分程度で全体の温度が均一化される。
3. ヒートパイプ凝縮部の除熱に関しては、空気に抛る場合は強制冷却でも困難である。冷媒に水を用いた場合、凝縮部を一定以上の長さにするにより、冷却水を循環させる動力がなくても、冷却ジャケット内の自然対流冷却のみで十分な除熱性能が得られる。

本冷却システムを導入することによって、除熱能力を安全に簡便に増大できるため、原子炉建屋内核燃料プールにおける貯蔵期間を大幅に短縮できる可能性が示された。また、排熱を回収し有効利用することも可能であることから、温水製造、冷暖房や寒冷地の融雪等の熱源として利用可能であり、電力生産後のカスケード利用プロセスとして副次的に省エネルギー化に寄与できる可能性もある。

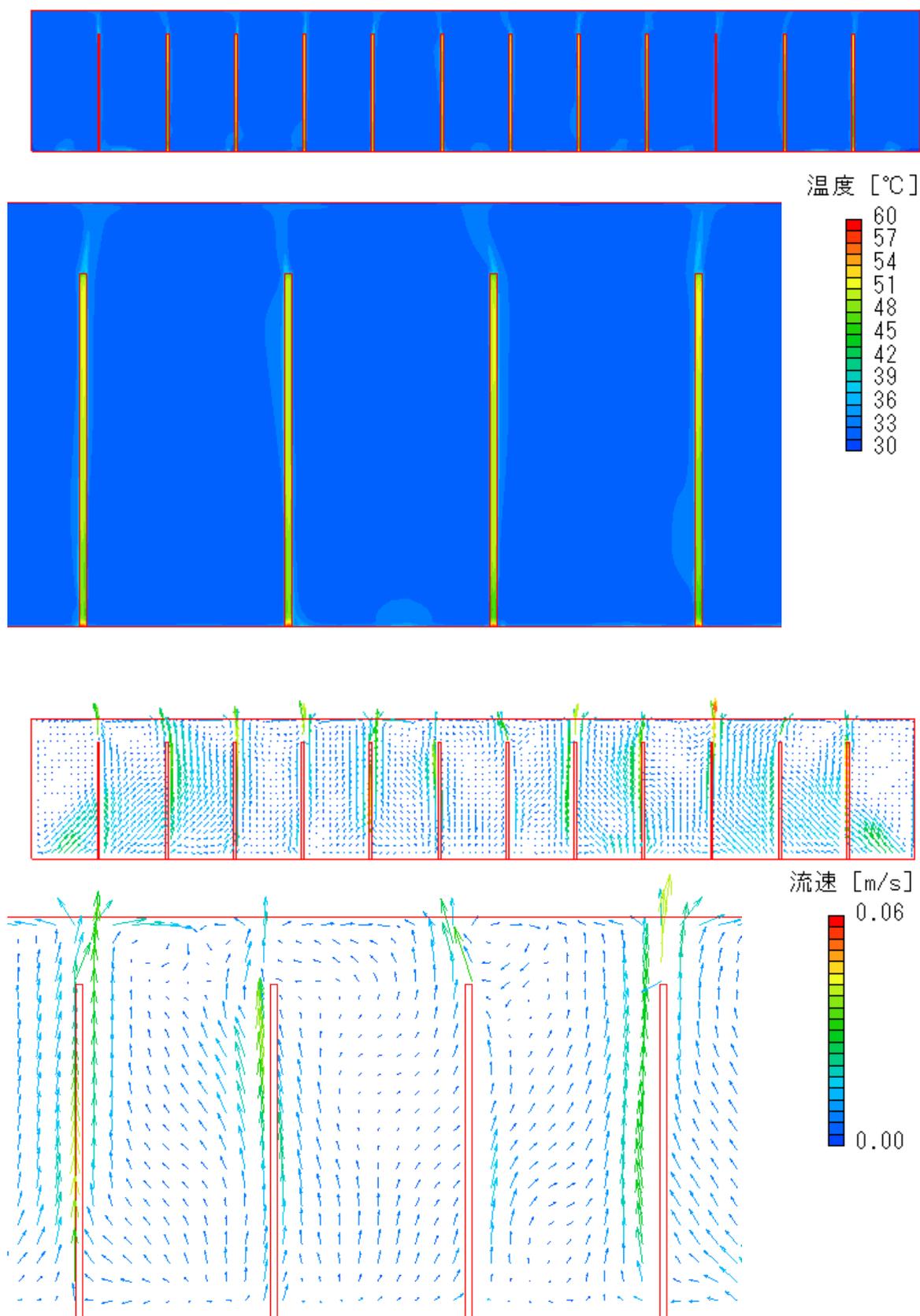


図 18 水による自然対流冷却 (凝縮部 1000mm)

記号

- D : 金網の無次元線径 [-]
 d : 金網の素線径 [m]
 $p_{c*,l,emp}$: 最大毛細管圧力 [Pa]
 w : 金網の目開き [m]
 α : メニスカスと素線の接点の伏角 [rad]
 ε : 金網の空隙率 [-]
 θ : 接触角 [rad]
 σ : 表面張力 [N/m]

参考文献

- 1) デーリー東北新聞、2016年11月23日
- 2) デーリー東北新聞、2016年12月6日
- 3) 日本経済新聞、<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO42438560U9A310C1CR0000/>
(2019年12月9日アクセス)
- 4) 東奥日報新聞、2019年1月23日
- 5) 東京新聞、2012年9月24日
- 6) リサイクル燃料貯蔵株式会社ホームページ
<http://www.rfSCO.co.jp/company/business.html>
(2019年12月9日アクセス)
- 7) 日本原子力発電株式会社ホームページ
<http://www.japc.co.jp/project/cycle/bichiku.html>
(2019年12月9日アクセス)
- 8) 日本原子力発電株式会社ホームページ
<http://www.japc.co.jp/project/cycle/drycask03.html>
(2019年12月9日アクセス)
- 9) 清水、他3名；日立評論Vol.86,No.2(2004)
- 10) 野田英彦、小林正樹、「放射性廃棄物の除去システムの検討(2)」、東北放射線科学センター受託研究報告書、p.12 (2018)
- 11) 日本原子力発電株式会社ホームページ
<http://www.japc.co.jp/project/cycle/drycask03.html>
(2019年12月9日アクセス)
- 12) 野田翔平、清水貴博「長尺ヒートパイプを利用する乾式キャスク冷却システムの開発」、H29年度卒業研究論文(2018-3) p.10
- 13) H. Noda, M. Kumagai, "Effect of Mesh Shape on Maximum Capillary Pressure of Plain Weave Screen", Heat Pipe Science and Technology, pp.115-119 (1999)

要 旨

原子力発電所から排出された使用済み核燃料は、リサイクル処理がなされるまでの間、燃料プール内で湿式保管がなされている。しかし、その保管容量は使用済み核燃料の排出量に満たないため湿式保管期間の短縮化が必須となっており、金属性キャスクを用いた空気中での乾式保管への移行が進みつつある。しかし、湿式保管期間の短縮は、燃料プール取り出し時点における崩壊熱による発熱が従来より増大することを意味しており、従来の自然対流冷却に代わる新たな冷却システムが必要となる。本研究では、乾式キャスクに対して長尺ヒートパイプを用いた新たな冷却システムを検討し、十分な熱輸送能力を有するヒートパイプの開発を行った。また、数値シミュレーションにより、ヒートパイプで集約した熱を除熱するための設計指針について検討を行った。

キーワード: ヒートパイプ、使用済み核燃料、中間貯蔵、乾式キャスク、自然冷却、強制冷却