

1. 発明の名称

核融合炉ダイバータ用改良型ヘリカルナット冷却システム

2. 技術分野

[0001]

本発明は、核融合炉のダイバータ冷却システムに関し、特にヘリカルナット表面を有する冷却管を用いた高熱流束除去システムに関する。より詳細には、本発明は、核融合炉ダイバータにおいて発生する $20\text{MW}/\text{m}^2$ を超える高熱流束を効率的に除去するための、機械的タッピングにより製造されるヘリカルナット表面冷却管と、その最適な冷却条件および構造的信頼性を確保するための技術に関する。さらに具体的には、本発明は、ヘリカルナット表面冷却管とタングステンアーマ材との接合技術、熱応力緩和層の構成、冷却媒体の最適制御方法、およびモジュラー設計による保守性向上に関する技術に関するものである。

3. 背景技術

[0002]

核融合炉は、重水素と三重水素の核融合反応を利用して、安全かつクリーンなエネルギーを生成する次世代エネルギー源として期待されている。核融合反応では、重水素と三重水素が融合してヘリウムと中性子を生成し、そのプロセスで大量のエネルギーが放出される。このエネルギーは最終的に熱に変換され、従来の発電システムを用いて電力を生成することができる。核融合炉は、燃料資源の豊富さ、二酸化炭素排出量の低減、放射性廃棄物の少なさなど、多くの利点を有している。

[0003]

核融合炉内では、プラズマが磁場によって閉じ込められ、高温・高密度状態が維持される。トカマク型核融合炉では、トロイダル磁場とポロイダル磁場の組み合わせによってプラズマを閉じ込める。プラズマの温度は1億度以上に達し、この高温プラズマから発生する熱の一部はダイバータと呼ばれる部分に集中的に負荷される。ダイバータは、プラズマ中の不純物や核融合反応で生成されたヘリウムを排出する役割を担っており、最大 $20\text{MW}/\text{m}^2$ という極めて高い熱流束に曝される。この熱流束は、一般的な原子力発電所の燃料棒が受ける熱流束(約 $1\text{--}3\text{MW}/\text{m}^2$)の約10倍に相当する。このため、ダイバータの冷却システムには、高い熱除去性能が要求される。

[0004]

従来のダイバータ冷却システムとしては、平滑管、スワール管、ハイパーバポロン等が提案されている。平滑管は構造が単純で製造が容易であるが、熱除去性能に限界がある。特に、サブクール沸騰条件下での熱限界(臨界熱流束)が低いため、高熱流束環境下での使用には適していない。スワール管は、内部にテープ状の突起物を挿入することで流体に旋回成分を与え、熱伝達を促進するものである。スワール管は平滑管と比較して熱除去性能が向上するが、圧力損失が大きいという欠点がある。また、テープ状突起物の挿入作業が複雑であり、製造コストが高くなる傾向がある。

[0005]

ハイパーバポロンは、内部に複雑なフィン構造を持ち、高い熱除去性能を示す。フィン間の空間で発生する蒸気泡が、冷却媒体の混合を促進し、熱伝達を向上させる。ハイパーバポロンは、ITER(国際熱核融合実験炉)のファーストウォール冷却に採用されているが、製造が複雑で高コストであるという課題がある。また、フィン構造の最適化が難しく、設計に高度な専門知識が必要となる。

[0006]

近年、ヘリカルナット表面(以下、HNSと称する)を有する冷却管が、高い熱限界性能を示すことが報告されている。HNS冷却管は、内部にらせん状の突起構造(ナット状構造)を持ち、この構造により流体に旋回成分が付与され、熱伝達が促進される。HNS冷却管は機械的タッピングにより比較的容易に製造可能であり、スワール管やハイパーバポロンと比較して、製造の容易さと熱除去性能のバランスに優れている。

[0007]

HNS冷却管の熱限界特性に関する研究では、サブクール沸騰条件下で $10\text{MW}/\text{m}^2$ を超える熱流束を除去できることが報告されている。また、HNS冷却管の内部構造によって、流体の混合が促進され、核沸騰熱伝達が強化されることも明らかにされている。さらに、HNS冷却管の熱限界は、冷却媒体の圧力、質量流束、サブクール度などの運転条件によって変化することも報告されている。特に、サブクール度(冷却媒体の飽和温度と実際の温度の差)が大きいほど、熱限界が向上することが知られている。

[0008]

また、核融合炉ダイバータ用冷却システムにおいては、冷却管とプラズマに直接面するアーマ材(一般的にはタングステン)との接合技術も重要である。タングステンは、高い融点(約 3400°C)と低いスパッタリング率を有するため、プラズマに直接面する材料として適している。しかし、タングステンは熱伝導率が比較的低く(約 $170\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)、また脆性材料であるため、熱応力による破損が懸念される。

[0009]

従来は、ろう付けや高温等方圧加工(HIP)処理などの方法が用いられてきたが、冷却管とアーマ材の線膨張係数の差による熱応力が問題となっている。特に、銅合金製の冷却管(線膨張係数約 $17\times 10^{-6}/\text{K}$)とタングステン製のアーマ材(線膨張係数約 $4.5\times 10^{-6}/\text{K}$)の間には大きな線膨張係数の差があり、熱サイクル時に接合部に高い熱応力が発生する。この熱応力が接合部の破損や冷却水の漏洩につながる可能性がある。

[0010]

さらに、核融合炉ダイバータは、中性子照射環境下で使用されるため、材料の照射損傷も考慮する必要がある。特に、冷却管材料として一般的に使用される銅合金は、中性子照射によって機械的特性が劣化することが知られている。このため、照射環境下での長期使用に耐える材料選定や構造設計が重要となる。

4. 発明の概要

4.1. 発明が解決しようとする課題

[0011]

HNS冷却管は高い熱限界性能を示すことが知られているが、実際の核融合炉ダイバータに適用するには、以下の課題がある。

[0012]

第一の課題は、冷却管とアーマー材との接合技術に関するものである。核融合炉ダイバータでは、冷却管はタングステン製のアーマー材と接合される必要があるが、銅合金製の冷却管とタングステンの線膨張係数の差が大きいため、熱サイクル時に熱応力が発生し、接合部の破損や冷却水の漏洩につながる可能性がある。特に、核融合炉の運転中には、プラズマの点火と消火が繰り返され、ダイバータ冷却システムは数千回の熱サイクルを受ける。このような条件下で、接合部の構造的健全性を維持することが重要である。

[0013]

第二の課題は、熱疲労に対する耐久性である。核融合炉の運転中には、プラズマの点火と消火が繰り返され、ダイバータ冷却システムは熱サイクルを受ける。このような条件下で、冷却システムの構造的健全性を長期間維持することが求められる。特に、冷却管材料（一般的には銅合金）は、熱サイクルによる疲労損傷を受けやすい。また、高熱流束環境下では、冷却管内面の温度が上昇し、材料の強度が低下する可能性がある。さらに、核融合炉内での中性子照射によって、材料の機械的特性が劣化することも考慮する必要がある。

[0014]

第三の課題は、最適な冷却条件の設定である。HNS冷却管の熱限界は、冷却媒体の圧力、質量流束、サブクール度などの運転条件に依存する。実際の核融合炉運転条件下で、最適な冷却性能を発揮するための条件を明確にする必要がある。特に、ポンプ動力（圧力損失）と熱除去性能のバランスを考慮した最適条件の設定が重要である。また、核融合炉の起動時、定常運転時、停止時など、異なる運転モードに対応した冷却条件の制御方法も検討する必要がある。

[0015]

第四の課題は、製造および保守の容易性である。核融合炉は長期間運転されることが想定されており、ダイバータ冷却システムの製造コストを低減するとともに、保守・交換を容易に行えるようにすることが重要である。特に、核融合炉内での作業は遠隔操作で行われるため、遠隔操作に適したモジュラー設計が求められる。また、製造プロセスの再現性と信頼性を確保し、大量生産が可能な製造方法を確立する必要がある。

[0016]

第五の課題は、安全性の確保である。核融合炉ダイバータ冷却システムは、高温・高圧の冷却水を使用するため、冷却水の漏洩が発生した場合の安全対策が重要である。特に、冷却水が真空容器内に漏洩した場合、プラズマ運転に悪影響を及ぼす可能性がある。また、冷却システムの故障時にも、炉心の安全を確保するための冗長設計が必要である。

[0017]

本発明は、上記課題を解決し、実用的かつ信頼性の高い核融合炉ダイバータ用冷却システムを提供することを目的とする。

4.2. 課題を解決するための手段

[0018]

上記課題を解決するために、本発明は以下の構成を有する核融合炉ダイバータ用冷却システムを提供する。

[0019]

本発明の第一の態様によれば、核融合炉ダイバータ用冷却システムは、機械的タッピングにより製造されたヘリカルナット表面を有する冷却管と、該冷却管に接合されたアーマー材と、冷却管内を流れる冷却媒体の流量および圧力を制御する制御系とを備える。

[0020]

前記冷却管は、銅クロムジルコニウム合金（CuCrZr）製であり、内部にらせん状の突起構造を有する。CuCrZr合金は、高い熱伝導率（約350W/m・K）を有するとともに、機械的強度と耐照射性に優れているため、核融合炉の冷却管材料として適している。CuCrZr合金の組成は、約1.0～1.2重量%のクロムと約0.1～0.2重量%のジルコニウムを含む銅合金であり、適切な熱処理（溶体化処理、時効処理）を施すことで、高い降伏強度（約300MPa）と良好な熱伝導率を両立させることができる。また、CuCrZr合金は、中性子照射下での機械的特性の劣化が比較的小さいという特徴がある。

[0021]

前記らせん状の突起構造は、冷却管の内径に対して特定のピッチ比を有するように形成される。本発明の好ましい実施形態では、M10サイズ（内径約8.5mm）の冷却管に対して、ピッチ1.5のヘリカルナット表面（M10, P1.5）が用いられる。このピッチ比により、流体の混合が促進され、熱伝達が向上する。ピッチ比が小さすぎると圧力損失が増大し、大きすぎると熱伝達促進効果が減少するため、ピッチ比の最適化が重要である。M10, P1.5のHNS冷却管は、熱限界性能とポンプ動力のバランスが最適化されており、核融合炉ダイバータ冷却に適している。

[0022]

前記らせん状の突起構造の形状は、タップによる機械的加工で形成される。突起の高さは約1.0mmであり、突起の断面形状は台形である。突起の頂部の幅は約0.5mm、底部の幅は約1.5mmであり、突起の角度は約60度である。この形状により、流体に適度な旋回成分が付与され、熱伝達が促進される。また、突起間の空間では、核沸騰が促進され、高い熱除去性能が得られる。

[0023]

前記アーマー材は、タングステン製のモノブロック型であり、冷却管との接合部に熱応力緩和層を有する。タングステンは、高い融点（約3400°C）と低いスパッタリング率を有するため、プラズマに直接面する材料として適している。モノブロック型構造は、熱応力に対する耐性が高く、高熱流束条件下での構造的健全性を確保できる。モノブロック型構造では、タングステンブロックに冷却管挿入用の穴を形成し、冷却管を挿入して接合する。この構造により、熱応力が分散され、アーマー材の破損リスクが低減される。

[0024]

前記モノブロック型タングステンアーマーの寸法は、幅25mm、高さ25mm、長さ12mmである。冷却管挿入用の穴の直径は約11mmであり、冷却管の外径（10.5mm）との間に約0.5mmの隙間がある。この隙間には、熱応力緩和層が形成される。モノブロックの長さ（12mm）は、核融合炉ダイバータの設計条件に基づいて決定されており、熱応力と冷却性能のバランスを考慮している。

[0025]

前記熱応力緩和層は、タングステンとCuCrZrの線膨張係数の差による熱応力を緩和するためのものであり、銅または銅合金で構成される。本発明の好ましい実施形態では、純銅層と酸素不含有銅（OFC）層の二層構造、または銅とタングステンの傾斜機能材料（FGM）が用いられる。

[0026]

前記純銅層と酸素不含有銅（OFC）層の二層構造では、純銅層はタングステン側に、OFC層はCuCrZr側に配置される。純銅層の厚さは約0.3mm、OFC層の厚さは約0.2mmである。純銅は、高い熱伝導率（約400W/m・K）を有し、タングステンとの接合性が良好である。OFC層は、CuCrZrとの接合性が良好であり、二層構造全体として熱応力を緩和する役割を果たす。

[0027]

前記銅とタングステンの傾斜機能材料（FGM）は、タングステン側から銅側に向かって、タングステンの含有率が徐々に減少し、銅の含有率が徐々に増加する構造を持つ。具体的には、タングステン側から銅側に向かって、タングステンの含有率が100%から0%に徐々に減少し、銅の含有率が0%から100%に徐々に増加する5層構造とする。各層の厚さは約0.1mmであり、全体の厚さは約0.5mmである。この構造により、線膨張係数の急激な変化を避け、熱応力を分散させることができる。

[0028]

前記冷却管の外表面には、絶縁層としてアルミナ（ Al_2O_3 ）層が形成されている。この絶縁層は、核融合炉内での電磁誘導による電流の発生を防止するとともに、冷却管の腐食を抑制する役割を果たす。アルミナ層は、熱スプレー法により100 μ m程度の厚さで形成される。アルミナは、高い電気絶縁性（体積抵抗率約 $10^{14}\Omega\cdot cm$ ）と熱伝導性（熱伝導率約30W/m・K）を兼ね備えており、核融合炉環境下での使用に適している。

[0029]

前記アルミナ層の形成方法は、熱スプレー法を用いる。具体的には、アルミナ粉末（粒径約20～50 μ m）を、プラズマフレーム中で加熱・溶融し、冷却管表面に吹き付ける。この工程は、アルミナ層の厚さが約100 μ mになるまで繰り返される。熱スプレー法は、複雑な形状の部材に均一な厚さの絶縁層を形成できるという利点がある。また、アルミナ層の密着性を向上させるために、冷却管表面に予めブラスト処理を施し、表面粗さを調整する。

[0030]

前記制御系は、冷却媒体の圧力を10～15バールに、質量流束を2000～2500kg/m²sに、サブクール度を30～40°Cに制御する機能を有する。これらの運転条件は、HNS冷却管の熱限界を最大化するとともに、ポンプ動力を最適化するために選定されている。

[0031]

前記圧力範囲（10～15バール）は、サブクール沸騰条件下での熱限界を確保するとともに、冷却系の設計圧力を合理的な範囲に抑えるために選定されている。圧力が低すぎると、飽和温度が低下し、サブクール度が減少するため、熱限界が低下する。一方、圧力が高すぎると、冷却系の設計・製造が複雑になり、コストが増加する。10～15バールの圧力範囲は、熱限界性能と設計の実現可能性のバランスを考慮して決定されている。

[0032]

前記質量流束範囲（2000～2500kg/m²s）は、熱伝達性能とポンプ動力のバランスを考慮して選定されている。質量流束が大きいくほど熱伝達係数は向上するが、圧力損失も増加する。M10冷却管（内径8.5mm）の場合、質量流束2000～2500kg/m²sは、体積流量約0.113～0.142kg/sに相当する。この流量範囲は、現実的なポンプ動力で達成可能であり、かつ十分な熱除去性能を確保できる。

[0033]

前記サブクール度範囲（30～40°C）は、核沸騰熱伝達を促進するとともに、熱限界を確保するために選定されている。サブクール度が大きいくほど熱限界は向上するが、冷却系の熱効率は低下する。30～40°Cのサブクール度は、熱限界性能と熱効率のバランスを考慮して決定されている。具体的には、12バールの圧力下での飽和温度（約188°C）と入口温度（約150°C）の差として設定される。

[0034]

本発明の第二の態様によれば、前記冷却システムは、複数の冷却ループが並列配置された冗長構造を有する。これにより、一部の冷却ループが故障しても、残りのループで必要な冷却能力を維持することができる。各冷却ループは、独立した流量制御弁を備え、熱負荷分布に応じて流量を調整することができる。

[0035]

前記冗長構造は、2つの独立した冷却ループから構成される。各ループは、全体の冷却能力の60%を担うように設計されており、1つのループが完全に機能を失った場合でも、残りのループで必要最小限の冷却能力（全体の60%）を確保できる。これにより、冷却システムの信頼性と安全性が向上する。

[0036]

前記流量制御弁は、電動アクチュエータで駆動される比例制御弁であり、0～100%の範囲で開度を調整できる。流量制御弁は、熱負荷分布に応じて自動的に制御され、各冷却ループの流量を最適化する。また、流量制御弁の上流には、ストレーナが設置され、冷却水中の異物を捕捉し、弁の詰まりを防止する。

[0037]

本発明の第三の態様によれば、前記冷却システムは、モジュラー設計を採用している。ダイバータ全体は複数のカセットで構成され、各カセットは独立して交換可能である。これにより、保守作業が容易になり、炉の稼働率が向上する。

[0038]

前記モジュラー設計では、ダイバータ全体を12個のカセットで構成する。各カセットは、トロイダル方向に約30度の範囲をカバーし、ポロイダル方向には内側ターゲット、ドーム部、外側ターゲットを含む。カセットの寸法は、幅約1m、高さ約0.5m、奥行き約0.5mであり、重量は約500kgである。

[0039]

前記カセットの接続部には、標準化されたフランジを採用し、遠隔操作での交換が容易になるようにする。フランジには、位置決めピンと締結ボルトが設けられており、遠隔操作装置による正確な位置決めと確実な締結が可能である。また、冷却水の接続には、自動着脱式のクイックカップリングを採用し、遠隔操作での接続・切断を容易にする。

[0040]

本発明の第四の態様によれば、前記冷却管とアーマー材の接合は、以下のいずれかの方法で行われる。

- (1) HIP処理：冷却管とアーマー材を真空容器内に配置し、高温（約850°C）・高圧（約100MPa）条件下で拡散接合する方法。
- (2) ろう付け：銅ベースのろう材を用いて、冷却管とアーマー材を接合する方法。
- (3) 機械的締結：冷却管をアーマー材に機械的に固定する方法。この方法では、熱接触抵抗を低減するために、接触面に熱伝導グリースまたは液体金属が用いられる。

[0041]

前記HIP処理では、まず冷却管とアーマー材を真空容器内に配置し、真空排気を行う。次に、容器内を不活性ガス（アルゴンなど）で満たし、温度を約850°Cまで上昇させる。その後、約100MPaの圧力を加え、数時間保持する。この条件下で、材料間の拡散が促進され、強固な接合が形成される。HIP処理は、複雑な形状の部材でも均一な接合が可能であり、接合強度が高いという利点がある。

[0042]

前記ろう付けでは、銅ベースのろう材（Cu-Ag-Ti系など）を用いる。具体的には、Cu-63%Ag-2%Ti組成のろう材を、冷却管とアーマー材の間に配置し、真空または不活性ガス雰囲気中で約800°Cに加熱する。この温度でろう材が溶融し、毛細管現象により接合部全体に広がる。冷却後、ろう材は凝固し、冷却管とアーマー材が接合される。ろう付けは、HIP処理と比較して設備が簡単であり、製造コストが低いという利点がある。

[0043]

前記機械的締結では、冷却管をアーマー材に機械的に固定する。具体的には、アーマー材に設けられた穴に冷却管を挿入し、冷却管の両端に設けられたフランジで固定する。冷却管とアーマー材の間の熱接触抵抗を低減するために、接触面に熱伝導グリース（熱伝導率約5W/m・K）または液体金属（ガリウム-インジウム-スズ合金、熱伝導率約20W/m・K）を塗布する。機械的締結は、冷却管とアーマー材の交換が容易であり、熱応力による破損リスクが低いという利点がある。

[0044]

本発明の第五の態様によれば、前記冷却システムは、熱負荷監視システムを備える。このシステムは、アーマー材の表面温度を赤外線カメラで監視し、異常な温度上昇を検出した場合に警報を発する。また、冷却水の入口温度と出口温度の差から熱負荷を計算し、設計値との比較を行う。

[0045]

前記赤外線カメラは、波長範囲3~5μmまたは8~14μmの赤外線を検出し、温度範囲200~2000°Cを測定できる性能を持つ。カメラは、核融合炉の真空容器外部に設置され、観測窓を通してダイバータ表面を監視する。観測窓には、赤外線を透過し、可視光や紫外線を遮断するフィルターが設けられている。

[0046]

前記熱負荷計算は、冷却水の入口温度と出口温度の差、および流量から行われる。具体的には、以下の式を用いる。

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$

ここで、Qは熱負荷[W]、mは質量流量[kg/s]、C_pは冷却水の比熱[J/kg・K]、T_{in}は入口温度[K]、T_{out}は出口温度[K]である。

[0047]

前記温度測定には、測定範囲0~200°C、精度±0.1°Cの測温抵抗体（Pt100）を使用する。測温抵抗体は、冷却水の入口と出口に設置され、冷却水の温度を連続的に測定する。また、流量測定には、測定範囲0~5kg/s、精度±0.5%の電磁流量計を使用する。

[0048]

本発明の第六の態様によれば、前記冷却システムは、漏洩検知システムを備える。このシステムは、冷却水の圧力変化を監視し、急激な圧力低下を検出した場合に警報を発する。また、真空容器内の湿度センサにより、冷却水の漏洩を検知する。

[0049]

前記圧力監視には、測定範囲0~20バール、精度±0.1%のひずみゲージ式圧力センサを使用する。圧力センサは、冷却系の複数箇所に設置され、圧力分布を連続的に測定する。圧力の急激な低下（例えば、1秒間に1バール以上の低下）が検出された場合、警報が発せられ、自動的に冷却系の隔離弁が閉じられる。

[0050]

前記湿度センサは、静電容量式湿度センサであり、相対湿度0~100%の範囲を測定できる。湿度センサは、真空容器内の複数箇所に設置され、局所的な湿度上昇を検知する。湿度の急激な上昇（例えば、1分間に10%以上の上昇）が検出された場合、警報が発せられ、冷却水の漏洩位置の特定が行われる。

5. 発明の効果

[0051]

本発明によれば、以下の効果が得られる。

[0052]

第一に、HNS冷却管の優れた熱限界特性により、20MW/m²以上の高熱流束を安定して除去することができる。HNS冷却管内部のらせん状突起構造は、流体の混合を促進し、核沸騰熱伝達を強化する。また、最適化された冷却条件（圧力、質量流束、サブクール度）により、熱限界を最大化することができる。具体的には、圧力12バール、質量流束2200kg/m²s、サブクール度35°Cの条件下で、約22MW/m²の熱流束を安定して除去することができる。この熱流束は、DEMOで想定される最大熱流束（20MW/m²）を上回っており、十分な安全余裕を確保している。

[0053]

第二に、熱応力緩和層の導入により、冷却管とアーマー材の接合部の構造的信頼性が向上する。銅または銅合金製の熱応力緩和層は、タングステンとCuCrZrの線膨張係数の差による熱応力を吸収し、接合部の破損を防止する。これにより、3000サイクル以上の熱疲労寿命を確保することができる。特に、純銅層とOFC層の二層構造、または銅とタングステンのFGMを用いることで、熱応力の緩和効果が高まる。熱サイクル試験（室温~300°Cを1000回繰り返し）においても、接合部に亀裂や剥離は見られず、高い構造的信頼性が確認されている。

[0054]

第三に、冷却システムの冗長設計により、信頼性と安全性が向上する。複数の冷却ループが並列配置されているため、一部のループが故障しても、残りのループで必要な冷却能力を維持することができる。これにより、核融合炉の安全停止が可能となる。具体的には、2つの独立した冷却ループを設け、各ループが全体の冷却能力の60%を担うようにすることで、1つのループが完全に機能を失った場合でも、残りのループで必要最小限の冷却能力（全体の60%）を確保できる。この冗長設計により、冷却システムの信頼性と安全性が大幅に向上する。

[0055]

第四に、モジュラー設計により、製造および保守の容易性が向上する。ダイバータ全体が複数のカセットで構成されているため、損傷した部分のみを交換することができる。また、標準化された接続部により、遠隔操作での交換が容易になる。具体的には、ダイバータ全体を12個のカセットで構成し、各カセットはトロイダル方向に約30度の範囲をカバーする。カセットの接続部には、標準化されたフランジと自動着脱式のクイックカップリングを採用し、遠隔操作での交換を容易にする。模擬的な遠隔操作装置を用いた交換作業では、1つのカセットの交換に要する時間は約2時間であり、従来の設計と比較して約30%の時間短縮となる。

[0056]

第五に、既存の製造技術で実現可能であるため、開発リスクとコストを低減できる。HNS冷却管は機械的タッピングにより製造可能であり、アーマー材との接合には確立された技術（HIP処理、ろう付け）が使用できる。また、アルミナ絶縁層の形成には熱スプレー法が用いられ、これらの製造技術はいずれも産業界で広く使用されている成熟した技術である。このため、製造プロセスの再現性と信頼性が高く、大量生産が可能である。製造コストについても、従来のハイパーパボトロンと比較して約15%の削減が見込まれる。

[0057]

第六に、熱負荷監視システムと漏洩検知システムの導入により、運転の安全性が向上する。赤外線カメラによるアーマー材表面温度の監視、冷却水の入口温度と出口温度の差による熱負荷計算、圧力変化の監視、真空容器内の湿度センサによる漏洩検知など、多角的な監視システムにより、異常の早期発見と対応が可能となる。これにより、冷却システムの故障や冷却水の漏洩による重大な事故を防止することができる。

【発明を実施するための形態】

[0058]

以下、本発明の実施形態について詳細に説明する。

[0059]

図1は、本発明の核融合炉ダイバータ用冷却システムの全体構成を示す模式図である。本システムは、HNS冷却管10、タングステンアーマー20、冷却媒体供給系30、および制御系40から構成される。

[0060]

HNS冷却管10は、CuCrZr合金製であり、機械的タッピングによりらせん状の内部突起構造が形成されている。CuCrZr合金は、約1.0~1.2重量%のクロムと約0.1~0.2重量%のジルコニウムを含む銅合金であり、高い熱伝導率（約350W/m・K）と機械的強度（降伏強度約300MPa）を兼ね備えている。また、中性子照射下での機械的特性の劣化が比較的小さいという特徴がある。

[0061]

CuCrZr合金の製造プロセスは、以下の通りである。まず、高純度の銅（純度99.9%以上）、クロム（純度99.5%以上）、ジルコニウム（純度99.5%以上）を所定の比率で配合し、真空誘導炉で溶解する。溶解温度は約1300°Cであり、溶解時間は約1時間である。次に、溶湯を金型に casting し、インゴットを形成する。インゴットは、熱間押し出しにより棒材に加工される。押し出し温度は約900°Cであり、押し出し比は約10:1である。その後、棒材に溶体化処理（約980°Cで1時間保持後、水冷）と時効処理（約480°Cで2時間保持後、空冷）を施し、所定の機械的特性を得る。

[0062]

本実施形態では、M10サイズ、ピッチ1.5のHNS冷却管（M10, P1.5）を使用する。M10は、冷却管の内径が約8.5mmであることを示し、P1.5は、らせん状突起のピッチが冷却管内径の1.5倍（約12.75mm）であることを示す。このピッチ比は、熱限界性能とポンプ動力のバランスを最適化するために選定されている。

[0063]

HNS冷却管の製造プロセスは、以下の通りである。まず、CuCrZr棒材（直径約15mm）に、直径10.5mmの穴を開ける。この加工は、ドリル加工により行われる。次に、M10タップを用いて内部にらせん状の突起構造を形成する。タッピングは、専用の旋盤を用いて行われ、タップの回転速度は約100rpm、送り速度は約1.5mm/revである。タッピング後、冷却管の内径は約8.5mmとなる。最後に、冷却管の両端を切断し、所定の長さ（約200mm）に仕上げる。

[0064]

HNS冷却管10の内部には、らせん状の突起構造11が形成されている。この突起構造は、タップによる機械的加工で形成され、突起の高さは約1.0mmである。突起の断面形状は台形であり、頂部の幅は約0.5mm、底部の幅は約1.5mmである。突起の角度は約60度である。この形状により、流体に適度な旋回成分が付与され、熱伝達が促進される。また、突起間の空間では、核沸騰が促進され、高い熱除去性能が得られる。

[0065]

HNS冷却管10の外表面には、アルミナ層12が形成されている。このアルミナ層は、熱スプレー法により形成され、厚さは約100μmである。アルミナ層は、電気絶縁性（体積抵抗率約10¹⁴Ω・cm）と熱伝導性（熱伝導率約30W/m・K）を兼ね備えており、核融合炉内での電磁誘導による電流の発生を防止するとともに、冷却管の腐食を抑制する役割を果たす。

[0066]

アルミナ層の形成プロセスは、以下の通りである。まず、HNS冷却管の外表面にブラスト処理を施し、表面粗さを調整する。ブラスト処理には、アルミナ粒子（粒径約100μm）を用い、圧力約0.5MPaで吹き付ける。次に、熱スプレー装置を用いてアルミナ層を形成する。熱スプレー装置は、プラズマトーチを用いたプラズマスプレー方式であり、アルミナ粉末（粒径約20~50μm）をプラズマフレーム中で加熱・溶融し、冷却管表面に吹き付ける。プラズマガスにはアルゴンと水素の混合ガスを用い、プラズマ出力は約40kWである。スプレー距離は約100mm、スプレー角度は約90度である。この工程は、アルミナ層の厚さが約100μmになるまで繰り返される。最後に、アルミナ層の表面を研磨し、均一な厚さと滑らかな表面を得る。

[0067]

タングステンアーマー20は、プラズマに直接面する部分であり、高温に耐える必要がある。タングステンは、融点が約3400°Cと高く、熱伝導率も約170W/m・Kと比較的高いため、高熱流束環境下での使用に適している。また、スパッタリング率が低いため、プラズマ中への不純物混入を抑制できる。

[0068]

タングステンアーマーの製造プロセスは、以下の通りである。まず、高純度のタングステン粉末（純度99.95%以上、粒径約1~5μm）を金型に充填し、約200MPaの圧力で圧縮成形する。次に、成形体を約1500°Cの水素雰囲気中で焼結する。焼結時間は約4時間である。焼結後の密度は理論密度の約95%である。さらに、熱間等方圧加工（HIP）処理を行い、密度を向上させる。HIP処理は、約2000°C、約200MPaの条件で約4時間行われる。HIP処理後の密度は理論密度の約99.5%である。最後に、放電加工または超音波加工により、冷却管挿入用の穴（直径約11mm）を形成する。

[0069]

本実施形態では、モノブロック型のタングステンアーマーを採用している。モノブロック型は、タングステンブロックに冷却管挿入用の穴を形成し、冷却管を挿入して接合する構造である。この構造は、熱応力に対する耐性が高く、高熱流束条件下での構造的健全性を確保できる。

[0070]

タングステンアーマー20の寸法は、幅25mm、高さ25mm、長さ12mmである。冷却管挿入用の穴の直径は約11mmであり、冷却管の外径（10.5mm）との間に約0.5mmの隙間がある。この隙間には、熱応力緩和層21が形成される。モノブロックの長さ（12mm）は、核融合炉ダイバータの設計条件に基づいて決定されており、熱応力と冷却性能のバランスを考慮している。

[0071]

熱応力緩和層21は、タングステン（線膨張係数約4.5×10⁻⁶/K）とCuCrZr（線膨張係数約17×10⁻⁶/K）の線膨張係数の差による熱応力を緩和するためのものである。本実施形態では、純銅層と酸素不含有銅（OFC）層の二層構造を採用している。純銅層はタングステン側に、OFC層はCuCrZr側に配置される。純銅層の厚さは約0.3mm、OFC層の厚さは約0.2mmである。

[0072]

熱応力緩和層の形成プロセスは、以下の通りである。まず、タングステンアーマーの穴の内面に、スパッタリングにより純銅層を形成する。スパッタリング装置は、マグネトロンスパッタリング方式であり、ターゲットには高純度の銅（純度99.999%以上）を用いる。スパッタリングガスにはアルゴンを用い、圧力は約0.5Paである。スパッタリング電力は約2kW、スパッタリング時間は約2時間であり、これにより約0.3mmの純銅層が形成される。次に、電気めっきによりOFC層を形成する。電気めっき浴には、硫酸銅（CuSO₄・5H₂O）250g/L、硫酸（H₂SO₄）50g/L、塩化物イオン（Cl⁻）50mg/Lを含む水溶液を用いる。めっき条件は、温度約25°C、電流密度約5A/dm²、めっき時間約2時間であり、これにより約0.2mmのOFC層が形成される。

[0073]

別の実施形態では、熱応力緩和層として、銅とタングステンの傾斜機能材料（FGM）を用いることもできる。FGMは、タングステン側から銅側に向かって、タングステンの含有率が徐々に減少し、銅の含有率が徐々に増加する構造を持つ。これにより、線膨張係数の急激な変化を避け、熱応力を分散させることができる。

[0074]

FGMの形成プロセスは、以下の通りである。まず、タングステン粉末（粒径約1~5μm）と銅粉末（粒径約1~5μm）を、所定の比率で混合する。混合比は、タングステン側から銅側に向かって、タングステン:銅=100:0、75:25、50:50、25:75、0:100の5層とする。各層の厚さは約0.1mmであり、全体の厚さは約0.5mmである。次に、混合粉末をタングステンアーマーの穴の内面に塗布し、約1200°Cの水素雰囲気中で焼結する。焼結時間は約2時間である。この工程により、銅とタングステンのFGMが形成される。

[0075]

冷却媒体供給系30は、冷却水を循環させるポンプ31、熱交換器32、および配管系33から構成される。ポンプ31は、冷却水を所定の圧力と流量で循環させる役割を担う。本実施形態では、最大圧力20バール、最大流量5kg/sのポンプを使用する。

[0076]

ポンプの仕様は、以下の通りである。ポンプ形式は、高圧・高温水用の多段遠心ポンプであり、モーター出力は約30kWである。ポンプ材質は、ステンレス鋼（SUS316L）であり、耐食性と耐熱性に優れている。ポンプの回転速度は約3000rpmであり、インバータ制御により0~100%の範囲で可変である。ポンプの効率は約75%であり、冷却水温度150°C、圧力12バールの条件下で、約2.5kg/sの流量を供給できる。

[0077]

熱交換器32は、ダイバータで受けた熱を二次冷却系に伝達する役割を担う。本実施形態では、プレート型熱交換器を採用し、一次側（ダイバータ冷却系）と二次側（熱利用系）の間で効率的な熱交換を行う。熱交換器の熱交換容量は約50MWである。

[0078]

熱交換器の仕様は、以下の通りである。熱交換器形式は、ガスケット式プレート型熱交換器であり、伝熱面積は約500m²である。プレート材質はステンレス鋼（SUS316L）、ガスケット材質はエチレンプロピレンゴム（EPDM）である。一次側の設計条件は、入口温度約180°C、出口温度約150°C、流量約2.5kg/s、圧力約12バールである。二次側の設計条件は、入口温度約140°C、出口温度約170°C、流量約2.5kg/s、圧力約5バールである。熱交換器の総合熱伝達係数は約5000W/m²・Kであり、熱交換効率は約95%である。

[0079]

配管系33は、冷却水をポンプからダイバータ冷却管へ、そして熱交換器へと導く役割を担う。配管材料にはステンレス鋼（SUS316L）を使用し、内径は約50mmである。配管系には、圧力計、流量計、温度計などの計測器が設置されている。

[0080]

配管系の仕様は、以下の通りである。配管材質はステンレス鋼（SUS316L）であり、耐食性と耐熱性に優れている。配管の内径は約50mm、肉厚は約5mmである。配管の設計圧力は約20バール、設計温度は約200°Cである。配管の接続には、溶接またはフランジ接続を用いる。フランジはJIS 10K規格に準拠し、ガスケット材質はEPDMである。配管系には、空気抜き弁、ドレン弁、安全弁などが適切に配置されている。空気抜き弁は、配管系の最高点に設置され、系内の空気を排出する役割を担う。ドレン弁は、配管系の最低点に設置され、系内の水を排出する役割を担う。安全弁は、設定圧力（約15バール）を超えた場合に自動的に開き、系内の圧力を逃がす役割を担う。

[0081]

制御系40は、圧力センサ41、流量センサ42、温度センサ43、および制御装置44から構成される。圧力センサ41は、冷却系内の圧力を測定する。本実施形態では、測定範囲0～20バール、精度±0.1%のひずみゲージ式圧力センサを使用する。

[0082]

圧力センサの仕様は、以下の通りである。センサ形式は、ひずみゲージ式圧力センサであり、測定範囲は0～20バール、精度は±0.1%F.S.である。センサ材質はステンレス鋼 (SUS316L) であり、耐食性と耐熱性に優れている。センサの出力信号は4～20mAの電流信号であり、制御装置に入力される。センサの応答時間は約10msであり、圧力変化に迅速に対応できる。センサの設置位置は、ポンプの出口、冷却管の入口と出口、熱交換器の入口と出口など、冷却系の主要部分である。

[0083]

流量センサ42は、冷却水の流量を測定する。本実施形態では、測定範囲0～5kg/s、精度±0.5%の電磁流量計を使用する。流量センサの仕様は、以下の通りである。センサ形式は、電磁流量計であり、測定範囲は0～5kg/s、精度は±0.5%F.S.である。センサ材質はステンレス鋼 (SUS316L)、ライニング材質はポリテトラフルオロエチレン (PTFE) である。センサの出力信号は4～20mAの電流信号であり、制御装置に入力される。センサの応答時間は約100msであり、流量変化に迅速に対応できる。センサの設置位置は、各冷却ループの入口部分である。

[0084]

温度センサ43は、冷却水の温度を測定する。本実施形態では、測定範囲0～200°C、精度±0.1°Cの測温抵抗体 (Pt100) を使用する。温度センサの仕様は、以下の通りである。センサ形式は、測温抵抗体 (Pt100) であり、測定範囲は0～200°C、精度は±0.1°Cである。センサ材質はステンレス鋼 (SUS316L)、素子材質は白金である。センサの出力信号は4～20mAの電流信号であり、制御装置に入力される。センサの応答時間は約1秒であり、温度変化に適切に対応できる。センサの設置位置は、冷却水の入口と出口、熱交換器の入口と出口など、冷却系の主要部分である。

[0085]

制御装置44は、各センサからの信号に基づいて、ポンプ31の回転数を制御し、最適な冷却条件を維持する。制御装置には、プログラマブルロジックコントローラ (PLC) を使用し、比例・積分・微分 (PID) 制御アルゴリズムにより、冷却条件を安定させる。

[0086]

制御装置の仕様は、以下の通りである。装置形式は、プログラマブルロジックコントローラ (PLC) であり、CPU性能は約100MIPS、メモリ容量は約1MBである。入力点数は約100点、出力点数は約50点であり、アナログ入力 (4～20mA)、アナログ出力 (4～20mA)、デジタル入力、デジタル出力に対応している。制御周期は約100msであり、高速な制御が可能である。制御アルゴリズムは、PID制御を基本とし、フィードフォワード制御やカスケード制御などの高度な制御機能も実装されている。また、異常検知機能や自己診断機能も備えており、システムの信頼性を向上させている。

[0087]

本実施形態では、冷却水の圧力を12バール、質量流量を2200kg/m²s、サブクール度を35°Cに設定する。これらの条件は、HNS冷却管の熱限界を最大化するとともに、ポンプ動力を最適化するために選定されている。質量流量2200kg/m²sは、M10冷却管 (内径8.5mm) の場合、体積流量約0.125kg/sに相当する。

[0088]

冷却水の入口温度は、核融合炉の運転条件により異なるが、本実施形態では約150°Cとする。サブクール度35°Cは、12バールの圧力下での飽和温度 (約188°C) と入口温度 (150°C) の差に相当する。このサブクール度により、核沸騰熱伝達が促進され、高い熱除去性能が得られる。

[0089]

冷却水の水質管理も重要である。冷却水には、脱イオン水 (電気伝導度約0.1μS/cm以下) を使用し、溶存酸素濃度を低く保つために、窒素ガスによる脱気処理を行う。また、冷却系の腐食を防止するために、pH調整剤 (アンモニアなど) を添加し、pH値を約9.0～9.5に維持する。さらに、微生物の繁殖を防止するために、殺菌剤 (ヒドラジンなど) を適量添加する。冷却水の水質は定期的に分析され、必要に応じて調整される。

[0090]

本発明の冷却システムは、以下の手順で製造される。

[0091]

まず、CuCrZr棒材から機械的タッピングによりHNS冷却管を製造する。CuCrZr棒材 (直径約15mm) に、直径10.5mmの穴を開け、M10タップを用いて内部にらせん状の突起構造を形成する。タッピング後、冷却管の内径は約8.5mmとなる。

[0092]

次に、HNS冷却管の外表面に熱スプレー法によりアルミナ層を形成する。アルミナ粉末 (粒径約20～50μm) を、プラズマフレーム中で加熱・溶融し、冷却管表面に吹き付ける。この工程は、アルミナ層の厚さが約100μmになるまで繰り返される。

[0093]

次に、タングステンアーマーに冷却管挿入用の穴を形成する。タングステンブロック (幅25mm、高さ25mm、長さ12mm) に、直径約11mmの穴を形成する。この加工は、放電加工または超音波加工により行われる。

[0094]

次に、熱応力緩和層を形成する。本実施形態では、タングステンアーマーの穴の内面に、まず純銅層 (厚さ約0.3mm) を形成し、次にOFC層 (厚さ約0.2mm) を形成する。これらの層は、スパッタリングまたは電気めっきにより形成される。

[0095]

次に、HIP処理またはろう付けにより、冷却管とアーマーを接合する。HIP処理の場合、冷却管とアーマーを真空容器内に配置し、約850°C、約100MPaの条件で数時間処理する。ろう付けの場合、銅ベースのろう材 (Cu-Ag-Ti系など) を用いて、約800°Cで接合する。

[0096]

次に、冷却管の両端にステンレス鋼製の配管を接続する。接続には、ろう付けまたは溶接を用いる。接続部の気密性を確保するために、ヘリウムリーク試験を行い、漏れがないことを確認する。

[0097]

最後に、冷却媒体供給系および制御系を接続する。ポンプ、熱交換器、各種センサ、制御装置を取り付け、システム全体の気密試験を行い、漏れがないことを確認する。また、制御系の動作確認を行い、各センサからの信号が正常に処理され、ポンプの制御が適切に行われることを確認する。

[0098]

本発明の冷却システムは、以下のように運用される。

[0099]

まず、冷却水を所定の圧力（12バール）、流量（質量流束2200kg/m²s）で循環させる。冷却水の入口温度は約150°Cに設定する。これにより、サブクール度は約35°Cとなる。

[0100]

次に、プラズマからの熱負荷に応じて、制御系が冷却条件を調整する。熱負荷が増加した場合は、流量を増加させるか、入口温度を下げることで対応する。熱負荷が減少した場合は、流量を減少させるか、入口温度を上げることで対応する。

[0101]

具体的な制御方法は、以下の通りである。まず、アーマー材の表面温度を赤外線カメラで監視し、設定値（約1000°C）を超えないように制御する。表面温度が上昇傾向にある場合は、流量を増加させるか、入口温度を下げる。表面温度が下降傾向にある場合は、流量を減少させるか、入口温度を上げる。

[0102]

また、冷却水の出口温度も監視し、設定値（約180°C）を超えないように制御する。出口温度が上昇傾向にある場合は、流量を増加させるか、入口温度を下げる。出口温度が下降傾向にある場合は、流量を減少させるか、入口温度を上げる。

[0103]

さらに、冷却系の圧力も監視し、設定値（12バール）を維持するように制御する。圧力が上昇傾向にある場合は、系内の一部の水を排出する。圧力が下降傾向にある場合は、補給水を系内に注入する。

[0104]

定期的な非破壊検査を行い、システムの健全性を確認する。具体的には、超音波探傷検査により冷却管とアーマーの接合状態を確認し、赤外線サーモグラフィによりアーマー表面の温度分布を測定する。異常が検出された場合は、該当するモジュールを交換する。

[0105]

本発明の冷却システムは、以下の特徴を有する。

[0106]

第一に、HNS構造による高い熱限界性能である。HNS冷却管内部のらせん状突起構造は、流体の混合を促進し、核沸騰熱伝達を強化する。これにより、20MW/m²以上の高熱流束を安定して除去することができる。特に、M10、P1.5のHNS冷却管は、熱限界性能とポンプ動力のバランスが最適化されている。

[0107]

HNS構造の熱伝達メカニズムは、以下の通りである。まず、らせん状突起により、流体に旋回成分が付与される。この旋回流れにより、境界層が薄くなり、対流熱伝達が促進される。次に、突起間の空間では、流体の混合が促進され、局所的な過熱が抑制される。さらに、核沸騰条件下では、突起の根元部分が気泡核生成サイトとなり、核沸騰が促進される。また、旋回流れにより、気泡の離脱が促進され、伝熱面からの熱除去が効率化される。これらの複合的な効果により、HNS冷却管は高い熱限界性能を発揮する。

[0108]

第二に、最適化された冷却条件による安定した熱除去である。圧力12バール、質量流束2200kg/m²s、サブクール度35°Cという条件は、HNS冷却管の熱限界を最大化するとともに、ポンプ動力を最適化するために選定されている。これらの条件下では、核沸騰熱伝達が促進され、高い熱除去性能が得られる。

[0109]

冷却条件の最適化は、以下の考慮に基づいている。まず、圧力については、高圧にするほど飽和温度が上昇し、同じ入口温度でもサブクール度が大きくなる。また、高圧では蒸気の密度が高くなり、気泡の体積が小さくなるため、流路の閉塞が抑制される。しかし、圧力が高すぎると、冷却系の設計・製造が複雑になり、コストが増加する。12バールという圧力は、熱限界性能と設計の実現可能性のバランスを考慮して決定されている。

[0110]

質量流束については、高流束にするほど熱伝達係数は向上するが、圧力損失も増加する。また、ポンプ動力は流量の3乗に比例して増加するため、過剰な流量は効率的でない。2200kg/m²sという質量流束は、熱伝達性能とポンプ動力のバランスを考慮して選定されている。

[0111]

サブクール度については、高サブクール度にするほど熱限界は向上するが、冷却系の熱効率も低下する。また、入口温度が低すぎると、熱交換器での熱回収率が低下する。35°Cというサブクール度は、熱限界性能と熱効率のバランスを考慮して決定されている。

[0112]

第三に、熱応力緩和層による構造的信頼性の向上である。純銅層とOFC層の二層構造、または銅とタングステンのFGMにより、タングステンとCuCrZrの線膨張係数の差による熱応力を緩和することができる。これにより、熱サイクル時の接合部の破損を防止し、3000サイクル以上の熱疲労寿命を確保することができる。

[0113]

熱応力緩和層の効果は、以下の通りである。タングステン（線膨張係数約4.5×10⁻⁶/K）とCuCrZr（線膨張係数約17×10⁻⁶/K）の間には大きな線膨張係数の差があり、熱サイクル時に接合部に高い熱応力が発生する。純銅層とOFC層の二層構造では、純銅（線膨張係数約17×10⁻⁶/K）がタングステン側に、OFC（線膨張係数約17.5×10⁻⁶/K）がCuCrZr側に配置される。純銅は延性が高く（伸び約30%）、熱応力による変形を吸収することができる。また、OFCはCuCrZrとの接合性が良好であり、界面での剥離を防止する。

[0114]

銅とタングステンのFGMでは、タングステン側から銅側に向かって、タングステンの含有率が徐々に減少し、銅の含有率が徐々に増加する。これにより、線膨張係数が徐々に変化し、熱応力の集中を避けることができる。FGMの各層の線膨張係数は、タングステン側から銅側に向かって、約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ 、約 $7.5 \times 10^{-6}/K$ 、約 $10.5 \times 10^{-6}/K$ 、約 $13.5 \times 10^{-6}/K$ 、約 $17 \times 10^{-6}/K$ と徐々に変化する。この緩やかな変化により、熱応力が分散され、接合部の破損リスクが低減される。

[0115]

第四に、モジュラー設計による保守性の向上である。ダイバータ全体が複数のカセットで構成されているため、損傷した部分のみを交換することができる。また、標準化された接続部により、遠隔操作での交換が容易になる。これにより、炉の稼働率が向上する。

[0116]

モジュラー設計の利点は、以下の通りである。まず、ダイバータ全体を12個のカセットで構成することで、各カセットの重量と寸法が管理可能な範囲に収まる。これにより、遠隔操作装置での取り扱いが容易になる。次に、カセットの接続部を標準化することで、互換性が確保され、交換作業が簡素化される。また、自動着脱式のクイックカップリングを採用することで、冷却水の接続・切断が容易になる。さらに、各カセットは独立して交換可能であるため、損傷が局所的な場合でも、ダイバータ全体を交換する必要がない。これにより、保守コストと時間が削減される。

[0117]

第五に、冗長設計による信頼性と安全性の向上である。複数の冷却ループが並列配置されているため、一部のループが故障しても、残りのループで必要な冷却能力を維持することができる。これにより、核融合炉の安全停止が可能となる。

[0118]

冗長設計の効果は、以下の通りである。2つの独立した冷却ループを設け、各ループが全体の冷却能力の60%を担うようにすることで、1つのループが完全に機能を失った場合でも、残りのループで必要最小限の冷却能力（全体の60%）を確保できる。これは、核融合炉の安全停止に必要な冷却能力を上回っている。また、各ループには独立した流量制御弁が設けられており、熱負荷分布に応じて流量を調整することができる。さらに、各ループには独立した圧力センサ、流量センサ、温度センサが設置されており、異常の早期発見が可能である。これらの冗長設計により、冷却システムの信頼性と安全性が大幅に向上する。

6. 発明の詳細な説明

[0119]

本発明は、核融合炉ダイバータ用の改良型ヘリカルナット冷却システムに関するものである。以下、本発明の構造、製造プロセスおよび使用方法について詳細に説明する。本発明は、核融合炉ダイバータにおいて発生する $20\text{MW}/\text{m}^2$ を超える高熱流束を効率的に除去するための、機械的タッピングにより製造されるヘリカルナット表面冷却管と、その最適な冷却条件および構造的信頼性を確保するための技術に関するものである。

[0120]

本発明の核融合炉ダイバータ用冷却システムは、主に以下の構成要素から成る：

- 1) ヘリカルナット表面を有する冷却管
- 2) タングステン製モノブロック型アーマータ
- 3) 熱応力緩和層
- 4) アルミナ絶縁層
- 5) 冷却媒体供給系
- 6) 制御系
- 7) 熱負荷監視システム
- 8) 漏洩検知システム
- 9) モジュラー構造

[0121]

まず、冷却管の構造について詳細に説明する。冷却管は銅クロムジルコニウム（CuCrZr）合金製であり、内部にらせん状の突起構造（ヘリカルナット表面）を有する。CuCrZr合金の組成は、約1.0～1.2重量%のクロムと約0.1～0.2重量%のジルコニウムを含む銅合金である。この合金は、高い熱伝導率（約 $350\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ）と機械的強度（降伏強度約 300MPa ）を兼ね備えており、中性子照射下での機械的特性の劣化が比較的小さいという特徴がある。また、耐食性にも優れており、高温水環境下での長期使用に適している。CuCrZr合金の密度は約 $8.9\text{g}/\text{cm}^3$ であり、ヤング率は約 130GPa 、ポアソン比は約0.33である。この合金の線膨張係数は約 $17 \times 10^{-6}/K$ であり、これは後述する熱応力緩和層の設計において重要なパラメータとなる。

[0122]

冷却管のサイズはM10（内径約8.5mm、外径10.5mm）であり、ヘリカルナット表面のピッチは1.5（約12.75mm）である。このピッチ比（ピッチ/内径＝1.5）は、熱限界性能とポンプ動力のバランスを最適化するために選定されている。ピッチ比が小さすぎると圧力損失が増大し、大きすぎると熱伝達促進効果が減少するため、ピッチ比の最適化が重要である。本発明では、熱流体解析と実験データに基づき、ピッチ比1.5が最適であると判断した。このピッチ比では、冷却水の旋回流れが適度に発生し、熱伝達が促進される一方、圧力損失は許容範囲内に抑えられる。

[0123]

らせん状突起の高さは約1.0mmであり、これは内径の約12%に相当する。突起の断面形状は台形で、頂部の幅は約0.5mm、底部の幅は約1.5mm、突起の角度は約60度である。この形状により、流体に適度な旋回成分が付与され、熱伝達が促進される。突起の角度が急すぎると流体の剥離が生じやすくなり、緩すぎると旋回成分が不足するため、60度という角度は流体力学的に最適化されている。突起の頂部は若干丸みを帯びており、その曲率半径は約0.1mmである。これは、タッピング加工の特性によるものであるが、流体の剥離を抑制する効果もある。

[0124]

冷却管の全長は、ダイバータカセットの設計に応じて変化するが、典型的には約200mmである。冷却管の肉厚は約1.0mmであり、これは内圧（最大15バル）と熱応力に耐えるために十分な厚さである。冷却管の表面粗さは、内面がRa値で約 $3.2\mu\text{m}$ 、外面がRa値で約 $1.6\mu\text{m}$ である。内面の粗さは、タッピング加工の特性によるものであるが、この粗さは核沸騰の発生を促進する効果がある。外面の粗さは、後述するアルミナ絶縁層との密着性を確保するために適切に管理されている。

[0125]

冷却管の両端には、ステンレス鋼（SUS316L）製の接続部が設けられており、冷却系の配管と接続される。接続部の長さは約50mmであり、冷却管との接合には、ろう付けまたは摩擦圧接が用いられる。ろう付けの場合、ろう材にはBCuP-5（銅-リン-銀合金、融点約800°C）を使用し、接合強度は約200MPaである。摩擦圧接の場合、接合面の最高温度は約900°C、接合強度は約250MPaである。接続部の外径は約12mm、内径は約8mmであり、冷却管との接続部には約2mmの重ね代がある。接続部の端部には、JIS 10Kフランジ規格に準拠した接続フランジが設けられている。

[0126]

次に、アーマー材について詳細に説明する。アーマー材はタングステン製のモノブロック型であり、寸法は幅25mm、高さ25mm、長さ12mmである。タングステンは、高い融点（約3400°C）と低いスパッタリング率を有するため、プラズマに直接面する材料として適している。また、熱伝導率も約170W/m・Kと比較的高いため、高熱流束環境下での使用に適している。タングステンの密度は約19.3g/cm³であり、ヤング率は約400GPa、ボアソン比は約0.28である。この材料の線膨張係数は約4.5×10⁻⁶/Kであり、これはCuCrZr合金の線膨張係数（約17×10⁻⁶/K）と大きく異なるため、後述する熱応力緩和層が必要となる。

[0127]

タングステンの純度は99.95%以上であり、主な不純物として酸素（<30ppm）、炭素（<30ppm）、窒素（<20ppm）、鉄（<30ppm）、ニッケル（<20ppm）、シリコン（<20ppm）を含む。これらの不純物は、タングステンの機械的特性や熱的特性に影響を与えるため、厳格に管理されている。特に酸素含有量は、タングステンの脆化に大きく影響するため、30ppm以下に抑えられている。

[0128]

タングステンの結晶粒径は約50～100μmであり、この粒径は機械的強度と靱性のバランスを考慮して選定されている。粒径が小さすぎると強度は向上するが靱性が低下し、大きすぎると靱性は向上するが強度が低下するため、最適な粒径の選定が重要である。結晶粒の形状は等軸状であり、これは等方的な機械的特性を確保するために重要である。結晶粒界には、微量の添加元素（ランタン、カリウムなど）が偏析しており、これにより粒界強度が向上している。

[0129]

モノブロックの中央には、直径約11mmの穴が形成されており、この穴に冷却管が挿入される。穴の軸は、モノブロックの中心軸と一致している。穴の位置精度は約±0.1mmであり、これは冷却性能の均一性を確保するために重要である。穴の真円度は約0.05mm以内であり、これは熱応力緩和層の均一な形成を確保するために重要である。

[0130]

冷却管の外径（10.5mm）と穴の内径（11mm）の間には約0.5mmの隙間があり、この隙間に熱応力緩和層が形成される。隙間の寸法公差は約±0.05mmであり、これは熱応力緩和層の厚さを均一に保つために重要である。穴の内面粗さは、Ra値で約3.2μm以下に管理されており、これは熱応力緩和層との良好な接合を確保するためである。

[0131]

モノブロックの外表面には、プラズマに直接面する側に微細な表面加工が施されている。この加工は、表面積を増加させ、放射冷却効果を向上させる目的で行われる。加工パターンは、幅約0.2mm、深さ約0.1mm、ピッチ約0.5mmの格子状であり、これにより表面積が約1.5倍に増加する。この表面加工は、放電加工またはレーザー加工により形成される。

[0132]

モノブロック型構造は、熱応力に対する耐性が高く、高熱流束条件下での構造的健全性を確保できる。この構造では、熱応力が分散され、アーマー材の破損リスクが低減される。モノブロック間の隙間は約0.5mmであり、これは熱膨張を吸収するとともに、プラズマ粒子の侵入を防ぐために最適化されている。隙間の寸法公差は約±0.1mmであり、これは熱膨張時の干渉を防止するために重要である。

[0133]

熱応力緩和層は、タングステン（線膨張係数約4.5×10⁻⁶/K）とCuCrZr（線膨張係数約17×10⁻⁶/K）の線膨張係数の差による熱応力を緩和するためのものである。本発明では、以下の2種類の熱応力緩和層を提案する：

[0134]

1) 純銅層と酸素不含有銅（OFC）層の二層構造：純銅層（厚さ約0.3mm）はタングステン側に、OFC層（厚さ約0.2mm）はCuCrZr側に配置される。純銅は、高い熱伝導率（約400W/m・K）を有し、タングステンとの接合性が良好である。純銅の純度は99.99%以上であり、主な不純物として酸素（<5ppm）、硫黄（<5ppm）、リン（<5ppm）を含む。純銅の結晶粒径は約20～50μmであり、これは延性と強度のバランスを考慮して選定されている。純銅の硬さはHV値で約40～60であり、これは適度な加工硬化を受けた状態である。

[0135]

純銅は、延性が高く（伸び約30%）、熱応力による変形を吸収することができる。純銅の降伏強度は約50MPa、引張強度は約220MPaであり、これは熱サイクル時の塑性変形を許容するために十分な値である。純銅の線膨張係数は約17×10⁻⁶/Kであり、これはCuCrZrの線膨張係数に近い値である。純銅層の厚さ（0.3mm）は、熱応力解析に基づいて最適化されており、熱応力の緩和効果と熱抵抗のバランスを考慮している。

[0136]

OFC層は、CuCrZrとの接合性が良好であり、二層構造全体として熱応力を緩和する役割を果たす。OFCの酸素含有量は2ppm以下であり、これにより高い熱伝導率（約390W/m・K）と良好な延性（伸び約25%）が確保されている。OFCの硬さはHV値で約50～70であり、これは適度な加工硬化を受けた状態である。OFCの降伏強度は約70MPa、引張強度は約240MPaであり、これは熱サイクル時の機械的安定性を確保するために十分な値である。OFC層の厚さ（0.2mm）は、CuCrZrとの接合強度と熱応力緩和効果のバランスを考慮して選定されている。

[0137]

2) 銅とタングステンの傾斜機能材料（FGM）：タングステン側から銅側に向かって、タングステンの含有率が100%から0%に徐々に減少し、銅の含有率が0%から100%に徐々に増加する5層構造（各層の厚さ約0.1mm、全体の厚さ約0.5mm）。各層の組成は、タングステン側から銅側に向かって、タングステン：銅=100:0、75:25、50:50、25:75、0:100である。

[0138]

FGMの各層の密度は、タングステン側から銅側に向かって、約19.3g/cm³、約16.7g/cm³、約14.1g/cm³、約11.5g/cm³、約8.9g/cm³と徐々に変化する。同様に、熱伝導率も、約170W/m・K、約230W/m・K、約290W/m・K、約350W/m・K、約400W/m・Kと徐々に変化する。

[0139]

この構造により、線膨張係数が徐々に変化し、熱応力の集中を避けることができる。FGMの各層の線膨張係数は、タングステン側から銅側に向かって、約4.5×10⁻⁶/K、約7.5×10⁻⁶/K、約10.5×10⁻⁶/K、約13.5×10⁻⁶/K、約17×10⁻⁶/Kと徐々に変化する。この緩やかな変化により、熱応力が分散され、接合部の破損リスクが低減される。

[0140]

FGMの各層の硬さは、タングステン側から銅側に向かって、HV値で約400、約300、約200、約100、約50と徐々に変化する。同様に、ヤング率も、約400GPa、約330GPa、約260GPa、約190GPa、約130GPaと徐々に変化する。この機械的特性の緩やかな変化により、層間の応力集中が抑制され、構造的信頼性が向上する。

[0141]

冷却管の外表面には、絶縁層としてアルミナ (Al₂O₃) 層が形成されている。アルミナ層の厚さは約100μmであり、核融合炉内での電磁誘導による電流の発生を防止するとともに、冷却管の腐食を抑制する役割を果たす。アルミナは、高い電気絶縁性 (体積抵抗率約10¹⁴Ω・cm) と熱伝導性 (熱伝導率約30W/m・K) を兼ね備えており、核融合炉環境下での使用に適している。

[0142]

アルミナ層の純度は99.5%以上であり、主な不純物としてシリカ (SiO₂, <0.2%)、酸化鉄 (Fe₂O₃, <0.1%)、酸化ナトリウム (Na₂O, <0.1%)、酸化カリウム (K₂O, <0.1%)、酸化カルシウム (CaO, <0.1%)、酸化マグネシウム (MgO, <0.1%) を含む。これらの不純物は、アルミナの電気的特性や熱的特性に影響を与えるため、厳格に管理されている。

[0143]

アルミナ層の結晶構造はα-アルミナ (コランダム) であり、これは熱的安定性と機械的強度に優れている。結晶粒径は約5~10μmであり、これは緻密な構造と高い機械的強度を確保するために最適化されている。アルミナ層の密度は理論密度の約95%以上であり、これは十分な絶縁性と機械的強度を確保するために重要である。

[0144]

アルミナ層の表面粗さは、Ra値で約5μm以下に管理されており、これは熱応力緩和層との良好な接合を確保するためである。アルミナ層の硬さはHV値で約1800であり、これは耐摩耗性を確保するために十分な値である。アルミナ層の破壊靱性値は約4MPa・m^{1/2}であり、これは熱サイクル時の亀裂進展を抑制するために重要である。

[0145]

アルミナ層とCuCrZr冷却管の間には、約5~10μmの中間層が形成されている。この中間層は、アルミナとCuCrZrの反応により生成されたCu-Al-O系の化合物であり、アルミナ層の密着性を向上させる役割を果たす。中間層の組成は、主にCuAlO₂ (デラフォサイト) とCuAl₂O₄ (スピネル) であり、これらは良好な密着性と適度な延性を有している。

[0146]

冷却媒体供給系は、冷却水を循環させるポンプ、熱交換器、および配管系から構成される。ポンプの仕様は、最大圧力20バール、最大流量5kg/sである。ポンプ形式は、高圧・高温水用の多段遠心ポンプであり、モーター出力は約30kWである。ポンプの段数は5段であり、各段の揚程は約4バールである。ポンプの回転速度は約3000rpmであり、これは50Hzの電源周波数に対応している。

[0147]

ポンプ材質は、ステンレス鋼 (SUS316L) であり、耐食性と耐熱性に優れている。ポンプのケーシングの厚さは約15mmであり、これは設計圧力 (20バール) と設計温度 (200°C) に基づいて決定されている。ポンプの軸シールには、メカニカルシールを採用しており、シール材質にはタングステンカーバイドとカーボンの組み合わせを用いている。これにより、高温・高圧下での信頼性の高いシール性能が確保されている。

[0148]

ポンプの回転数は、インバータ制御により0~100%の範囲で可変である。インバータの容量は約40kVAであり、制御精度は約±0.1%である。インバータの冷却方式は強制空冷であり、周囲温度40°C以下で連続運転が可能である。インバータの保護機能には、過電流保護、過電圧保護、不足電圧保護、過熱保護、地絡保護などが含まれている。

[0149]

ポンプの効率は約75%であり、冷却水温度150°C、圧力12バールの条件下で、約2.5kg/sの流量を供給できる。ポンプの特性曲線は、流量0~5kg/sの範囲で、揚程約20~15バールの特性を持つ。ポンプの最高効率点は、流量約3kg/s、揚程約17バールの点である。ポンプのNPSH (有効吸込ヘッド) 要求値は約3mであり、これはキャビテーション防止のために重要なパラメータである。

[0150]

ポンプの振動レベルは、ISO 10816規格のゾーンAに相当する約2.8mm/s以下であり、これは長期間の安定運転を確保するために重要である。ポンプの騒音レベルは、1m離れた位置で約80dB(A)以下であり、これは作業環境の安全性を確保するために重要である。ポンプの寿命は、連続運転で約50,000時間 (約5.7年) であり、これは核融合炉の運転サイクルに対して十分な余裕を持っている。

[0151]

熱交換器は、プレート型熱交換器を採用し、熱交換容量は約50MWである。熱交換器形式は、ガスケット式プレート型熱交換器であり、伝熱面積は約500m²である。プレート枚数は約200枚であり、プレート1枚あたりの伝熱面積は約2.5m²である。プレートの寸法は、幅約0.5m、長さ約1.5m、厚さ約0.6mmである。プレート間の間隔は約3mmであり、これは流路断面積と熱伝達率のバランスを考慮して選定されている。

[0152]

プレート材質はステンレス鋼 (SUS316L)、ガスケット材質はエチレンプロピレンゴム (EPDM) である。プレートの表面には、熱伝達を促進するためのシェブロンパターン (山形パターン) が形成されている。シェブロン角度は約30度であり、これは熱伝達率と圧力損失のバランスを考慮して選定されている。プレートの表面粗さはRa値で約0.4μmであり、これは流体の乱流促進と汚れの付着抑制のために最適化されている。

[0153]

ガスケットの断面形状は、クリップオン型であり、プレートのエッジに嵌め込まれる構造となっている。ガスケットの厚さは約3mmであり、圧縮率は約25%である。ガスケットの耐熱温度は約180°Cであり、これは冷却系の最高温度（約180°C）に対して十分な余裕を持っている。ガスケットの耐圧性能は約25バールであり、これは冷却系の設計圧力（20バール）に対して十分な余裕を持っている。

[0154]

一次側（ダイバータ冷却系）の設計条件は、入口温度約180°C、出口温度約150°C、流量約2.5kg/s、圧力約12バールである。二次側（熱利用系）の設計条件は、入口温度約140°C、出口温度約170°C、流量約2.5kg/s、圧力約5バールである。熱交換器の総合熱伝達係数は約5000W/m²・Kであり、熱交換効率率は約95%である。

[0155]

熱交換器の圧力損失は、一次側約0.5バール、二次側約0.3バールであり、これはポンプ動力を最小化するために最適化されている。熱交換器の設計余裕は約20%であり、これは汚れ係数（約0.2m²・K/kW）を考慮したものである。熱交換器のフレーム材質は炭素鋼（SS400）であり、表面には耐食性を向上させるためのエポキシ塗装（厚さ約100μm）が施されている。

[0156]

熱交換器の接続口径は、一次側、二次側ともにJIS 10K-80Aフランジであり、これは設計流量と流速に基づいて選定されている。熱交換器の重量は、乾燥時約2トン、運転時約2.5トンであり、これは支持構造の設計に考慮されている。熱交換器の寸法は、幅約1m、長さ約3m、高さ約1.5mであり、これは設置スペースの制約に対応している。

[0157]

配管系は、冷却水をポンプからダイバータ冷却管へ、そして熱交換器へと導く役割を担う。配管材料にはステンレス鋼（SUS316L）を使用し、内径は約50mmである。配管の肉厚は約5mmであり、これは設計圧力（20バール）と設計温度（200°C）に基づいて決定されている。配管の設計基準は、ASME B31.1（発電所配管）に準拠しており、安全係数は約4である。

[0158]

配管の接続には、溶接またはフランジ接続を用いる。溶接の場合、TIG溶接（タングステン不活性ガスアーク溶接）を採用し、溶接材料にはSUS316L溶接棒を使用する。溶接部の非破壊検査には、放射線透過試験（RT）または超音波探傷試験（UT）を用い、JIS Z 3104またはJIS Z 3060の1類以上の合格基準を適用する。フランジ接続の場合、JIS 10K規格に準拠したフランジを使用し、ガスケット材質はEPDMである。フランジの締付けトルクは、ボルトサイズに応じて約50～200N・mであり、これはガスケットの適正な圧縮率を確保するために重要である。

[0159]

配管系の支持間隔は約3mであり、これは配管の自重と熱膨張を考慮して決定されている。配管支持構造には、スプリングハンガーやコンスタントハンガーを用い、熱膨張による変位を吸収する。スプリングハンガーのバネ定数は約20～50N/mmであり、これは配管の重量と熱膨張量に基づいて選定されている。配管の熱膨張量は、最大約30mmであり、これは配管長さと同温度差に基づいて計算されている。

[0160]

配管系には、空気抜き弁、ドレン弁、安全弁などが適切に配置されている。空気抜き弁は、配管系の最高点に設置され、系内の空気を排出する役割を担う。空気抜き弁の形式は自動空気抜き弁であり、弁径は約15mmである。弁体材質はステンレス鋼（SUS316）、シート材質はEPDMである。弁の作動圧力範囲は0～20バールであり、最高使用温度は約200°Cである。

[0161]

ドレン弁は、配管系の最低点に設置され、系内の水を排出する役割を担う。ドレン弁の形式はボールバルブであり、弁径は約25mmである。弁体材質はステンレス鋼（SUS316）、シート材質はPTFEである。弁の操作トルクは約10N・mであり、これは手動操作の容易さを確保するために重要である。弁のシール性能は、JIS B 2003のバルブシート漏れ試験のクラス6（気泡の発生がないこと）に相当する。

[0162]

安全弁は、設定圧力（約15バール）を超えた場合に自動的に開き、系内の圧力を逃がす役割を担う。安全弁の形式はスプリング式安全弁であり、弁径は約40mmである。弁体材質はステンレス鋼（SUS316）、スプリング材質はインコネルX-750である。弁の吹出し容量は約5kg/sであり、これは冷却系の最大流量に相当する。弁の設定圧力精度は約±3%であり、これは過圧保護の信頼性を確保するために重要である。

[0163]

また、配管系には、圧力計、流量計、温度計などの計測器が設置されている。圧力計の形式はブルドン管式圧力計であり、測定範囲は0～25バール、精度は±1%F.S.である。圧力計の接続口径は1/2インチ、ケース径は約100mmである。圧力計の接液部材質はステンレス鋼（SUS316）であり、耐食性と耐熱性に優れている。

[0164]

流量計の形式は電磁流量計であり、測定範囲は0～5kg/s、精度は±0.5%F.S.である。流量計の口径は約50mm、長さは約300mmである。流量計の接液部材質はステンレス鋼（SUS316）、ライニング材質はPTFEである。流量計の出力信号は4～20mAであり、これは制御系との互換性を確保するために標準化されている。

[0165]

温度計の形式は測温抵抗体（Pt100）であり、測定範囲は0～200°C、精度は±0.5°Cである。温度計の挿入長さは約100mm、保護管径は約8mmである。温度計の保護管材質はステンレス鋼（SUS316）であり、耐食性と耐熱性に優れている。温度計の出力信号は4～20mAであり、これも制御系との互換性を確保するために標準化されている。

[0166]

配管系の保温材には、グラスウール（密度約40kg/m³）を使用し、厚さは約50mmである。保温材の熱伝導率は約0.04W/m・Kであり、これにより熱損失を約5%以下に抑えることができる。保温材の表面には、アルミニウム板（厚さ約0.5mm）のカバーが施されており、これにより保温材の保護と美観の向上が図られている。

[0167]

制御系は、圧力センサ、流量センサ、温度センサ、および制御装置から構成される。制御系は、冷却媒体の圧力を10～15バール、質量流量を2000～2500kg/m²s、サブクール度を30～40°Cに制御する機能を有する。冷却水の入口温度は約150°C、出口温度は約180°Cである。

[0168]

圧力センサは、冷却系内の圧力を測定する。センサ形式は、ひずみゲージ式圧力センサであり、測定範囲は0～20バール、精度は±0.1%F.S.である。センサの応答時間は約10msであり、これは圧力変化に迅速に対応するために重要である。センサの過負荷耐性は最大約50バールであり、これは異常圧力時の損傷を防止するために重要である。

[0169]

センサ材質はステンレス鋼（SUS316L）であり、耐食性と耐熱性に優れている。センサのダイアフラム材質は Hastelloy C であり、これは高温・高圧の水環境下での耐食性を確保するために選定されている。センサの接続口径は1/4インチNPTであり、これは配管系との接続の標準化のために選定されている。

[0170]

センサの出力信号は4～20mAの電流信号であり、制御装置に入力される。センサの電源電圧は24V DCであり、消費電力は約0.5Wである。センサの保護等級はIP65であり、これは水の飛沫からの保護を確保するために重要である。センサの設置位置は、ポンプの出口、冷却管の入口と出口、熱交換器の入口と出口など、冷却系の主要部分である。

[0171]

流量センサは、冷却水の流量を測定する。センサ形式は、電磁流量計であり、測定範囲は0～5kg/s、精度は±0.5%F.S.である。センサの応答時間は約100msであり、これは流量変化に迅速に対応するために重要である。センサの最小検出流量は約0.05kg/s（フルスケールの1%）であり、これは低流量時の制御精度を確保するために重要である。

[0172]

センサ材質はステンレス鋼（SUS316L）、ライニング材質はポリテトラフルオロエチレン（PTFE）である。センサの電極材質は Hastelloy C であり、これは高温・高圧の水環境下での耐食性を確保するために選定されている。センサの口径は約50mmであり、これは設計流量と流速に基づいて選定されている。

[0173]

センサの出力信号は4～20mAの電流信号であり、制御装置に入力される。センサの電源電圧は100V ACであり、消費電力は約10Wである。センサの保護等級はIP67であり、これは一時的な水没からの保護を確保するために重要である。センサの設置位置は、各冷却ループの入口部分である。

[0174]

温度センサは、冷却水の温度を測定する。センサ形式は、測温抵抗体（Pt100）であり、測定範囲は0～200°C、精度は±0.1°Cである。センサの応答時間は約1秒であり、これは温度変化に適切に対応するために重要である。センサの自己発熱誤差は約0.05°C以下であり、これは測定精度を確保するために重要である。

[0175]

センサ材質はステンレス鋼（SUS316L）、素子材質は白金である。センサの挿入長さは約100mmであり、これは配管中心部の温度を正確に測定するために選定されている。センサの保護管径は約6mmであり、これは応答性と強度のバランスを考慮して選定されている。

[0176]

センサの出力信号は4～20mAの電流信号であり、制御装置に入力される。センサの電源電圧は24V DCであり、消費電力は約0.1Wである。センサの保護等級はIP65であり、これは水の飛沫からの保護を確保するために重要である。センサの設置位置は、冷却水の入口と出口、熱交換器の入口と出口など、冷却系の主要部分である。

[0177]

制御装置は、各センサからの信号に基づいて、ポンプの回転数を制御し、最適な冷却条件を維持する。装置形式は、プログラマブルロジックコントローラ（PLC）であり、CPU性能は約100MIPS、メモリ容量は約1MBである。CPUの演算周期は約10msであり、これは制御応答性を確保するために重要である。メモリはフラッシュROMとSDRAMの組み合わせであり、プログラムの不揮発性と高速アクセスを両立している。

[0178]

入力点数は約100点、出力点数は約50点であり、アナログ入力（4～20mA）、アナログ出力（4～20mA）、デジタル入力、デジタル出力に対応している。アナログ入力の分解能は16ビット（約65,000段階）であり、これは高精度な測定を確保するために重要である。アナログ出力の分解能は12ビット（約4,000段階）であり、これは滑らかな制御出力を確保するために重要である。

[0179]

制御周期は約100msであり、高速な制御が可能である。この制御周期は、冷却系の応答時間（約1～10秒）に対して十分に短く、安定した制御を実現できる。制御装置の電源電圧は100V ACであり、消費電力は約100Wである。電源には無停電電源装置（UPS）が接続されており、停電時にも約30分間の運転が可能である。

[0180]

制御アルゴリズムは、PID制御を基本とし、フィードフォワード制御やカスケード制御などの高度な制御機能も実装されている。PID制御のゲイン（比例ゲイン、積分時間、微分時間）は、冷却系の動特性に基づいて最適化されている。比例ゲインは約5.0、積分時間は約60秒、微分時間は約10秒である。これらのパラメータは、冷却系の応答性と安定性のバランスを考慮して選定されている。

[0181]

フィードフォワード制御は、熱負荷の変動を予測し、事前に制御出力を調整する機能である。熱負荷の予測には、プラズマ電流やプラズマ密度などのパラメータを用い、これらと熱負荷の関係を数学モデルで表現している。このモデルの精度は約±10%であり、これは予測制御の効果を確保するために十分な値である。

[0182]

カスケード制御は、内側ループと外側ループの2重のフィードバック制御を行う機能である。外側ループでは、アーマー表面温度を目標値に制御し、内側ループでは、冷却水流量を外側ループからの指令値に制御する。この2重のループにより、外乱に対する応答性と安定性が向上する。外側ループの制御周期は約1秒、内側ループの制御周期は約100msであり、これは各ループの応答時間に基づいて最適化されている。

[0183]

また、制御装置には、異常検知機能や自己診断機能も備えており、システムの信頼性を向上させている。異常検知機能は、センサ値の上下限監視、変化率監視、センサ間の整合性監視などを行い、異常を早期に発見する。上下限監視の設定値は、通常運転範囲の約±20%であり、これは誤警報を抑制しつつ、異常を確実に検出するために最適化されている。変化率監視の設定値は、通常の変化率の約5倍であり、これも同様の理由で最適化されている。

[0184]

自己診断機能は、CPU、メモリ、入出力モジュールなどのハードウェア診断、通信回線の診断、プログラムの整合性診断などを行い、制御装置自体の健全性を確認する。診断周期は約1秒であり、異常が検出された場合は、警報を発するとともに、安全側の制御出力（例えば、ポンプの停止）を行う。診断の信頼性を向上させるために、重要な診断項目は冗長化されており、2重または3重のチェックが行われる。

[0185]

制御装置の操作インターフェースには、タッチパネル式の液晶ディスプレイを採用している。ディスプレイサイズは約15インチ、解像度は1024×768ピクセルであり、これは操作性と視認性を確保するために選定されている。ディスプレイの輝度は約400cd/m²であり、これは明るい環境下での視認性を確保するために重要である。ディスプレイの視野角は水平約170度、垂直約160度であり、これは様々な角度からの操作を可能にするために重要である。

[0186]

操作画面には、系統図表示、トレンドグラフ表示、アラーム表示、パラメータ設定画面などがあり、直感的な操作が可能である。系統図表示では、冷却系の構成機器とセンサ値がリアルタイムで表示され、システム全体の状態を一目で把握できる。トレンドグラフ表示では、主要パラメータの時間変化が表示され、システムの動的挙動を把握できる。グラフの時間スケールは、リアルタイム（1分間）から長期（24時間）まで切り替え可能であり、様々な時間スケールの分析に対応している。

[0187]

アラーム表示では、発生中のアラームと履歴が表示され、異常の早期発見と原因分析が可能である。アラームは重要度に応じて色分けされ（赤：重大、黄：警告、青：情報）、優先度の高いアラームから対応できる。アラーム履歴は最大1000件まで保存され、日時、アラーム内容、確認状況などが記録される。

[0188]

パラメータ設定画面では、制御パラメータやアラーム設定値などを変更できる。パラメータの変更には、操作者の認証が必要であり、不正な操作を防止している。認証レベルは、監視のみ、パラメータ変更、プログラム変更の3段階があり、操作者の権限に応じたアクセス制限が設けられている。

[0189]

本発明の冷却システムは、複数の冷却ループが並列配置された冗長構造を有する。具体的には、2つの独立した冷却ループを設け、各ループが全体の冷却能力の60%を担うように設計されている。これにより、1つのループが完全に機能を失った場合でも、残りのループで必要最小限の冷却能力（全体の60%）を確保できる。この冗長設計により、冷却システムの信頼性と安全性が大幅に向上する。

[0190]

各冷却ループは、独立したポンプ、熱交換器、配管系、制御系を持ち、相互に影響を与えることなく運転できる。2つのループは物理的に分離されており、一方のループの故障が他方に波及することを防いでいる。ループ間の最小距離は約1mであり、これは火災や機械的損傷の影響範囲を考慮して決定されている。

[0191]

各冷却ループには独立した流量制御弁が設けられており、熱負荷分布に応じて流量を調整することができる。流量制御弁は、電動アクチュエータで駆動される比例制御弁であり、0～100%の範囲で開度を調整できる。弁の応答時間は約1秒であり、熱負荷の変動に迅速に対応できる。

[0192]

弁の形式は、等パーセント特性を持つグローブバルブであり、これは広い流量範囲での安定した制御を可能にする。等パーセント特性とは、弁開度の変化率に対する流量の変化率が一定である特性であり、これにより低流量から高流量まで均一な制御感度が得られる。弁の流量係数（Cv値）は約30であり、これは設計流量と差圧に基づいて選定されている。

[0193]

弁体材質はステンレス鋼（SUS316）、シート材質はステライト（コバルト-クロム-タングステン合金）である。ステライトは、高温・高圧下での耐摩耗性に優れており、長期間の安定した弁座シール性能を確保できる。弁のパッキン材質はグラファイト系であり、これは高温での耐久性と低摩擦特性を兼ね備えている。

[0194]

弁のアクチュエータは、電動式であり、モーター出力は約100Wである。アクチュエータの電源電圧は100V ACであり、消費電流は約1Aである。アクチュエータの保護等級はIP65であり、これは水の飛沫からの保護を確保するために重要である。アクチュエータには、手動操作機構も備えられており、電源喪失時にも弁の操作が可能である。

[0195]

弁の制御信号は4～20mAであり、これは制御系との互換性を確保するために標準化されている。弁の位置フィードバック信号も4～20mAであり、これにより弁の実際の開度を監視することができる。弁の位置精度は約±2%であり、これは流量制御の精度を確保するために重要である。

[0196]

また、流量制御弁の上流には、ストレーナが設置され、冷却水中の異物を捕捉し、弁の詰まりを防止する。ストレーナのメッシュサイズは約100μmであり、これは冷却系内の想定される異物のサイズに基づいて選定されている。ストレーナの材質はステンレス鋼（SUS316L）であり、耐食性と耐熱性に優れている。

[0197]

ストレーナの形式はY型であり、これは流路の直線性と低圧力損失を確保するために選定されている。ストレーナの圧力損失は、定格流量時で約0.1バー
ル以下であり、これはポンプ動力を最小化するために最適化されている。ストレーナには、差圧計が接続されており、目詰まりの状態を監視することが
できる。差圧が設定値（約0.3バー）を超えた場合、警報が発せられ、ストレーナの清掃が必要であることが通知される。

[0198]

また、本発明の冷却システムは、モジュラー設計を採用している。ダイバート全体は12個のカセットで構成され、各カセットは独立して交換可能である。
各カセットは、トロイダル方向に約30度の範囲をカバーし、ポロイダル方向には内側ターゲット、ドーム部、外側ターゲットを含む。カセットの寸法は、
幅約1m、高さ約0.5m、奥行き約0.5mであり、重量は約500kgである。

[0199]

カセットの構造材料には、ステンレス鋼（SUS316L）を使用している。構造材の厚さは、応力解析に基づいて決定されており、典型的には約20mmであ
る。構造材の降伏強度は約200MPa、引張強度は約500MPaであり、これは機械的荷重と熱応力に耐えるために十分な値である。構造材の熱伝導率は約
15W/m・Kであり、これは熱応力を緩和するために適切な値である。

[0200]

カセット内部には、冷却管、アーマー材、支持構造などが配置されている。支持構造は、アーマー材を適切な位置に固定するとともに、熱膨張を吸収する
役割を担う。支持構造の材質には、高温強度に優れたインコネル718を使用している。インコネル718は、ニッケル-クロム基超合金であり、高温での強度
と耐食性に優れている。この合金の降伏強度は約1000MPa、引張強度は約1200MPaであり、これは高温環境下での構造的安定性を確保するために十分な値
である。

[0201]

支持構造の形状は、フレキシブルカンチレバー型であり、これは熱膨張による変位を許容するために選定されている。カンチレバーの長さは約50mm、幅
は約10mm、厚さは約2mmであり、これは剛性と柔軟性のバランスを考慮して決定されている。カンチレバーの先端には、アーマー材を固定するための溝
が設けられており、アーマー材はこの溝に嵌め込まれる。溝の幅は約2mm、深さは約5mmであり、これはアーマー材の寸法と熱膨張を考慮して決定されて
いる。

[0202]

カセットの接続部には、標準化されたフランジと自動着脱式のクイックカップリングが設けられており、遠隔操作での交換が容易になっている。フランジ
には、位置決めピンと締結ボルトが設けられており、遠隔操作装置による正確な位置決めと確実な締結が可能である。位置決めピンの直径は約20mm、長
さは約50mmであり、位置決め精度は約±0.5mmである。

[0203]

位置決めピンの材質はステンレス鋼（SUS316L）であり、表面には耐磨耗性を向上させるためのクロムめっき（厚さ約50μm）が施されている。ピンの先
端は、テーパ形状（角度約15度）となっており、これは位置決めの容易さを確保するために重要である。ピンの根元には、応力集中を緩和するための
丸み（半径約3mm）が設けられている。

[0204]

締結ボルトは、M20サイズであり、材質は高温強度に優れたインコネル718である。ボルトの長さは約100mm、ねじピッチは2.5mmであり、これは締結力
と操作性のバランスを考慮して選定されている。ボルトの頭部形状は六角穴付きであり、これは遠隔操作工具との適合性を確保するために選定されてい
る。六角穴のサイズは対辺10mmであり、これは締付けトルク（約200N・m）に対して十分な強度を持つ。

[0205]

ボルトの締付け方法は、トルク制御方式であり、これは締結力の均一性を確保するために重要である。締付けトルクは約200N・mであり、これはボルトの
降伏強度の約70%に相当する軸力を発生させる。ボルトには、緩み止め機構としてペロワッシャが使用されており、これは振動による緩みを防止するた
めに重要である。ペロワッシャの材質はインコネル718であり、厚さは約2mmである。

[0206]

冷却水の接続には、自動着脱式のクイックカップリングを採用し、遠隔操作での接続・切断を容易にする。クイックカップリングは、プッシュプル式であ
り、接続時には自動的にロックされる機構を持つ。カップリングの材質はステンレス鋼（SUS316L）であり、シール材質はポリテトラフルオロエチレン
（PTFE）である。PTFEは、高温での耐久性と低摩擦特性を兼ね備えており、繰り返しの接続・切断に対して安定したシール性能を発揮する。

[0207]

カップリングの口径は約25mmであり、これは設計流量と流速に基づいて選定されている。カップリングの設計圧力は20バー、設計温度は200°Cであり、
これは冷却系の運転条件に対して十分な余裕を持っている。カップリングの接続力は約100Nであり、これは遠隔操作装置の能力内で操作可能な値であ
る。カップリングのシール性能は、JIS B 2003のバルブシート漏れ試験のクラス6（気泡の発生がないこと）に相当する。

[0208]

カップリングの接続部には、位置合わせガイドが設けられており、これは接続の容易さを確保するために重要である。ガイドの形状は円錐状であり、先端
角度は約30度、長さは約20mmである。これにより、約±5mmの位置ずれがあっても、スムーズな接続が可能となる。また、カップリングには、接続状態
を確認するための機械的インジケータが設けられており、これは遠隔操作での接続確認を容易にする。インジケータは、接続時に約5mm突出し、赤色の
マーキングが露出する構造となっている。

[0209]

さらに、本発明の冷却システムは、熱負荷監視システムと漏洩検知システムを備えている。熱負荷監視システムは、アーマー材の表面温度を赤外線カメラ
で監視し、異常な温度上昇を検出した場合に警報を発する。また、冷却水の入口温度と出口温度の差から熱負荷を計算し、設計値との比較を行う。

[0210]

赤外線カメラは、波長範囲3~5μmまたは8~14μmの赤外線を検出し、温度範囲200~2000°Cを測定できる性能を持つ。3~5μmの波長帯は、中赤外線と呼
ばれ、高温物体の測定に適している。8~14μmの波長帯は、遠赤外線と呼ばれ、比較的低温の物体の測定に適している。本システムでは、アーマー材の予
想温度範囲（約500~1500°C）に対応するため、3~5μmの波長帯を選択している。

[0211]

カメラの検出素子には、冷却型のインジウム-アンチモン (InSb) 検出器を使用している。InSb検出器は、3~5 μm の波長帯で高い感度を持ち、高精度な温度測定が可能である。検出器の冷却には、スターリング冷凍機を用い、検出器温度を約77K (-196 $^{\circ}\text{C}$) に維持している。これにより、熱ノイズを低減し、高い検出感度を実現している。

[0212]

カメラの空間分解能は約5mm (測定距離3mにおいて) であり、温度分解能は約 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ である。空間分解能は、カメラの光学系 (レンズの焦点距離と口径) と検出器の画素サイズによって決定される。本システムでは、焦点距離約100mm、口径約F2.0のゲルマニウムレンズを使用し、検出器の画素サイズは約25 μm 角、画素数は640 \times 512である。これにより、約0.75mrad (約0.043度) の視野角分解能が得られ、測定距離3mにおいて約5mmの空間分解能となる。

[0213]

温度分解能は、検出器のノイズ等価温度差 (NETD) によって決定される。本システムでは、NETDは約0.025 $^{\circ}\text{C}$ であり、これに信号処理系のノイズや校正誤差を加味して、総合的な温度分解能は約 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ としている。この温度分解能は、アーマー材の予想温度範囲 (約500~1500 $^{\circ}\text{C}$) に対して十分に高い精度である。

[0214]

カメラは、核融合炉の真空容器外部に設置され、観測窓を通してダイバーク表面を監視する。観測窓には、赤外線透過し、可視光や紫外線を遮断するフィルターが設けられている。フィルター材質は、ゲルマニウム (Ge) またはセレン化亜鉛 (ZnSe) であり、透過率は80%以上である。ゲルマニウムは、3~5 μm の波長帯で高い透過率を持ち、機械的強度も高いため、本システムに適している。フィルターの厚さは約5mmであり、これは機械的強度と光学特性のバランスを考慮して決定されている。

[0215]

観測窓の設計圧力は約0.1MPa (大気圧との差圧)、設計温度は約200 $^{\circ}\text{C}$ であり、これは真空容器の運転条件に対して十分な余裕を持っている。窓の直径は約100mm、厚さは約10mmであり、これは機械的強度と光学性能のバランスを考慮して決定されている。窓の取付け方法は、メタルリングによるシール方式であり、これは高真空環境での信頼性の高いシール性能を確保するために選定されている。

[0216]

カメラの映像信号は、光ファイバーケーブルを通じて制御室に伝送される。光ファイバーの種類はマルチモード型、コア径は約50 μm 、長さは約100mである。光ファイバーの伝送帯域は約1Gbpsであり、これは高解像度の映像信号を伝送するために十分な帯域である。光ファイバーは、電磁ノイズの影響を受けないという利点があり、核融合炉の強磁場環境下でも安定した信号伝送が可能である。

[0217]

制御室では、専用のコンピュータで映像信号を処理し、温度分布をリアルタイムで表示する。コンピュータの処理能力は約3GHz、メモリ容量は約8GB、ストレージ容量は約1TBであり、これは高解像度の映像処理と長時間の記録に対応するために選定されている。ディスプレイは約24インチ、解像度は1920 \times 1080ピクセルであり、これは詳細な温度分布の観察を可能にするために選定されている。

[0218]

温度分布の表示には、疑似カラー表示を採用している。温度範囲は、青 (低温) から赤 (高温) までの色調で表現され、温度と色の対応関係は調整可能である。典型的な設定では、500 $^{\circ}\text{C}$ を青、1000 $^{\circ}\text{C}$ を緑、1500 $^{\circ}\text{C}$ を赤としている。また、特定の温度範囲を強調表示する機能もあり、異常な高温部の検出を容易にしている。

[0219]

熱負荷計算は、冷却水の入口温度と出口温度の差、および流量から行われる。具体的には、以下の式を用いる。

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$

ここで、Qは熱負荷[W]、mは質量流量[kg/s]、C_pは冷却水の比熱[J/kg \cdot K]、T_{in}は入口温度[K]、T_{out}は出口温度[K]である。

[0220]

冷却水の比熱は温度に依存し、150~180 $^{\circ}\text{C}$ の範囲では約4.3kJ/kg \cdot Kである。より正確には、IAPWS-IF97 (水と水蒸気の産業用計算式) に基づいて、温度と圧力の関数として比熱を計算する。例えば、温度150 $^{\circ}\text{C}$ 、圧力12バールでの比熱は約4.31kJ/kg \cdot K、温度180 $^{\circ}\text{C}$ 、圧力12バールでの比熱は約4.35kJ/kg \cdot Kである。熱負荷計算では、入口温度と出口温度の平均値における比熱を用いることで、計算精度を向上させている。

[0221]

熱負荷の計算精度は、温度測定精度と流量測定精度に依存する。温度測定精度は約 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、流量測定精度は約 $\pm 0.5\%$ であり、これらを考慮した熱負荷の計算精度は約 $\pm 1\%$ である。この精度は、熱負荷の監視と制御に十分な値である。

[0222]

計算された熱負荷は、設計値と比較され、異常がないか監視される。熱負荷が設計値の $\pm 10\%$ を超えた場合、警報が発せられ、運転パラメータの調整が必要であることが通知される。また、熱負荷の時間変化も監視され、急激な変化 (例えば、1分間で20%以上の変化) が検出された場合も警報が発せられる。

[0223]

漏洩検知システムは、冷却水の圧力変化を監視し、急激な圧力低下を検出した場合に警報を発する。また、真空容器内の湿度センサにより、冷却水の漏洩を検知する機能も備えている。

[0224]

圧力監視には、測定範囲0~20バール、精度 $\pm 0.1\%$ のひずみゲージ式圧力センサを使用する。圧力センサは、冷却系の複数箇所に設置され、圧力分布を連続的に測定する。センサの設置位置は、ポンプの出口、各冷却ループの入口と出口、各カセットの入口と出口などであり、これにより漏洩位置の特定が容易になる。

[0225]

圧力の測定周期は約0.1秒であり、これは漏洩の早期検出に重要である。圧力の測定値は、デジタルフィルタ (移動平均フィルタ、時定数約1秒) で平滑化され、ノイズの影響を低減している。フィルタ処理後の圧力値の変化率を計算し、設定値 (約0.1バール/秒) を超えた場合、漏洩の可能性があるかと判断される。

[0226]

圧力の急激な低下（例えば、1秒間に1バル以上の低下）が検出された場合、警報が発せられ、自動的に冷却系の隔離弁が閉じられる。隔離弁は、空気作動式の緊急遮断弁であり、通常時は開状態、非常時は閉状態となる。弁の駆動源は圧縮空気（約0.5MPa）であり、電磁弁の切替えにより弁の開閉を制御する。電磁弁の電源は、フェイルセーフ設計（通電時間、非通電時間）となっており、電源喪失時にも安全側に作動する。

[0227]

弁の応答時間は約0.5秒であり、漏洩の拡大を最小限に抑えることができる。弁の全閉時間は約2秒であり、これは水撃作用（ウォーターハンマー）を防止するために適切に調整されている。弁の閉鎖特性は、初期の50%は約0.5秒で閉じ、残りの50%は約1.5秒で徐々に閉じる特性となっている。これにより、急激な流量変化による圧力上昇を抑制している。

[0228]

隔離弁の材質はステンレス鋼（SUS316L）、シート材質はステライトであり、これらは高温・高圧の水環境下での耐久性を確保するために選定されている。弁の口径は約50mmであり、これは設計流量と緊急遮断時間に基づいて選定されている。弁の設計圧力は20バル、設計温度は200°Cであり、これは冷却系の運転条件に対して十分な余裕を持っている。

[0229]

湿度センサは、静電容量式湿度センサであり、相対湿度0~100%の範囲を測定できる。センサの精度は±2%RHであり、応答時間は約5秒である。センサの検出素子は、ポリイミド基板上に形成された金電極間に、湿度に応じて静電容量が変化する高分子膜（ポリイミドなど）を配置した構造である。この構造により、高温・高湿度環境下でも安定した測定が可能となる。

[0230]

センサの動作温度範囲は-40~200°Cであり、これは真空容器内の温度条件（約100~150°C）に対して十分な余裕を持っている。センサの電源電圧は24V DC、消費電力は約0.1Wである。センサの出力信号は4~20mAの電流信号であり、制御系との互換性を確保するために標準化されている。

[0231]

湿度センサは、真空容器内の複数箇所に設置され、局所的な湿度上昇を検知する。センサの設置位置は、各カセットの近傍、真空容器の底部、排気ダクトの入口などであり、これにより漏洩位置の特定が容易になる。センサの保護には、多孔質のステンレス鋼フィルター（孔径約10μm）を用い、プラズマからの熱や粒子の直接照射を防いでいる。

[0232]

湿度の測定周期は約1秒であり、これは漏洩の早期検出に重要である。湿度の測定値は、デジタルフィルタ（移動平均フィルタ、時定数約10秒）で平滑化され、ノイズの影響を低減している。フィルタ処理後の湿度値の変化率を計算し、設定値（約1%RH/分）を超えた場合、漏洩の可能性がある判断される。

[0233]

湿度の急激な上昇（例えば、1分間に10%以上の上昇）が検出された場合、警報が発せられ、冷却水の漏洩位置の特定が行われる。漏洩位置の特定には、複数の湿度センサの測定値の比較、および赤外線カメラによる温度分布の観察が用いられる。湿度センサの測定値が最も高い位置が、漏洩位置の候補となる。また、漏洩が発生すると、局所的に温度が低下するため、赤外線カメラでこの温度低下を検出することで、漏洩位置を特定できる。

[0234]

漏洩が確認された場合、該当するカセットの冷却系を隔離し、プラズマ運転を安全に停止する手順が実行される。隔離操作は、遠隔操作または自動制御により行われ、漏洩の拡大を防止する。プラズマ運転の停止は、段階的に行われ、まず加熱入力を低下させ、次にプラズマ電流を徐々に減少させる。これにより、熱負荷の急激な変化を避け、残りのカセットの冷却系への負担を最小化する。

[0235]

次に、本発明の冷却システムの製造プロセスについて詳細に説明する。

[0236]

まず、CuCrZr合金の製造から始める。高純度の銅（純度99.9%以上）、クロム（純度99.5%以上）、ジルコニウム（純度99.5%以上）を所定の比率で配合し、真空誘導炉で溶解する。配合比は、銅98.7重量%、クロム1.1重量%、ジルコニウム0.2重量%である。この配合比は、熱伝導率と機械的強度のバランスを考慮して最適化されている。

[0237]

溶解温度は約1300°C、溶解時間は約1時間である。溶解中は、アルゴンガス（純度99.999%以上）で保護し、酸化を防止する。アルゴンガスの流量は約10L/分であり、これは溶湯表面の酸化を防止するために十分な流量である。溶湯は定期的に攪拌され、成分の均一化が図られる。攪拌には、黒鉛製の攪拌棒を用い、回転速度は約60rpm、攪拌時間は約10分間隔で各1分である。

[0238]

溶湯の温度管理には、熱電対（R型、白金-白金ロジウム）を用い、測定精度は約±5°Cである。溶湯の温度は、溶解初期は約1350°C、均一化後は約1300°Cに維持される。溶湯の温度が均一化されたことを確認するために、溶湯の異なる位置で温度測定を行い、温度差が±10°C以内であることを確認する。

[0239]

溶湯を金型に鋳造してインゴットを形成する。金型材質は銅合金であり、予め約200°Cに予熱されている。金型の予熱には、電気ヒーターを用い、温度均一性は約±20°C以内に管理されている。金型の内面には、離型剤（グラファイト系）が塗布されており、これはインゴットの取り出しを容易にするために重要である。

[0240]

鋳造温度は約1200°Cであり、鋳造速度は約50kg/分である。鋳造中は、アルゴンガス（純度99.999%以上）で保護し、酸化を防止する。アルゴンガスの流量は約20L/分であり、これは鋳造中の溶湯の酸化を防止するために十分な流量である。鋳造後のインゴットの寸法は、直径約200mm、長さ約500mmであり、重量は約150kgである。

[0241]

鑄造後のインゴットは、約800°Cで約4時間の均質化熱処理を施される。熱処理炉は、電気加熱式の箱型炉であり、温度均一性は約±10°C以内に管理されている。熱処理雰囲気は、アルゴンガス（純度99.999%以上）であり、酸化を防止している。アルゴンガスの流量は約5L/分であり、これは熱処理中のインゴットの酸化を防止するために十分な流量である。

[0242]

この熱処理により、鑄造時に生じた偏析が軽減され、組織が均一化される。熱処理後のインゴットの組織は、光学顕微鏡で観察され、偏析の程度が評価される。許容される偏析の程度は、クロムとジルコニウムの濃度変動が±10%以内であることである。

[0243]

次に、インゴットを熱間押し出しにより棒材に加工する。押し出し温度は約900°C、押し出し比は約10:1である。押し出し前に、インゴットは約900°Cで約2時間の予熱を行う。予熱炉は、電気加熱式の箱型炉であり、温度均一性は約±10°C以内に管理されている。予熱雰囲気は、アルゴンガス（純度99.999%以上）であり、酸化を防止している。

[0244]

押し出し機は、水平型の直接押し出し機であり、最大加圧力は約2000トンである。押し出しダイスの材質は工具鋼（SKD61）であり、ダイス角度は約60度、ベアリング長さは約10mmである。ダイスの表面には、窒化処理（深さ約0.1mm）が施されており、これは耐摩耗性を向上させるために重要である。

[0245]

押し出し速度は約5mm/秒であり、これは材料の変形抵抗と設備能力に基づいて決定されている。押し出し圧力は約1000トンであり、これは材料の変形抵抗と断面減少率に基づいて決定されている。押し出し中は、ダイスと材料の間に潤滑剤（グラファイト系）を塗布し、摩擦を低減している。

[0246]

押し出し後の棒材の直径は約60mmであり、長さは約5mである。押し出し後の棒材は、水冷により急冷される。冷却水の温度は約20°C、流量は約100L/分であり、これにより棒材の表面温度は約1秒で500°C以下に低下する。この急冷により、結晶粒の粗大化が抑制され、微細な組織が得られる。

[0247]

次に、棒材を冷間引抜きにより、直径約15mmまで加工する。引抜きは、多段階で行われ、各段階での断面減少率は約20%である。引抜きダイスの材質は超硬合金（WC-Co系）であり、ダイス角度は約12度、ベアリング長さは約0.5mmである。引抜き速度は約10m/分であり、これは材料の変形抵抗と設備能力に基づいて決定されている。

[0248]

引抜き中は、ダイスと材料の間に潤滑剤（鉱物油ベース）を塗布し、摩擦を低減している。潤滑油の粘度は約100cStであり、これは引抜き速度と摩擦係数のバランスを考慮して選定されている。引抜き後の棒材の表面粗さはRa値で約0.8μmであり、これは後工程での加工精度を確保するために重要である。

[0249]

その後、棒材に溶体化処理（約980°Cで1時間保持後、水冷）と時効処理（約480°Cで2時間保持後、空冷）を施し、所定の機械的特性を得る。溶体化処理は、クロムとジルコニウムを固溶体として均一に分散させる目的で行われる。処理温度（980°C）は、固溶限に基づいて決定されている。

[0250]

溶体化処理炉は、電気加熱式の管状炉であり、温度均一性は約±5°C以内に管理されている。処理雰囲気は、アルゴンガス（純度99.999%以上）であり、酸化を防止している。アルゴンガスの流量は約10L/分であり、これは処理中の棒材の酸化を防止するために十分な流量である。

[0251]

溶体化処理後の水冷は、約20°Cの水中に棒材を急速に浸漬することで行われる。水の流量は約200L/分であり、これにより棒材の中心部までの冷却速度は約100°C/秒以上となる。この急冷により、クロムとジルコニウムが過飽和固溶体として凍結され、後の時効処理での析出強化の基礎となる。

[0252]

時効処理は、クロムとジルコニウムの析出物を形成させ、強度を向上させる目的で行われる。処理温度（480°C）と時間（2時間）は、析出物の大きさと分布を最適化するために選定されている。時効処理炉は、電気加熱式の箱型炉であり、温度均一性は約±5°C以内に管理されている。処理雰囲気は、アルゴンガス（純度99.999%以上）であり、酸化を防止している。

[0253]

時効処理後の空冷は、室温（約20°C）の静止空気中で自然冷却することで行われる。冷却速度は約0.5°C/秒であり、これは内部応力の発生を抑制するために適切な値である。時効処理後の棒材の硬さはHV値で約120～140であり、これは適切な時効状態であることを示している。

[0254]

熱処理後の棒材の機械的特性は、引張試験により評価される。引張試験片の形状はJIS Z 2201の4号試験片（平行部直径約8mm、標点距離約40mm）であり、試験速度は約1mm/分である。要求される機械的特性は、降伏強度約300MPa以上、引張強度約400MPa以上、伸び約20%以上である。また、熱伝導率も測定され、要求値は約350W/m・K以上である。

[0255]

次に、CuCrZr棒材からHNS冷却管を製造する。CuCrZr棒材（直径約15mm）に、直径10.5mmの穴をドリル加工で開ける。ドリルの材質は高速度鋼（HSS）であり、回転速度は約500rpm、送り速度は約0.1mm/revである。ドリルの直径は約10.5mm、先端角度は約118度、ねじれ角は約30度である。

[0256]

切削油には、硫黄系の添加剤を含む切削油を使用し、切削性と表面粗さを向上させる。切削油の粘度は約10cStであり、これは切削熱の除去と潤滑性のバランスを考慮して選定されている。切削油の供給方法は、内部給油方式であり、供給圧力は約0.5MPa、流量は約10L/分である。

[0257]

ドリル加工後の穴の真円度は約0.05mm以内、表面粗さはRa値で約3.2μmである。これらの精度は、後工程のタッピング加工の精度を確保するために重要である。穴の寸法精度は、内径ゲージにより測定され、公差は約±0.05mmである。

[0258]

次に、M10タップを用いて内部にらせん状の突起構造を形成する。タッピングは専用の旋盤を用いて行い、タップの回転速度は約100rpm、送り速度は約1.5mm/revである。タップの材質は高速度鋼（HSS）であり、表面には窒化処理（深さ約0.05mm）が施されている。これにより、耐摩耗性が向上し、多数の加工に耐えることができる。

[0259]

タップのサイズはM10、ピッチは1.5mmであり、これはヘリカルナット表面の設計に基づいて選定されている。タップの山の角度は約60度、山の高さは約1.0mmである。タップの先端には、導入部（約3山分）があり、これは加工の開始を容易にするために重要である。

[0260]

切削油には、硫黄系の添加剤を含む切削油を使用する。切削油の粘度は約15cStであり、これはタッピング加工の特性に合わせて選定されている。切削油の供給方法は、外部給油方式であり、供給圧力は約0.3MPa、流量は約5L/分である。

[0261]

タッピング加工の精度を確保するために、加工中の振動と温度上昇を最小限に抑える必要がある。振動の抑制には、高剛性の工具ホルダーと適切な回転速度の選定が重要である。温度上昇の抑制には、適切な切削油の供給と適切な送り速度の選定が重要である。

[0262]

タッピング後、冷却管の内径は約8.5mmとなる。内径の測定には、特殊な内径ゲージを用い、公差は約±0.1mmである。らせん状突起の高さは約1.0mmであり、これは設計値に対して約±0.1mmの公差で管理されている。らせん状突起の角度は約60度であり、これも設計値に対して約±2度の公差で管理されている。

[0263]

タッピング後、冷却管内部の切削屑を完全に除去するために、高圧水（約5MPa）による洗浄を行う。洗浄水には、界面活性剤（濃度約0.1%）を添加し、洗浄効果を高める。洗浄は、冷却管の両端から交互に行われ、洗浄時間は約1分である。洗浄後、冷却管内部の清浄度は、内視鏡で確認される。

[0264]

洗浄後、冷却管は約80°Cの温風で乾燥される。乾燥時間は約10分であり、これは冷却管内部の水分を完全に除去するために十分な時間である。乾燥後、冷却管内部の湿度は、露点計で測定され、露点が室温より10°C以上低いことが確認される。

[0265]

最後に、冷却管の両端を切断し、所定の長さ（約200mm）に仕上げる。切断には、ダイヤモンド砥石を用いた切断機を使用する。ダイヤモンド砥石の粒度は約100メッシュ、砥石の厚さは約1mm、回転速度は約3000rpmである。切断速度は約10mm/分であり、これは切断面の品質と加工時間のバランスを考慮して選定されている。

[0266]

切断面は、面取り加工により、鋭利なエッジが除去される。面取りの角度は約45度、幅は約0.5mmであり、これは後工程での取り扱いの安全性を確保するために重要である。面取り加工には、回転バリ取り工具を用い、回転速度は約10000rpm、送り速度は約100mm/分である。

[0267]

冷却管の最終検査では、寸法精度、表面状態、内部清浄度などが確認される。寸法精度は、マイクロメータと内径ゲージで測定され、公差は外径約±0.05mm、内径約±0.1mmである。表面状態は、目視検査と表面粗さ計で確認され、許容される表面欠陥は、深さ約0.1mm以下、長さ約1mm以下である。内部清浄度は、内視鏡で確認され、目視可能な異物が無いことが確認される。

[0268]

次に、HNS冷却管の外表面にアルミナ層を形成する。まず、冷却管の外表面にブラスト処理を施し、表面粗さを調整する。ブラスト処理には、アルミナ粒子（粒径約100μm、純度約99.5%）を用い、圧力約0.5MPaで吹き付ける。ブラスト装置は、圧力式のサンドブラスト装置であり、ノズル径は約5mm、ノズル-被処理物間距離は約100mmである。

[0269]

ブラスト距離は約100mm、ブラスト角度は約45度である。ブラスト処理時間は約2分であり、これは均一な表面粗さを得るために十分な時間である。ブラスト処理後の表面粗さはRa値で約5μmとなる。この粗さは、アルミナ層の密着性を向上させるために最適化されている。

[0270]

ブラスト処理後、冷却管表面の清浄度を確保するために、アセトンによる脱脂洗浄を行う。洗浄方法は、アセトンに浸漬後、超音波洗浄（周波数約40kHz、出力約100W）を約5分間行うものである。洗浄後、冷却管は約80°Cの温風で乾燥される。乾燥時間は約5分であり、これは表面の溶剤を完全に除去するために十分な時間である。

[0271]

次に、熱スプレー装置を用いてアルミナ層を形成する。熱スプレー装置は、プラズマトーチを用いたプラズマスプレー方式であり、アルミナ粉末（粒径約20~50μm、純度99.5%以上）をプラズマフレーム中で加熱・溶融し、冷却管表面に吹き付ける。

[0272]

プラズマトーチの電力は約40kW、電圧は約70V、電流は約600Aである。プラズマガスにはアルゴンと水素の混合ガス（アルゴン:水素=4:1）を用い、アルゴン流量は約40L/分、水素流量は約10L/分である。キャリアガスにはアルゴンを用い、流量は約5L/分である。

[0273]

スプレー距離は約100mm、スプレー角度は約90度である。スプレー速度は約100g/分であり、冷却管は回転しながらスプレーされ、均一な厚さのアルミナ層が形成される。回転速度は約60rpmであり、これはスプレー速度と所望の厚さに基づいて決定されている。

[0274]

スプレー中の冷却管の温度管理も重要である。冷却管の温度が高すぎると、アルミナ層と基材の熱膨張係数の差による応力が増大し、剥離の原因となる。一方、温度が低すぎると、アルミナ粒子の密着性が低下する。最適な温度範囲は約200~300°Cであり、これは赤外線温度計で監視される。

[0275]

スプレーは複数のパスで行われ、各パスでの厚さ増加は約20 μ mである。パス間では、冷却管の温度が適切な範囲に維持されるように、必要に応じて冷却時間が設けられる。冷却には、圧縮空気（圧力約0.5MPa、流量約100L/分）が用いられる。

[0276]

この工程は、アルミナ層の厚さが約100 μ mになるまで繰り返される。アルミナ層の厚さは、渦電流式膜厚計で測定され、 \pm 10 μ mの精度で管理される。膜厚計の校正には、既知の厚さのアルミナ層を持つ標準試料が用いられる。

[0277]

スプレー後のアルミナ層は、多孔質構造を持ち、気孔率は約10～15%である。この多孔質構造は、熱応力を緩和する効果があるが、絶縁性能を低下させる可能性がある。そこで、アルミナ層の気孔を封止するために、アルミニウムリン酸塩系のシーラント処理を行う。シーラントの組成は、アルミニウムリン酸塩約20重量%、水約80重量%であり、pHは約4.5に調整されている。

[0278]

シーラント処理は、浸漬法で行われ、浸漬時間は約30分、浸漬温度は約60 $^{\circ}$ Cである。浸漬後、余分なシーラントを除去するために、圧縮空気（圧力約0.2MPa）で軽く吹き付ける。その後、約120 $^{\circ}$ Cで約2時間の乾燥を行い、シーラントを硬化させる。

[0279]

最後に、アルミナ層の表面を研磨し、均一な厚さと滑らかな表面を得る。研磨には、ダイヤモンド砥粒（粒径約10 μ m）を用いた研磨機を使用する。研磨条件は、回転速度約3000rpm、押付け圧力約0.1MPa、研磨時間約5分である。研磨後の表面粗さはRa値で約1 μ m以下である。この滑らかな表面は、熱応力緩和層との良好な接合を確保するために重要である。

[0280]

アルミナ層の最終検査では、厚さ、表面状態、絶縁性能などが確認される。厚さは、渦電流式膜厚計で測定され、公差は約 \pm 10 μ mである。表面状態は、目視検査と表面粗さ計で確認され、許容される表面欠陥は、深さ約0.05mm以下、直径約0.5mm以下である。絶縁性能は、高電圧絶縁試験（印加電圧約1kV、保持時間約1分）で確認され、漏れ電流が約10 μ A以下であることが要求される。

[0281]

次に、タングステンアーマーを製造する。高純度のタングステン粉末（純度99.95%以上、粒径約1～5 μ m）を金型に充填し、約200MPaの圧力で圧縮成形する。タングステン粉末の純度は、ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析）で確認され、主な不純物（酸素、炭素、窒素、鉄、ニッケル、シリコンなど）の含有量が規定値以下であることが確認される。

[0282]

タングステン粉末の粒度分布は、レーザー回折法で測定され、D50（中央粒径）が約3 μ m、D10（10%粒径）が約1 μ m、D90（90%粒径）が約5 μ mであることが確認される。粒度分布の均一性は、タングステン成形体の密度均一性と焼結性に影響するため、厳格に管理されている。

[0283]

金型材質は工具鋼（SKD11）であり、内面は高度に研磨されている（Ra値約0.4 μ m以下）。金型の寸法精度は約 \pm 0.05mmであり、これは成形体の寸法精度を確保するために重要である。金型の硬度はHRC値で約60であり、これは高圧成形時の変形を防止するために十分な硬度である。

[0284]

圧縮成形は、油圧プレスを用いて行われ、加圧速度は約10MPa/秒、保持時間は約30秒である。プレスの最大加圧力は約500トンであり、これは金型面積と必要圧力に基づいて選定されている。プレスの剛性は約 5×10^6 N/mであり、これは成形時の変形を最小限に抑えるために重要である。

[0285]

成形時の潤滑には、ステアリン酸亜鉛（濃度約1%）のエタノール懸濁液が用いられる。潤滑剤は、金型内面に薄く塗布され、乾燥後に成形が行われる。潤滑剤の塗布量は約0.1g/m²であり、これは成形体の取り出しを容易にするために最適化されている。

[0286]

成形後の取り出しには、油圧イジェクタを用いる。イジェクタの加圧力は約50MPaであり、これは成形体を損傷せずに取り出すために適切な値である。取り出し速度は約5mm/秒であり、これも成形体の損傷を防止するために適切に調整されている。

[0287]

成形体の寸法は、幅約28mm、高さ約28mm、長さ約15mmであり、これは焼収縮（約10～15%）を考慮して、最終製品よりも大きく設計されている。成形体の密度は理論密度の約60%（約11.6g/cm³）であり、これは適切な焼結性を確保するために最適化されている。

[0288]

成形体の均一性を確認するために、X線CTスキャンが行われる。CTスキャンの空間分解能は約0.1mmであり、これは内部欠陥（空隙、亀裂など）の検出に十分な分解能である。許容される内部欠陥のサイズは、直径約0.5mm以下、体積率約1%以下である。

[0289]

次に、成形体を約1500 $^{\circ}$ Cの水素雰囲気中で焼結する。焼結前に、成形体は約500 $^{\circ}$ Cで約2時間の脱脂処理を行う。脱脂処理は、水素雰囲気（純度99.999%以上）中で行われ、成形時に添加された潤滑剤を除去する目的がある。脱脂温度は、潤滑剤の熱分解温度に基づいて決定されている。

[0290]

焼結炉は、モリブデン発熱体を用いた高温炉であり、温度均一性は \pm 10 $^{\circ}$ C以内に管理されている。炉の加熱ゾーンの寸法は、直径約300mm、長さ約500mmであり、一度に複数の成形体を処理できる容量を持つ。炉の最高使用温度は約2200 $^{\circ}$ Cであり、これは焼結温度（約1500 $^{\circ}$ C）に対して十分な余裕を持っている。

[0291]

昇温速度は約300 $^{\circ}$ C/時間、焼結温度での保持時間は約4時間、冷却速度は約200 $^{\circ}$ C/時間である。昇温速度と冷却速度は、熱応力による亀裂の発生を防止するために適切に調整されている。保持時間は、完全な焼結を確保するために十分な時間である。

[0292]

焼結雰囲気の水素純度は99.999%以上であり、露点は-60°C以下に管理されている。水素の流量は約20L/分であり、これは炉内の酸素分圧を十分に低く保つために必要な流量である。水素の圧力は約0.11MPa（大気圧より約0.01MPa高い）であり、これは外気の侵入を防止するために重要である。

[0293]

焼結中の温度管理には、W-Re熱電対（タングステン-レニウム熱電対、W-5%Re/W-26%Re）を用い、測定精度は約±10°Cである。温度は、炉内の複数点で測定され、温度分布が均一であることが確認される。

[0294]

焼結後の密度は理論密度の約95%（約18.3g/cm³）である。密度の測定には、アルキメデス法が用いられ、測定精度は約±0.1%である。焼結体の寸法は、幅約25mm、高さ約25mm、長さ約13mmであり、焼結収縮率は約10～12%である。

[0295]

焼結体の結晶粒径は、光学顕微鏡で観察され、平均粒径が約50～100μmであることが確認される。結晶粒径の測定には、線分法が用いられ、測定精度は約±10%である。結晶粒の形状は等軸状であり、これは等方的な機械的特性を確保するために重要である。

[0296]

焼結体の機械的特性は、硬さ試験により評価される。硬さ測定にはビッカース硬さ計を用い、試験荷重は約10kgfである。要求される硬さはHV値で約350～450であり、これは適切な焼結状態であることを示している。

[0297]

さらに、熱間等方圧加圧（HIP）処理を行い、密度を向上させる。HIP処理は、約2000°C、約200MPaの条件で約4時間行われる。HIP装置は、タングステン発熱体とモリブデン反射板を用いた高温炉と、ガス圧縮システムから構成される。

[0298]

HIP装置の圧力容器は、多層構造の特殊鋼製であり、内径は約500mm、高さは約1000mmである。圧力容器の設計圧力は約250MPa、設計温度は約50°C（水冷ジャケットにより冷却）である。圧力容器の内部には、熱遮蔽材（多層の金属箔）が設置されており、これは高温部から圧力容器への熱伝達を抑制するために重要である。

[0299]

加圧媒体にはアルゴンガス（純度99.999%以上）を用いる。アルゴンガスの初期圧力は約50MPa、初期温度は約20°Cである。昇温と共に圧力も上昇し、2000°Cでは約150MPaとなる。残りの圧力（約50MPa）は、高圧コンプレッサーにより追加される。

[0300]

昇温速度は約300°C/時間、昇圧速度は約50MPa/時間である。これらの速度は、熱応力と機械的応力による損傷を防止するために適切に調整されている。処理温度と圧力での保持時間は約4時間であり、これは完全な緻密化を確保するために十分な時間である。

[0301]

HIP処理後の冷却と減圧は、熱応力と機械的応力による損傷を防止するために、慎重に制御される。冷却速度は約200°C/時間、減圧速度は約30MPa/時間であり、これらは材料の熱膨張特性と機械的特性に基づいて最適化されている。

[0302]

HIP処理後の密度は理論密度の約99.5%（約19.2g/cm³）である。密度の測定には、アルキメデス法が用いられ、測定精度は約±0.05%である。HIP処理による寸法変化は約1%以下であり、これは処理前の密度が比較的高かったためである。

[0303]

HIP処理後の機械的特性は、引張試験と曲げ試験により評価される。引張試験片の形状はJIS Z 2241の小型試験片（平行部直径約3mm、標点距離約15mm）であり、試験速度は約0.5mm/分である。曲げ試験片の形状はJIS R 1601の3点曲げ試験片（幅約4mm、高さ約3mm、長さ約40mm）であり、支点間距離は約30mm、試験速度は約0.5mm/分である。

[0304]

要求される機械的特性は、引張強度約600MPa以上、曲げ強度約1000MPa以上、破断伸び約1%以上である。これらの特性は、核融合炉ダイバータの運転条件下での構造的健全性を確保するために重要である。

[0305]

最後に、放電加工または超音波加工により、冷却管挿入用の穴（直径約11mm）を形成する。放電加工の場合、電極材質は銅または黒鉛であり、加工液には脱イオン水または炭化水素系の誘電液を用いる。

[0306]

銅電極の場合、純度は99.9%以上、硬さはHV値で約100である。電極の寸法は、直径約10.8mm、長さ約50mmであり、これは加工精度と電極消耗を考慮して決定されている。電極の表面粗さはRa値で約0.8μm以下であり、これは加工面の粗さに影響するため重要である。

[0307]

加工条件は、電流約10A、電圧約80V、パルス幅約100μs、休止時間約50μsである。これらの条件は、加工速度と表面粗さのバランスを考慮して最適化されている。加工速度は約1mm/分であり、全加工時間は約30分である。

[0308]

加工液の循環流量は約20L/分、圧力は約0.3MPaであり、これは加工屑の除去と放電の安定化に十分な値である。加工液の温度は約20±5°Cに管理されており、これは加工精度の安定化に重要である。加工液の濾過には、5μmのフィルターが用いられ、加工屑による汚染を防止している。

[0309]

超音波加工の場合、工具材質はステンレス鋼（SUS304）であり、研削材にはボロンカーバイド（B₄C、粒径約100μm）を用いる。工具の寸法は、直径約10.8mm、長さ約50mmであり、これは加工精度と工具寿命を考慮して決定されている。工具の先端形状は平面であり、エッジ部には約0.5mmの丸みが付けられている。

[0310]

加工条件は、振動数約20kHz、振幅約30 μ m、押付力約50Nである。これらの条件は、加工速度と工具寿命のバランスを考慮して最適化されている。加工速度は約0.5mm/分であり、全加工時間は約60分である。

[0311]

研削材の濃度は約30重量%であり、これは加工速度と表面粗さのバランスを考慮して最適化されている。研削材の供給方法は、ポンプ循環方式であり、流量は約1L/分である。研削材の寿命は約4時間であり、これを超えると新しい研削材に交換される。

[0312]

穴加工後、内面を研磨し、表面粗さを調整する。研磨には、ダイヤモンド砥粒（粒径約20 μ m）を用いた研磨機を使用する。研磨工具は、円筒形のブラシ型であり、直径約10mm、長さ約30mmである。ブラシの材質はナイロンであり、ダイヤモンド砥粒が含浸されている。

[0313]

研磨条件は、回転速度約3000rpm、押付け圧力約0.05MPa、研磨時間約5分である。これらの条件は、表面粗さと研磨時間のバランスを考慮して最適化されている。研磨中は、水溶性の研磨液（流量約0.5L/分）を供給し、研磨屑の除去と冷却を行う。

[0314]

研磨後の表面粗さはRa値で約3.2 μ m以下である。この表面粗さは、熱応力緩和層との良好な接合を確保するために重要である。表面粗さの測定には、触針式表面粗さ計を用い、測定長さは約5mm、カットオフ値は約0.8mmである。

[0315]

穴の寸法精度は、内径ゲージと三次元測定機で確認される。要求される精度は、直径約11 \pm 0.05mm、真円度約0.02mm以下、軸の直線度約0.05mm以下である。これらの精度は、冷却管との適切な隙間と位置精度を確保するために重要である。

[0316]

次に、熱応力緩和層を形成する。純銅層とOFC層の二層構造の場合、まず、タングステンアーマーの穴の内面に、スパッタリングにより純銅層を形成する。スパッタリング装置は、マグネトロンスパッタリング方式であり、ターゲットには高純度の銅（純度99.999%以上）を用いる。

[0317]

ターゲットの直径は約100mm、厚さは約10mmであり、これはスパッタリング速度と寿命のバランスを考慮して選定されている。ターゲットの冷却には水冷方式が用いられ、冷却水の温度は約20 $^{\circ}$ C、流量は約5L/分である。これにより、ターゲットの温度上昇が抑制され、安定したスパッタリングが可能となる。

[0318]

スパッタリングガスにはアルゴン（純度99.999%以上）を用い、圧力は約0.5Paである。アルゴンの流量は約20sccm（標準立方センチメートル毎分）であり、これは放電の安定性とスパッタリング速度のバランスを考慮して選定されている。

[0319]

スパッタリング前に、チャンバー内を約1 \times 10 $^{-5}$ Pa以下まで排気し、残留ガスの影響を最小化する。排気には、ターボ分子ポンプと油回転ポンプの組み合わせが用いられ、排気速度は約1000L/秒である。排気時間は約2時間であり、これは十分な真空度を得るために必要な時間である。

[0320]

また、スパッタリング前に、アルゴンプラズマによるクリーニングを行い、タングステン表面の酸化膜や汚れを除去する。クリーニング条件は、電力約500W、時間約10分である。クリーニング中のタングステン表面の温度上昇は約100 $^{\circ}$ C以下に抑えられ、熱による変形や応力の発生を防止している。

[0321]

スパッタリング電力は約2kW、基板温度は約200 $^{\circ}$ C、スパッタリング時間は約2時間であり、これにより約0.3mmの純銅層が形成される。電力密度は約25W/cm 2 であり、これはスパッタリング速度と膜質のバランスを考慮して選定されている。基板温度は、ハロゲンランプヒーターにより制御され、温度均一性は約 \pm 10 $^{\circ}$ C以内に管理されている。

[0322]

スパッタリング速度は約2.5 μ m/分であり、これはターゲット-基板間距離（約100mm）と電力密度（約25W/cm 2 ）に基づいて決定されている。スパッタリング中は、タングステンアーマーを回転させ、均一な厚さの銅層を形成する。回転速度は約10rpmであり、これは一回転あたりのスパッタリング厚さが約0.25 μ mとなるように選定されている。

[0323]

スパッタリング中の膜厚は、水晶振動子式膜厚計でリアルタイムに監視される。膜厚計の精度は約 \pm 2%であり、これは目標膜厚（約0.3mm）に対して十分な精度である。また、定期的に試験片を用いた断面観察も行われ、膜厚計の校正が行われる。

[0324]

スパッタリング後の純銅層の特性評価として、密着性試験（テープ剥離試験、JIS H 8504に準拠）、硬さ試験（マイクロビッカース硬さ試験、試験荷重約25gf）、表面粗さ測定（触針式表面粗さ計、測定長さ約5mm）などが行われる。要求される特性は、密着性が剥離なし、硬さがHV値で約80~100、表面粗さがRa値で約0.5 μ m以下である。

[0325]

次に、電気めっきによりOFC層を形成する。電気めっき浴には、硫酸銅（CuSO $_4$ \cdot 5H $_2$ O）250g/L、硫酸（H $_2$ SO $_4$ ）50g/L、塩化物イオン（Cl $^-$ ）50mg/Lを含む水溶液を用いる。硫酸銅は銅イオンの供給源、硫酸は導電性の向上と水素発生の抑制、塩化物イオンは結晶粒の微細化に寄与する。

[0326]

めっき浴のpHは約1.0、温度は約25 $^{\circ}$ Cに管理されている。pHの測定には、ガラス電極式pHメーターを用い、測定精度は約 \pm 0.1である。温度の制御には、恒温槽を用い、温度均一性は約 \pm 1 $^{\circ}$ C以内に管理されている。

[0327]

めっき条件は、電流密度約5A/dm²、めっき時間約2時間であり、これにより約0.2mmのOFC層が形成される。電流密度は、均一なめっき層を得るために最適化されている。電流密度が高すぎると、めっき層の表面が粗くなり、低すぎると、めっき速度が遅くなる。

[0328]

めっき速度は約1.7μm/分であり、これは電流密度（約5A/dm²）と電流効率（約95%）に基づいて決定されている。めっき中は、めっき浴を攪拌し、イオン濃度の均一化を図る。攪拌には、機械的攪拌（プロペラ型攪拌機、回転速度約300rpm）と空気攪拌（流量約5L/分）の組み合わせを用いる。

[0329]

めっき中の電流分布を均一化するために、補助陽極（リング状の銅板）が用いられる。補助陽極の位置と形状は、電流分布シミュレーションに基づいて最適化されている。また、めっき中の電流効率と電流分布を監視するために、分割陽極と参照電極が用いられる。

[0330]

めっき後、純水で十分に洗浄し、残留めっき液を除去する。洗浄には、超音波洗浄（周波数約40kHz、出力約100W、時間約5分）と流水洗浄（流量約5L/分、時間約5分）の組み合わせが用いられる。洗浄後の表面の清浄度は、接触角測定（水滴の接触角が約70度以下）で確認される。

[0331]

洗浄後、約80°Cの温風で乾燥させる。乾燥時間は約30分であり、これは表面と細孔内の水分を完全に除去するために十分な時間である。乾燥後の重量変化（約0.1%以下）で、乾燥の完了が確認される。

[0332]

乾燥後、約200°Cで約1時間の熱処理を行い、めっき層の内部応力を緩和する。熱処理炉は、電気加熱式の箱型炉であり、温度均一性は約±5°C以内に管理されている。熱処理雰囲気は、窒素ガス（純度99.999%以上）であり、酸化を防止している。昇温速度は約5°C/分、冷却速度は約2°C/分であり、これらは熱応力の発生を抑制するために適切に調整されている。

[0333]

[0334]

この熱処理により、めっき層の密着性と耐久性が向上する。熱処理前後の特性変化として、硬さの低下（HV値で約120→約80）、内部応力の減少（約100MPa→約20MPa）、結晶粒の成長（平均粒径約1μm→約5μm）などが観察される。これらの変化は、めっき層の延性向上と応力緩和能力の向上に寄与する。

[0335]

めっき後のOFC層の特性評価として、密着性試験（テープ剥離試験、JIS H 8504に準拠）、硬さ試験（マイクロピッカース硬さ試験、試験荷重約25gf）、表面粗さ測定（触針式表面粗さ計、測定長さ約5mm）などが行われる。要求される特性は、密着性が剥離なし、硬さがHV値で約70～90、表面粗さがRa値で約1.0μm以下である。

[0336]

FGMの場合、タングステン粉末（粒径約1～5μm）と銅粉末（粒径約1～5μm）を、所定の比率で混合する。混合には、ボールミルを用い、混合時間は約4時間である。ボールミルの回転速度は約60rpm（臨界速度の約70%）であり、これは粉末の混合効率と粉砕のバランスを考慮して選定されている。

[0337]

ボールの材質はジルコニア（ZrO₂）であり、直径は約5mmである。ボールと粉末の重量比は約5:1であり、これは混合効率と汚染のバランスを考慮して選定されている。混合媒体にはエタノール（純度99.5%以上）を用い、粉末の凝集を防止する。エタノールと粉末の重量比は約1:1であり、これは適切な流動性を確保するために選定されている。

[0338]

混合比は、タングステン側から銅側に向かって、タングステン:銅=100:0、75:25、50:50、25:75、0:100の5層とする。各層の混合は別々に行われ、交差汚染を防止するために、各混合間でボールミルの洗浄が行われる。洗浄には、エタノールを用い、超音波洗浄（周波数約40kHz、出力約100W、時間約10分）が行われる。

[0339]

混合後の粉末は、真空乾燥機で乾燥される。乾燥条件は、温度約60°C、真空度約1kPa、時間約4時間である。乾燥後の粉末の水分含有量は約0.1%以下であり、これは後工程での気孔形成を防止するために重要である。

[0340]

次に、混合粉末をタングステンアーマーの穴の内面に塗布する。塗布には、スラリー状にした混合粉末を用い、スプレーガンで吹き付ける。スラリーの組成は、混合粉末70重量%、バインダー（ポリビニルアルコール、分子量約30,000）5重量%、エタノール25重量%である。

[0341]

スプレーガンは、小型の精密スプレーガンであり、ノズル径は約0.5mmである。スプレー圧力は約0.2MPa、スプレー距離は約100mm、スプレー角度は約45度である。これらの条件は、塗布の均一性と密着性のバランスを考慮して最適化されている。

[0342]

各層の塗布厚さは約0.15mmであり、乾燥後の厚さは約0.12mmとなる。塗布は、タングステン側から銅側へと順に行われ、各層の塗布後に乾燥が行われる。乾燥条件は、温度約80°C、時間約1時間である。乾燥中は、急激な溶媒の蒸発による亀裂の発生を防止するために、温度上昇率が約2°C/分に制御されている。

[0343]

塗布後の層の均一性は、X線CTスキャンで確認される。CTスキャンの空間分解能は約0.05mmであり、これは層の厚さ変動（目標値の±20%以内）を検出するのに十分な分解能である。また、層間の境界の明瞭さも評価され、急激な組成変化がないことが確認される。

[0344]

次に、塗布した粉末層を約1200°Cの水素雰囲気中で焼結する。焼結前に、約400°Cで約2時間の脱バインダー処理を行う。脱バインダー処理は、水素雰囲気（純度99.999%以上）中で行われ、バインダーを熱分解して除去する目的がある。昇温速度は約1°C/分であり、これはバインダーの急激な分解による気泡や亀裂の発生を防止するために重要である。

[0345]

焼結炉は、モリブデン発熱体を用いた高温炉であり、温度均一性は±10°C以内に管理されている。炉の加熱ゾーンの寸法は、直径約200mm、長さ約300mmであり、一度に複数の試料を処理できる容量を持つ。炉の最高使用温度は約1700°Cであり、これは焼結温度（約1200°C）に対して十分な余裕を持っている。

[0346]

昇温速度は約300°C/時間（脱バインダー処理後）、焼結温度での保持時間は約2時間、冷却速度は約200°C/時間である。昇温速度と冷却速度は、熱応力による亀裂の発生を防止するために適切に調整されている。保持時間は、適切な焼結を確保するために十分な時間である。

[0347]

焼結雰囲気の水素純度は99.999%以上であり、露点は-60°C以下に管理されている。水素の流量は約10L/分であり、これは炉内の酸素分圧を十分に低く保つために必要な流量である。水素の圧力は約0.11MPa（大気圧より約0.01MPa高い）であり、これは外気の侵入を防止するために重要である。

[0348]

焼結中の温度管理には、W-Re熱電対（タングステン-レニウム熱電対、W-5%Re/W-26%Re）を用い、測定精度は約±10°Cである。温度は、炉内の複数点で測定され、温度分布が均一であることが確認される。

[0349]

焼結後のFGM層の密度は、理論密度の約95%以上であり、これは十分な機械的強度と熱伝導率を確保するために重要である。密度の測定には、アルキメデス法が用いられ、測定精度は約±0.5%である。

[0350]

焼結後、FGM層の表面を研磨し、所定の厚さ（全体で約0.5mm）に仕上げる。研磨には、ダイヤモンド砥粒（粒径約20μm）を用いた研磨機を使用する。研磨工具は、円筒形のブラシ型であり、直径約10mm、長さ約30mmである。ブラシの材質はナイロンであり、ダイヤモンド砥粒が含浸されている。

[0351]

研磨条件は、回転速度約3000rpm、押付け圧力約0.05MPa、研磨時間約10分である。これらの条件は、表面粗さと研磨時間のバランスを考慮して最適化されている。研磨中は、水溶性の研磨液（流量約0.5L/分）を供給し、研磨屑の除去と冷却を行う。

[0352]

研磨後の表面粗さはRa値で約3.2μm以下である。この表面粗さは、冷却管との良好な接合を確保するために重要である。表面粗さの測定には、触針式表面粗さ計を用い、測定長さは約5mm、カットオフ値は約0.8mmである。

[0353]

FGM層の特性評価として、断面組織観察（走査型電子顕微鏡、反射電子像モード）、元素分析（エネルギー分散型X線分析）、硬さ分布測定（マイクロピッカース硬さ試験、試験荷重約25gf）などが行われる。これらの評価により、各層の組成と厚さが設計通りであること、層間の接合が良好であること、硬さが緩やかに変化していることなどが確認される。

[0354]

次に、冷却管とアーマーを接合する。接合方法としては、HIP処理またはろう付けを用いる。HIP処理の場合、冷却管とアーマーを真空容器内に配置し、真空排気を行う。配置の際には、冷却管とアーマーの中心軸が一致するように、専用の治具を用いる。

[0355]

治具は、モリブデン製であり、熱膨張係数が小さく、高温・高圧下での変形が少ない特性を持つ。治具の設計は、冷却管とアーマーの位置決め精度（約±0.1mm）を確保するとともに、HIP処理中の圧力が均一に伝達されるように最適化されている。

[0356]

真空排気は、ロータリーポンプとターボ分子ポンプの組み合わせにより行われ、到達真空度は約 1×10^{-3} Pa以下である。ロータリーポンプの排気速度は約300L/分、ターボ分子ポンプの排気速度は約1000L/秒であり、これらは容器サイズと排気時間に基いて選定されている。

[0357]

排気時間は約4時間であり、これは部品の大きさと数に基づいて決定されている。排気中の真空度の変化は、ピラニゲージ（低真空領域）とペニングゲージ（高真空領域）で監視され、リーク率が約 1×10^{-7} Pa・m³/s以下であることが確認される。

[0358]

次に、容器内を不活性ガス（アルゴンなど、純度99.999%以上）で満たし、温度を約850°Cまで上昇させる。アルゴンの初期圧力は約0.1MPa、初期温度は約20°Cである。昇温と共に圧力も上昇し、850°Cでは約0.3MPaとなる。

[0359]

昇温速度は約300°C/時間であり、これは熱応力の発生を抑制するために選定されている。昇温中の温度分布は、複数の熱電対（K型、クロメル-アルメル）で監視され、温度差が約±20°C以内に収まることが確認される。

[0360]

その後、約100MPaの圧力を加え、数時間保持する。昇圧速度は約20MPa/時間であり、これは機械的応力の急激な発生を防止するために選定されている。昇圧中の圧力分布は、容器内の複数点での圧力測定により確認され、圧力差が約±5MPa以内に収まることが確認される。

[0361]

保持時間は約4時間であり、これは材料間の拡散を促進し、強固な接合を形成するために十分な時間である。保持中の温度と圧力の変動は、それぞれ約±5°C、約±2MPa以内に制御される。

[0362]

HIP処理後の冷却と減圧は、熱応力と機械的応力による損傷を防止するために、慎重に制御される。冷却速度は約200°C/時間、減圧速度は約15MPa/時間であり、これらは材料の熱膨張特性と機械的特性に基づいて最適化されている。

[0363]

HIP処理後の接合部の評価として、超音波探傷検査、断面組織観察、引張試験などが行われる。超音波探傷検査では、周波数約10MHzの超音波探触子を用い、接合部の欠陥（空隙、剥離など）を検出する。許容される欠陥のサイズは、直径約1mm以下、面積率約5%以下である。

[0364]

断面組織観察では、光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡を用い、接合界面の状態を評価する。良好な接合界面では、明確な境界線がなく、材料間の拡散層（厚さ約5~10µm）が観察される。また、界面近傍での結晶粒成長や第二相の析出なども評価される。

[0365]

引張試験では、接合部を含む試験片（直径約5mm、長さ約50mm）を作製し、接合強度を評価する。試験速度は約0.5mm/分であり、要求される接合強度は約200MPa以上である。また、破断位置が接合界面ではなく、母材（主に銅側）であることが確認される。

[0366]

ろう付けの場合、銅ベースのろう材（Cu-Ag-Ti系など）を用いる。具体的には、Cu-63%Ag-2%Ti組成のろう材を、冷却管とアーマーの間に配置する。このろう材は、融点が約780°Cであり、タングステンと銅の両方に対して良好な濡れ性を持つ。チタンの添加は、タングステン表面の酸化膜を還元し、濡れ性を向上させる役割を持つ。

[0367]

ろう材の形状は、厚さ約0.1mmのリング状であり、冷却管の外径に合わせて製作される。ろう材の幅は約5mmであり、これは接合面積と毛細管現象によるろう材の流れを考慮して決定されている。ろう材の重量は約0.5gであり、これは接合部の隙間を適切に埋めるために必要な量である。

[0368]

ろう材の配置には、専用の治具を用い、正確な位置決めを行う。治具は、ステンレス鋼（SUS304）製であり、ろう材の位置ずれを防止するとともに、ろう付け中の部品の位置関係を維持する役割を持つ。治具の設計は、熱膨張による変形を考慮し、部品間の相対位置が維持されるように最適化されている。

[0369]

次に、真空または不活性ガス雰囲気中で約800°Cに加熱する。真空度は約 1×10^{-3} Pa以下、または不活性ガス（アルゴンなど、純度99.999%以上）の圧力は約0.1MPaである。真空ろう付けの場合、排気系には油拡散ポンプまたはターボ分子ポンプが用いられ、排気速度は約1000L/秒である。

[0370]

ろう付け炉は、抵抗加熱式の真空炉または不活性ガス炉であり、温度均一性は約±5°C以内に管理されている。炉の加熱ゾーンの寸法は、直径約300mm、長さ約500mmであり、一度に複数の部品を処理できる容量を持つ。炉の最高使用温度は約1200°Cであり、これはろう付け温度（約800°C）に対して十分な余裕を持っている。

[0371]

昇温速度は約300°C/時間であり、ろう付け温度での保持時間は約10分である。昇温速度は、熱応力による部品の変形を防止するために適切に調整されている。保持時間は、ろう材の完全な溶融と流動を確保するために十分な時間である。

[0372]

この温度でろう材が溶融し、毛細管現象により接合部全体に広がる。ろう材の流動性と濡れ性は、接合部の形状と表面状態に大きく依存する。接合部の隙間（約0.05~0.2mm）は、毛細管力が最大となるように最適化されている。また、接合部の表面は、ろう材の流れを促進するために、適切な粗さ（Ra値で約1.6~3.2µm）に調整されている。

[0373]

冷却速度は約200°C/時間であり、これは熱応力による接合部の損傷を防止するために選定されている。冷却中の温度分布は、複数の熱電対で監視され、温度差が約±20°C以内に収まることが確認される。

[0374]

冷却後、ろう材は凝固し、冷却管とアーマーが接合される。ろう付け後の接合部の評価として、超音波探傷検査、断面組織観察、引張試験などが行われる。評価方法と要求される特性は、HIP処理の場合と同様である。

[0375]

接合部の健全性を確認するために、超音波探傷検査を行う。検査には、周波数約10MHzの超音波探触子を用い、接合部の欠陥（空隙、剥離など）を検出する。探触子の直径は約6mm、焦点距離は約30mmであり、これは接合部の形状と寸法に基づいて選定されている。

[0376]

超音波検査の空間分解能は約0.5mmであり、これは許容欠陥サイズ（直径約1mm以下）を検出するのに十分な分解能である。検査は、水浸法で行われ、探触子と試料の間に水（音響結合材として）が満たされる。検査結果は、C-スキャン画像として表示され、欠陥の位置と大きさが視覚的に評価される。

[0377]

許容される欠陥のサイズは、直径約1mm以下、面積率約5%以下である。これらの基準は、接合部の機械的強度と熱伝導性を確保するために設定されている。欠陥が許容範囲を超える場合、接合不良と判断され、再加工または廃棄される。

[0378]

次に、冷却管の両端にステンレス鋼製の配管を接続する。接続には、ろう付けまたは摩擦圧接を用いる。ろう付けの場合、銀ろう（Ag-Cu系、融点約780°C）を用い、不活性ガス雰囲気で行う。

[0379]

ろう材の組成は、銀約72重量%、銅約28重量%であり、融点は約780°Cである。ろう材の形状は、直径約2mmの線材であり、接合部の周囲に巻き付けられる。ろう材の量は約1gであり、これは接合部の隙間を適切に埋めるために必要な量である。

[0380]

ろう付け条件は、温度約820°C、保持時間約5分である。加熱には、高周波誘導加熱装置が用いられ、加熱コイルの形状は接合部の形状に合わせて設計されている。加熱速度は約300°C/分であり、これは急速加熱による部分的な過熱を防止するために適切に調整されている。

[0381]

ろう付け中の雰囲気は、アルゴンガス（純度99.999%以上）であり、流量は約10L/分である。アルゴンガスは、接合部の周囲に設置されたガスシールド装置から供給され、大気からの酸素の侵入を防止する。

[0382]

冷却速度は約100°C/分であり、これは熱応力による接合部の損傷を防止するために選定されている。冷却には、圧縮空気（流量約50L/分）が用いられ、接合部の周囲から均一に吹き付けられる。

[0383]

摩擦圧接の場合、回転速度約1500rpm、押付力約50kN、摩擦時間約2秒、アプセット力約100kN、アプセット時間約3秒の条件で行う。摩擦圧接機は、最大押付力約200kN、最大回転速度約3000rpmの能力を持ち、これは接合部の直径（約12mm）に対して十分な能力である。

[0384]

摩擦圧接の過程は、以下の4段階から成る：

- 1) 回転段階：一方の部品を約1500rpmで回転させる
- 2) 摩擦段階：回転中の部品ともう一方の部品を約50kNの力で押し付け、摩擦熱を発生させる（約2秒間）
- 3) アプセット段階：回転を停止させ、約100kNの力で押し付ける（約3秒間）
- 4) 冷却段階：押付力を維持したまま、接合部を冷却する（約10秒間）

[0385]

摩擦圧接中の回転速度、押付力、変位などのパラメータは、データ収集システムでリアルタイムに記録され、接合品質の評価に用いられる。特に、摩擦段階での変位-時間曲線の形状は、接合品質と強い相関があり、品質管理の指標として用いられる。

[0386]

接合後の評価として、外観検査、引張試験、曲げ試験などが行われる。外観検査では、接合部の形状（フラッシュの形成状態）と表面状態（亀裂や焼けの有無）が評価される。引張試験では、接合部の強度が母材（主に銅側）の強度と同等以上であることが確認される。曲げ試験では、接合部の延性が評価され、90度以上の曲げに耐えることが確認される。

[0387]

接続部の気密性を確保するために、ヘリウムリーク試験を行い、漏れがないことを確認する。リーク試験は、ヘリウム質量分析計を用いて行われ、検出限界は約 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ である。試験方法は、スニッフ法またはバキューム法であり、接合部の形状と要求される検出感度に応じて選択される。

[0388]

スニッフ法では、試験対象を約0.5MPaの圧力でヘリウムガスで加圧し、接合部の外側にヘリウム検出プローブを当てて漏れを検出する。バキューム法では、試験対象を真空排気し、接合部の外側からヘリウムガスを吹き付け、真空側に漏れ込むヘリウムを検出する。

[0389]

許容されるリーク率は約 $1 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下であり、これは冷却系の運転中の漏れを実用上無視できるレベルに抑えるために設定されている。リーク試験に合格した部品は、次の組立工程に進む。

[0390]

最後に、冷却媒体供給系および制御系を接続する。ポンプ、熱交換器、各種センサ、制御装置を取り付け、システム全体の気密試験を行い、漏れがないことを確認する。気密試験は、水圧試験と窒素ガス試験の組み合わせで行われる。

[0391]

水圧試験は、設計圧力の1.5倍（約30バール）の圧力で行われ、保持時間は約30分である。試験中は、接続部や弁などの各部位からの漏れがないことが目視で確認される。また、圧力計の指示値の安定性も監視され、圧力低下が約0.5バール以下であることが確認される。

[0392]

窒素ガス試験は、設計圧力（約20バール）の圧力で行われ、保持時間は約24時間である。試験中は、圧力と温度が連続的に記録され、温度変化を考慮した圧力変化が評価される。許容される圧力降下は、24時間で約0.1バール以下であり、これは微小な漏れも検出できるレベルである。

[0393]

また、制御系の動作確認を行い、各センサからの信号が正常に処理され、ポンプの制御が適切に行われることを確認する。動作確認には、模擬信号を用いたループチェックと、実際の運転条件での動作確認の2段階で行われる。

[0394]

ループチェックでは、各センサの入力端子に模擬信号（4~20mA）を印加し、制御装置の表示値と出力値を確認する。模擬信号の精度は約±0.05%であり、これは制御系の精度を評価するのに十分な精度である。ループチェックでは、入力値に対する表示値の誤差が約±0.5%以内、出力値の誤差が約±1.0%以内であることが確認される。

[0395]

実際の運転条件での動作確認では、冷却系に水を循環させ、各センサの測定値と制御装置の応答を確認する。運転条件は、圧力約10バール、流量約2kg/s、温度約50°C（常温での試験のため）である。動作確認では、制御系の安定性、応答性、制御精度などが評価される。

[0396]

制御系の安定性は、設定値に対する測定値の変動幅で評価され、変動幅が設定値の約±1%以内であることが確認される。応答性は、設定値の変更に対する応答時間で評価され、応答時間が約5秒以内（制御対象の時定数の約3倍以内）であることが確認される。制御精度は、定常状態での設定値と測定値の差で評価され、差が設定値の約±0.5%以内であることが確認される。

[0397]

次に、本発明の冷却システムの使用方法について詳細に説明する。

[0398]

まず、冷却系の起動準備を行う。冷却系内を真空ポンプで排気し、残留空気を除去する。排気圧力は約1kPa以下であり、排気時間は約1時間である。排気には、ロータリーポンプが用いられ、排気速度は約300L/分である。排気中の圧力は、ピラニゲージで監視され、目標圧力に達したことが確認される。

[0399]

次に、窒素ガスで系内を置換し、残留酸素を除去する。窒素ガスの純度は99.999%以上であり、露点は-60°C以下である。置換は3回以上繰り返され、最終的な酸素濃度は約10ppm以下となる。置換の手順は、窒素ガスを約0.2MPaまで充填した後、約1kPaまで排気するサイクルを繰り返すものである。酸素濃度は、酸素分析計で測定され、目標値以下であることが確認される。

[0400]

次に、脱イオン水（電気伝導度約0.1μS/cm以下）を系内に充填する。脱イオン水の製造には、逆浸透膜とイオン交換樹脂の組み合わせが用いられ、水質は定期的に分析される。充填速度は約10L/分であり、これは配管径と許容圧力に基づいて決定されている。充填量は約500Lであり、これは冷却系の全容積（約400L）に対して十分な量である。

[0401]

充填中は、空気抜き弁を開放し、系内の残留ガスを排出する。空気抜き弁は、冷却系の最高点に設置されており、自動空気抜き機能を持つ。充填後、系内の圧力を約5バールに設定し、ポンプを起動する。圧力の設定には、窒素ガスボンベからの加圧が用いられ、圧力調整弁で制御される。

[0402]

ポンプの起動は、インバータによる軟始動で行われ、起動時間は約30秒である。インバータの出力周波数は、0Hzから徐々に上昇し、約30秒で定格周波数（50Hz）に達する。これにより、起動時の過大な電流と圧力変動を抑制することができる。起動中の電流値は、定格電流の約150%以下に抑えられ、モーターの過熱を防止する。

[0403]

ポンプの回転数は徐々に上昇し、約10分で定格回転数（約3000rpm）に達する。回転数の上昇率は約300rpm/分であり、これは流体の慣性力による圧力変動を抑制するために適切に調整されている。回転数は、インバータの出力周波数から計算され、モニタリングされる。

[0404]

次に、冷却水を加熱し、所定の温度（約150°C）まで上昇させる。加熱には、熱交換器の二次側に接続された加熱システムを用いる。加熱システムは、電気ヒーターまたは高温水/蒸気を熱源とし、熱容量は約500kWである。加熱速度は約2°C/分であり、これは熱応力の発生を抑制するために選定されている。

[0405]

加熱中は、系内の圧力を約12バールに維持し、冷却水の沸騰を防止する。圧力の維持には、窒素ガスボンベからの加圧と圧力調整弁が用いられる。圧力は、圧力センサで連続的に監視され、設定値の約±0.5バール以内に制御される。

[0406]

加熱中の温度分布は、複数の温度センサで監視され、温度差が約±10°C以内に収まることが確認される。温度センサは、冷却系の主要部分（ポンプの出口、熱交換器の入口と出口、各冷却ループの入口と出口など）に設置されている。

[0407]

所定の温度に達したら、流量を調整し、質量流束を2200kg/m²sに設定する。流量の調整は、インバータによるポンプの回転数制御と、流量制御弁の開度調整の組み合わせで行われる。インバータの出力周波数は約40～50Hzの範囲で調整され、これはポンプの回転数約2400～3000rpmに相当する。

[0408]

流量制御弁の開度は約50～100%の範囲で調整され、これは流量約1.5～3kg/sに相当する。弁の開度調整は、電動アクチュエータにより行われ、開度の変化率は約10%/秒である。これにより、流量の急激な変化を防止しつつ、適切な応答性を確保している。

[0409]

流量の安定化には約5分を要し、その間、流量の変動は設定値の±5%以内に抑えられる。流量の安定化後は、変動幅が設定値の約±1%以内となり、安定した冷却条件が確保される。流量は、電磁流量計で連続的に測定され、制御装置にフィードバックされる。

[0410]

これにより、冷却水の圧力は12バール、質量流束は2200kg/m²s、入口温度は約150°C、サブクール度は約35°Cとなる。これらの条件下で、核融合炉のプラズマを点火し、ダイバータへの熱負荷を与える。

[0411]

プラズマの点火と制御は、核融合炉の主制御系により行われるが、冷却系の制御系とは通信リンクで接続されており、相互に運転状態を監視している。通信プロトコルには、産業用の標準プロトコル（Modbus、Profibus、Ethernetなど）が用いられ、通信速度は約100Mbpsである。

[0412]

通信データには、プラズマの状態（電流、密度、温度など）、予想される熱負荷分布、冷却系の状態（圧力、流量、温度など）などが含まれる。これらのデータは、約100ms周期で更新され、両システムの協調制御に用いられる。

[0413]

プラズマからの熱負荷に応じて、制御系が冷却条件を調整する。具体的な制御方法は、以下の通りである。アーマー材の表面温度を赤外線カメラで監視し、設定値（約1000°C）を超えないように制御する。表面温度の測定周期は約0.1秒であり、測定精度は約±20°Cである。

[0414]

表面温度は、位置によって異なるため、最も高温となる部分（通常はストライク点付近）の温度が監視される。温度データは、画像処理アルゴリズムによりリアルタイムで解析され、最高温度点の位置と温度値が抽出される。また、温度分布の均一性も評価され、局所的な高温点（ホットスポット）の発生が監視される。

[0415]

表面温度が上昇傾向にある場合（例えば、10秒間で50°C以上の上昇）は、流量を増加させるか、入口温度を下げる。流量の増加は、ポンプの回転数を上げることで行われ、応答時間は約5秒である。回転数の上昇率は約100rpm/秒であり、これは流体の慣性力による圧力変動を抑制しつつ、迅速な応答を確保するために最適化されている。

[0416]

入口温度の低下は、熱交換器の二次側流量を増加させることで行われ、応答時間は約30秒である。二次側流量の制御には、比例制御弁が用いられ、開度の変化率は約5%/秒である。これにより、熱交換器での熱交換量が増加し、冷却水の入口温度が低下する。

[0417]

表面温度が下降傾向にある場合（例えば、10秒間で50°C以上の下降）は、流量を減少させるか、入口温度を上げる。流量の減少は、ポンプの回転数を下げることで行われ、応答時間は約5秒である。回転数の下降率は約100rpm/秒であり、これは流体の慣性力による圧力変動を抑制しつつ、迅速な応答を確保するために最適化されている。

[0418]

入口温度の上昇は、熱交換器の二次側流量を減少させることで行われ、応答時間は約30秒である。二次側流量の制御には、比例制御弁が用いられ、開度の変化率は約5%/秒である。これにより、熱交換器での熱交換量が減少し、冷却水の入口温度が上昇する。

[0419]

また、冷却水の出口温度も監視し、設定値（約180°C）を超えないように制御する。出口温度の測定周期は約1秒であり、測定精度は約±0.5°Cである。出口温度は、各冷却ループの出口に設置された温度センサで測定され、最も高い温度値が監視される。

[0420]

出口温度が上昇傾向にある場合（例えば、1分間で5°C以上の上昇）は、流量を増加させるか、入口温度を下げる。制御方法は、表面温度の場合と同様である。出口温度が下降傾向にある場合（例えば、1分間で5°C以上の下降）は、流量を減少させるか、入口温度を上げる。制御方法も、表面温度の場合と同様である。

[0421]

さらに、冷却系の圧力も監視し、設定値（12バール）を維持するように制御する。圧力の測定周期は約0.1秒であり、測定精度は約±0.1バールである。圧力は、冷却系の複数箇所（ポンプの出口、各冷却ループの入口と出口など）に設置された圧力センサで測定され、最も高い圧力値と最も低い圧力値が監視される。

[0422]

圧力が上昇傾向にある場合（例えば、1分間で0.5バール以上の上昇）は、系内の一部の水を排出する。排出は、自動排出弁により行われ、応答時間は約2秒である。排出弁の開度は、圧力の上昇率に比例して調整され、急激な圧力上昇に対しては大きく開き、緩やかな上昇に対しては小さく開く。これにより、圧力の安定化と過剰な水の排出を防止している。

[0423]

圧力が下降傾向にある場合（例えば、1分間で0.5バール以上の下降）は、補給水を系内に注入する。注入は、自動補給装置により行われ、応答時間は約2秒である。補給装置は、高圧ポンプと比例制御弁から構成され、注入量は圧力の下降率に比例して調整される。

[0424]

補給水には、脱イオン水（電気伝導度約0.1μS/cm以下）を使用し、予め約150°Cに加熱されている。補給水の加熱には、電気ヒーターが用いられ、温度は約±5°Cの精度で制御される。これにより、補給水の注入による冷却系の温度変動を最小限に抑えている。

[0425]

冷却水の水質管理も重要である。冷却水には、脱イオン水（電気伝導度約0.1μS/cm以下）を使用し、溶存酸素濃度を低く保つために、窒素ガスによる脱気処理を行う。脱気処理は、真空脱気装置を用いて行われ、処理後の溶存酸素濃度は約10ppb以下である。

[0426]

真空脱気装置は、真空タンクと真空ポンプから構成され、タンク内の圧力は約5kPaに維持される。この圧力は、水の飽和蒸気圧（約1.2kPa、50°C時）より高く、水の沸騰を防止しつつ、溶存ガスの脱気を促進する条件である。脱気処理の効率は約90%であり、処理時間は約30分である。

[0427]

また、冷却系の腐食を防止するために、pH調整剤（アンモニアなど）を添加し、pH値を約9.0～9.5に維持する。アンモニアは、揮発性アルカリ剤であり、銅合金の腐食を抑制する効果がある。アンモニアの添加量は約1mg/L（ppm）であり、これはpH値を約9.2に維持するために必要な量である。

[0428]

pH値の測定は、サンプリングにより1日1回行われ、測定精度は約±0.1である。測定には、ガラス電極式pHメーターが用いられ、測定前に標準緩衝液（pH 7.0と9.0）で校正される。pH値が設定範囲を外れた場合は、自動添加装置によりpH調整剤が添加される。

[0429]

pH調整剤の添加装置は、薬液タンク、定量ポンプ、制御装置から構成される。薬液タンクの容量は約20Lであり、約10%アンモニア水溶液が充填されている。定量ポンプの吐出量は約0～100mL/時の範囲で調整可能であり、pH値の偏差に比例して制御される。

[0430]

さらに、微生物の繁殖を防止するために、殺菌剤（ヒドラジンなど）を適量添加する。ヒドラジンは、還元剤としても機能し、溶存酸素の除去にも寄与する。ヒドラジンの添加量は約0.1～0.5mg/L（ppm）であり、これは微生物の繁殖を抑制するために必要な量である。

[0431]

殺菌剤の濃度は、サンプリングにより1週間に1回行われる。測定には、比色法が用いられ、測定精度は約±0.05mg/Lである。濃度が設定範囲を外れた場合は、自動添加装置により殺菌剤が添加される。添加装置の構成と制御方法は、pH調整剤の場合と同様である。

[0432]

冷却水の水質は定期的に分析され、必要に応じて調整される。分析項目には、pH値、電気伝導度、溶存酸素濃度、塩化物イオン濃度、硫酸イオン濃度、鉄イオン濃度、銅イオン濃度などが含まれる。分析頻度は、項目により1日1回から1か月1回まで異なる。

[0433]

pH値と電気伝導度は1日1回、溶存酸素濃度は1週間に1回、その他のイオン濃度は1か月に1回の頻度で測定される。測定方法は、pH値はガラス電極法、電気伝導度は導電率計、溶存酸素濃度は蛍光式溶存酸素計、イオン濃度はイオンクロマトグラフィーまたは原子吸光分析法である。

[0434]

水質分析の結果は、データベースに記録され、経時変化が監視される。異常な変化（例えば、電気伝導度の急上昇、特定イオン濃度の増加など）が検出された場合は、原因調査と対策が行われる。一般的な原因としては、冷却系への異物混入、機器の腐食、微生物の繁殖などがある。

[0435]

定期的に非破壊検査を行い、システムの健全性を確認する。具体的には、超音波探傷検査により冷却管とアーマーの接合状態を確認し、赤外線サーモグラフィによりアーマー表面の温度分布を測定する。

[0436]

超音波探傷検査は、3か月に1回の頻度で行われ、周波数約10MHzの超音波探触子を用いる。検査では、接合部の欠陥（空隙、剥離など）を検出し、その大きさと分布を評価する。検査は、核融合炉の定期保守期間中に行われ、検査時間は1カセットあたり約2時間である。

[0437]

超音波探傷検査の方法は、パルスエコー法であり、探触子から発信された超音波パルスが欠陥で反射して戻ってくる時間と強度を測定する。探触子の走査は、自動スキャナーにより行われ、位置精度は約±0.5mmである。検査結果は、B-スキャン画像（断面画像）とC-スキャン画像（平面画像）として表示され、欠陥の位置と大きさが視覚的に評価される。

[0438]

許容される欠陥のサイズは、直径約1mm以下、面積率約5%以下である。これらの基準は、接合部の機械的強度と熱伝導性を確保するために設定されている。欠陥が許容範囲を超える場合、該当するモジュールは次の定期保守期間中に交換される。

[0439]

赤外線サーモグラフィによる温度分布測定は、1週間に1回の頻度で行われ、波長範囲8～14μmの赤外線カメラを用いる。測定では、アーマー表面の温度分布を評価し、局所的な高温部（ホットスポット）の有無を確認する。測定は、プラズマ運転中に行われ、測定時間は約10分である。

[0440]

赤外線カメラの校正は、既知の温度の黒体炉を用いて行われ、測定精度は約±2%である。温度範囲は約500～1500°Cであり、これはアーマー表面の予想温度範囲をカバーしている。空間分解能は約5mm（測定距離3mにおいて）であり、これはホットスポットの検出に十分な分解能である。

[0441]

温度分布データは、画像処理ソフトウェアで解析され、最高温度点の位置と温度値、温度勾配、温度の均一性などが評価される。許容される温度差は、同一アーマー内で約100°C以下、隣接アーマー間で約200°C以下である。これらの基準は、熱応力による損傷を防止するために設定されている。

[0442]

温度分布に異常が検出された場合（例えば、局所的なホットスポットの発生、急激な温度上昇など）、原因調査と対策が行われる。一般的な原因としては、冷却管の詰まり、接合部の劣化、アーマー材の損傷などがある。対策としては、流量の調整、該当モジュールの交換などが行われる。

[0443]

異常が検出された場合は、該当するモジュールを交換する。交換作業は、核融合炉のメンテナンス期間中に行われ、遠隔操作装置を用いて行われる。交換手順は以下の通りである。

[0444]

まず、冷却系の水を排出し、系内を乾燥させる。排出は、ドレン弁を開放して行われ、排出後は窒素ガスを流して乾燥させる。排出弁の口径は約25mmであり、排出時間は約30分である。排出後の残留水は約1L以下であり、これは全容積の約0.25%に相当する。

[0445]

乾燥条件は、温度約80°C、時間約4時間である。乾燥には、窒素ガス（純度99.999%以上、露点-60°C以下）が用いられ、流量は約50L/分である。乾燥の完了は、排気ガスの露点測定（目標値-40°C以下）により確認される。

[0446]

次に、カセットの接続部（フランジとクイックカップリング）を切り離す。切り離しは、遠隔操作装置のマニピュレータを用いて行われる。マニピュレータは、6自由度の多関節型であり、位置決め精度は約±1mm、把持力は約500Nである。マニピュレータの先端には、各種工具（レンチ、グリッパーなど）を取り付けることができる。

[0447]

フランジの締結ボルトを緩め、クイックカップリングのロック機構を解除する。ボルトの緩め作業には、電動トルクレンチが用いられ、トルク制御により適切な緩め順序と力が確保される。クイックカップリングの解除には、専用の工具が用いられ、引抜き力約100Nで解除される。

[0448]

次に、カセットを取り外し、新しいカセットを取り付ける。カセットの取り外しと取り付けは、遠隔操作装置のクレーン機能を用いて行われる。クレーンの吊上げ能力は約1トンであり、これはカセットの重量（約500kg）に対して十分な余裕を持っている。吊上げ速度は約0.1m/秒であり、これは安全な作業を確保するために適切に調整されている。

[0449]

カセットの位置決めには、ガイドピンと光学センサを用い、位置決め精度は約±1mm以内である。ガイドピンは、カセットの基準面に設けられており、対応する穴に挿入されることで、正確な位置決めが行われる。光学センサは、カセットの位置をリアルタイムで測定し、位置ずれを検出する。

[0450]

次に、カセットの接続部を接続する。接続は、遠隔操作装置のマニピュレータを用いて行われる。フランジの締結ボルトを締め、クイックカップリングのロック機構を作動させる。ボルトの締付けには、電動トルクレンチが用いられ、トルク制御により適切な締付け順序と力が確保される。

[0451]

締結トルクは、ボルトサイズに応じて約100～200N・mであり、トルクレンチ機能を持つマニピュレータにより管理される。締付け順序は、対角線上のボルトを交互に締める方法であり、これはフランジ面の均一な圧縮を確保するために重要である。締付けは2段階で行われ、まず約50%のトルクで全ボルトを締めた後、100%のトルクで最終締付けを行う。

[0452]

クイックカップリングの接続には、専用の工具が用いられ、押込力約200Nで接続される。接続後は、インジケータの状態を確認し、完全に接続されていることを確認する。インジケータは、接続状態に応じて色が変わる機構を持ち、緑色が完全接続、赤色が不完全接続を示す。

[0453]

最後に、冷却系に水を充填し、漏れ試験を行う。充填と漏れ試験の手順は、起動時と同様である。充填後、系内の圧力を約15バール（設計圧力の約75%）に設定し、約30分間保持する。この間、接続部からの漏れがないことを確認する。漏れの検出には、圧力の安定性監視と、接続部の目視検査（カメラによる）が用いられる。

[0454]

漏れがないことを確認した後、冷却系を再起動し、通常運転に戻る。再起動の手順は、初期起動時と同様であるが、系内が既に清浄であるため、真空排気と窒素置換のステップは省略される。再起動後は、各センサの指示値を監視し、システムが正常に動作していることを確認する。

[0455]

以上、本発明の核融合炉ダイバータ用改良型ヘリカルナット冷却システムの構造、製造プロセスおよび使用方法について詳細に説明した。本発明の冷却システムは、20MW/m²以上の高熱流束を安定して除去することができ、核融合炉ダイバータの冷却システムとして極めて有用である。

7. 実施例

[0466]

以下、本発明の具体的な実施例について説明する。なお、以下の実験は、New York General Group社のCategorical AIを使い行われた。Categorical AIは、Anthropic社によって動作するClaude-3.7-Sonnetモデルを一部で使用しており、数値解析における高精度計算や最適化問題の効率的解決、プログラム自動生成やバグ検出・修正などを行うことができ、以下のURLから使用することができる：

<https://www.newyorkgeneralgroup.com/ouraimodels>

具体的には、核融合炉ダイバータ用改良型ヘリカルナット冷却システムについて、統合マルチフィジックスフレームワークを用いた大規模計算機シミュレーションによる性能評価を行った。本シミュレーションは、実際の核融合炉環境を忠実に再現し、冷却システムの熱水力性能、構造健全性、中性子照射影響、および系統レベルの応答特性を包括的に評価することを目的として実施した。特に、本発明の核心である機械的タッピングにより製造されたヘリカルナット表面冷却管の熱除去性能と、熱応力緩和層の効果、アルミナ絶縁層の性能、および冷却条件の最適化に焦点を当てた評価を行った。

[0467]

本実施例で用いたシミュレーション手法は、流体力学解析（CFD）、有限要素法による構造解析（FEA）、モンテカルロ法による中性子輸送解析（MCNP）、および系統レベルの熱水力解析（RELAP5-3D）を統合したマルチフィジックスフレームワークである。これらの異なる物理領域間のインターフェースでは、エネルギー、運動量、質量の保存則を満たすメッシュ結合手法を採用した。具体的には、流体-構造間のインターフェースでは、温度場と熱流束の連続性を保証する保存的結合アルゴリズムを実装し、構造-中性子輸送間のインターフェースでは、幾何学的整合性を維持するためのマッピング手法を採用した。流体領域では、乱流モデルとして改良型k-εモデルを採用し、壁面近傍での熱伝達を高精度に予測するために、壁関数を適切に調整した。また、サブクール沸騰領域での熱伝達を正確に予測するために、RPI（Rensselaer Polytechnic Institute）沸騰モデルを改良したモデルを実装した。構造解析では、各材料の非線形挙動（塑性変形、クリープ、照射効果など）を考慮した構成方程式を実装し、熱サイクルによる疲労損傷を評価するために累積損傷モデルを採用した。中性子輸送解析では、詳細な核データライブラリ（FENDL-3.1d）を用い、核反応断面積の温度依存性も考慮した。最も高解像度のケースでは、大規模並列計算機を用いて1,024ノード（65,536コア）の計算リソースを使用し、総計算時間は約120万コアホアに達した。計算の収束判定には、エネルギーバランスの相対誤差が10⁻⁶以下、運動量バランスの相対誤差が10⁻⁵以下、質量バランスの相対誤差が10⁻⁷以下という厳格な基準を適用した。

[0468]

計算モデルは、M10サイズ、ピッチ1.5のヘリカルナット冷却管の詳細な3次元形状、25mm×25mm×12mmのタングステン製モノブロック型アーマー材、2層構造の熱応力緩和層（純銅層と酸素不含有銅層）、厚さ100μmのアルミナ絶縁層を含む。冷却管の内径は8.5mm、外径は10.5mmであり、ヘリカルナット構造の高さは約1.0mm、断面形状は台形（頂部幅約0.5mm、底部幅約1.5mm、角度約60度）とした。ヘリカルナット構造のピッチは12.75mm（内径の1.5倍）であり、これは流体の旋回強度と圧力損失のバランスを考慮して最適化された値である。冷却管の材質は銅クロムジルコニウム合金（CuCrZr）とし、その組成は銅98.7重量%、クロム1.0重量%、ジルコニウム0.15重量%、その他不純物0.15重量%以下とした。CuCrZrの材料特性としては、密度8.9g/cm³、熱伝導率350W/m・K、比熱380J/kg・K、線膨張係数17×10⁻⁶/K、ヤング率128GPa、ポアソン比0.33、降伏強度300MPa、引張強度440MPa、破断伸び12%を設定した。これらの値は、溶体化処理（980°C、1時間）および時効処理（480°C、2時間）を施した状態での特性値である。タングステンアーマーの材料特性としては、密度19.3g/cm³、熱伝導率173W/m・K（室温）、比熱132J/kg・K、線膨張係数4.5×10⁻⁶/K、ヤング率400GPa、ポアソン比0.28、降伏強度550MPa、引張強度650MPa、破断伸び1%を設定した。これらの値は、焼結タングステン（相対密度99.5%）の特性値である。熱応力緩和層は、タングステン側に配置された厚さ0.3mmの純銅層と、CuCrZr側に配置された厚さ0.2mmのOFC層から構成される。純銅層の材料特性としては、密度8.96g/cm³、熱伝導率400W/m・K、比熱385J/kg・K、線膨張係数17×10⁻⁶/K、ヤング率110GPa、ポアソン比0.34、降伏強度50MPa、引張強度220MPa、破断伸び

30%を設定した。OFC層の材料特性としては、密度 8.94g/cm^3 、熱伝導率 $390\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、比熱 $385\text{J/kg}\cdot\text{K}$ 、線膨張係数 $17.5\times 10^{-6}/\text{K}$ 、ヤング率 115GPa 、ポアソン比 0.33 、降伏強度 70MPa 、引張強度 240MPa 、破断伸び 25% を設定した。アルミナ絶縁層は冷却管の外表面全体を覆い、その厚さは均一に $100\mu\text{m}$ とした。アルミナの材料特性としては、密度 3.95g/cm^3 、熱伝導率 $30\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、比熱 $880\text{J/kg}\cdot\text{K}$ 、線膨張係数 $8.0\times 10^{-6}/\text{K}$ 、ヤング率 380GPa 、ポアソン比 0.22 、圧縮強度 2500MPa 、引張強度 300MPa 、破断伸び 0% を設定した。メッシュは、流体領域に約1,280万要素、構造領域に約750万要素を使用し、ヘリカルナット構造と材料界面付近では特に細かいメッシュを採用した。具体的には、ヘリカルナット近傍の流体領域では要素サイズを約 0.05mm とし、材料界面付近の構造領域では要素サイズを約 0.02mm とした。これにより、複雑な流れ構造と熱伝達現象、および材料界面での応力集中を高精度に捉えることが可能となった。メッシュ品質の評価指標として、スキューネス（歪度）が 0.85 以下、アスペクト比が 10 以下、オーソゴナル品質が 0.15 以上という基準を設け、全要素の 99.5% 以上がこの基準を満たすことを確認した。また、メッシュ依存性を評価するために、要素数を約 50% 増加させたケースと約 30% 減少させたケースでの解析も実施し、主要な結果（最大熱流束、最大応力、最高温度など）の変動が 3% 以内であることを確認した。

[0469]

シミュレーションでは、ITERおよびDEMO核融合炉のダイバータ仕様に基づく現実的な境界条件を設定した。具体的には、プラズマ対向面での熱流束 $20\sim 25\text{MW/m}^2$ （標準ケースでは 22MW/m^2 ）、冷却材入口温度 150°C 、冷却材圧力 12 バール、質量流束 $2,200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、中性子壁負荷 1.0MW/m^2 、パルス持続時間 400 秒（休止時間 600 秒）、総サイクル数 $3,000$ 回（運転寿命を想定）の条件を用いた。熱流束分布は、ダイバーストライクポイント付近での分布を模擬し、ガウス分布（半値幅約 15mm ）で与えた。熱流束の時間変動としては、プラズマの立ち上げ時（約 10 秒間）に 0 から設定値まで線形に増加し、定常運転時（約 380 秒間）に設定値を維持し、プラズマの終了時（約 10 秒間）に設定値から 0 まで線形に減少するプロファイルを設定した。また、ELM（エッジ局在モード）による過渡的熱負荷として、基本熱流束の 2 倍（約 44MW/m^2 ）の熱流束を 1 ミリ秒間隔で 0.5 ミリ秒間隔で与えるケースも解析した。ELMの頻度は約 10Hz とし、1回のプラズマ放電中に約 $4,000$ 回のELMが発生する条件とした。中性子照射条件は、 14MeV 中性子を主体とするDEMO炉心核融合中性子スペクトルを用い、5年間の連続運転（ 5FPY ）に相当する照射量を与えた。中性子スペクトルは、エネルギー範囲 $10\sim 20\text{MeV}$ を 175 群に分割し、各群のフラックスを詳細に設定した。また、ガンマ線の二次放射も考慮し、光子輸送計算も実施した。冷却材としては、軽水（ H_2O ）を使用し、その物性値（密度、粘度、熱伝導率、比熱など）は温度と圧力の関数として、IAPWS-IF97（水と水蒸気の産業用計算式）に基づいて計算した。冷却材の入口条件としては、温度 150°C 、圧力 12 バール、質量流束 $2,200\text{kg/m}^2\text{s}$ （ M10 冷却管での体積流量約 0.125kg/s ）を設定した。冷却材の水質としては、電気伝導度 $0.1\mu\text{S/cm}$ 以下、 pH 値 $9.0\sim 9.5$ 、溶存酸素濃度 10ppb 以下、塩化物イオン濃度 5ppb 以下という高純度の条件を想定した。

[0470]

熱水力性能に関する詳細なCFD解析の結果、本冷却システムの最大除去熱流束は 22.8MW/m^2 であり、設計要件（ 20MW/m^2 ）に対して 14% の安全余裕があることが確認された。この値は、同一条件下での平滑管（ 10.2MW/m^2 ）と比較して約 2.2 倍高く、ヘリカルナット構造による熱伝達促進効果の大きさを示している。熱流束の限界値は、冷却管内壁での温度が飽和温度に達し、沸騰が開始する点として定義した。ヘリカルナット構造により、壁面近傍での流体混合が促進され、熱伝達係数が大幅に向上することが確認された。具体的には、レイノルズ数約 1.7×10^5 （質量流束 $2,200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、内径 8.5mm 、水温 150°C での条件）において、ヘリカルナット冷却管のヌセルト数は約 650 であり、同条件での平滑管（ヌセルト数約 280 ）と比較して約 2.3 倍高い値を示した。この熱伝達促進効果は、ヘリカルナット構造による二次流れの生成と、それに伴う壁面近傍での流体混合の増強によるものである。二次流れの構造を詳細に分析した結果、ヘリカルナットの頂部から剥離した流れが下流側に渦を形成し、この渦が壁面近傍の高温流体と中心部の低温流体を効果的に混合することが可視化された。この混合効果により、壁面温度が低下し、より高い熱流束を除去できることが確認された。臨界熱流束（CHF）の予測には、Tong-75相関式を修正したモデルを用い、ヘリカル構造による増強効果を考慮した。具体的には、通常のTong-75相関式に対して、ヘリカル構造の効果を表す補正係数 F_h を導入し、実験データとの比較により、 $F_h = 1 + 0.4(p/d - 1)^{0.8}$ という関係式を導出した。ここで、 p はピッチ、 d は内径である。この修正モデルによる予測値と実験データとの平均偏差は約 $\pm 7\%$ であり、予測精度として良好な値である。このモデルを用いて、標準条件（圧力 12 バール、質量流束 $2,200\text{kg/m}^2\text{s}$ 、サブクール度 35°C ）での臨界熱流束を予測した結果、約 31.5MW/m^2 という値が得られた。これにより、臨界熱流束比（ $\text{CHF} = \text{CHF}/\text{実際の熱流束}$ ）は 1.38 となり、バーンアウトに対して十分な安全余裕を持つことが確認された。タングステン表面の最高温度は $1,180^\circ\text{C}$ であり、タングステンの再結晶温度（約 $1,300^\circ\text{C}$ ）以下に維持されることが確認された。この温度は、タングステンの機械的特性劣化を防ぐために重要な指標である。タングステン内の温度分布を詳細に分析した結果、表面から深さ方向に約 3mm の位置で温度勾配が最大（約 $250^\circ\text{C}/\text{mm}$ ）となり、この位置での熱応力が最も高くなることが予測された。また、 CuCrZr 冷却管の最高温度は約 285°C であり、材料の耐熱温度（約 350°C ）以下に維持されることが確認された。冷却管内の温度分布を詳細に分析した結果、冷却水との接触面での温度は約 210°C であり、サブクール度（飽和温度 188°C との差）は約 22°C となることが確認された。これは、壁面温度が飽和温度を超えており、核沸騰が発生していることを示している。核沸騰領域での熱伝達係数は約 $58,000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ と予測され、単相流領域（約 $42,000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ）と比較して約 1.4 倍高い値を示した。これにより、核沸騰が熱除去性能の向上に大きく寄与していることが確認された。

[0471]

流れ特性の詳細解析から、ヘリカルナット構造により強い旋回流が生じ、接線方向速度成分は最大で 4.2m/s （軸方向速度の約 1.4 倍）に達することが明らかになった。この旋回流は、冷却管内を螺旋状に進み、その回転数はヘリカルナットのピッチに対応して約 172 回転/秒であった。旋回流の強度を定量的に評価するために、スワール数（接線方向運動量フラックスと軸方向運動量フラックスの比）を計算した結果、管断面平均で約 0.65 という値が得られた。これは、旋回流の強度が中程度から強の範囲にあることを示している。旋回流の径方向分布を詳細に分析した結果、壁面近傍（無次元半径 $r/R > 0.8$ ）では強制渦的な分布（接線方向速度が半径に比例）を示し、中心部（ $r/R < 0.8$ ）では自由渦的な分布（接線方向速度が半径に反比例）を示すことが確認された。これは、壁面近傍ではヘリカルナット構造による強制的な旋回流が支配的であり、中心部では流体の粘性効果が支配的であることを示している。壁面近傍での乱流混合が促進され、乱流運動エネルギーは平滑管と比較して約 2.8 倍に増加した。乱流運動エネルギーの分布を詳細に分析した結果、ヘリカルナットの下流側に高乱流領域が形成され、その最大値は約 0.85J/kg に達することが確認された。この高乱流領域は、ヘリカルナットから剥離した流れが再付着する位置に対応しており、流れの不安定性が最も高い領域である。また、レイノルズ応力テンソルの分析から、半径方向と周方向の運動量交換が顕著に増加し、これが熱伝達促進の主要メカニズムであることが明らかになった。具体的には、半径方向-軸方向のレイノルズ応力（ $u_r\cdot u_z$ ）は平滑管と比較して約 3.2 倍、周方向-軸方向のレイノルズ応力（ $u_\theta\cdot u_z$ ）は約 2.9 倍に増加することが確認された。これらの増加は、ヘリカルナット構造による流れの三次元化と不安定化によるものであり、熱伝達の促進に直接寄与している。ヘリカル構造間での流れの剥離と再付着のパターンが核沸騰を促進することも確認された。流れの剥離点はヘリカルナットの上流側エッジ付近に位置し、再付着点はナット間の距離の約 70% 下流に位置することが可視化された。剥離領域内では流速が低下し、局所的な圧力も低下するため、この領域が気泡核生成の好適サイトとなることが確認された。気泡核生成サイトの密度は、平滑管と比較して約 2.5 倍に増加し、これが核沸騰熱伝達の促進に寄与していることが示された。圧力損失は 0.42 バール/mであり、平滑管と比較して 28% 高いが、冷却システムとして許容範囲内であることが示された。この圧力損失増加は、ヘリカル構造による形状抵抗と壁面摩擦の増加に起因するものである。圧力損失の内訳を詳細に分析した結果、形状抵抗が約 65% 、壁面摩擦が約 35% を占めることが確認された。形状抵抗は主にヘリカルナット構造による流れの剥離と再付着に伴うエネルギー散逸によるものであり、壁面摩擦は旋回流による壁面せん断応力の増加によるものである。圧力損失の増加率（ 28% ）は熱伝達係数の増加率（約 130% ）と比較すると小さく、熱伝達と圧力損失のバランスとしては非常に効率的であることが確認された。具体的

は、熱伝達促進係数（熱伝達係数の増加率/圧力損失の増加率）は約4.6であり、これは他の促進伝熱技術（スワール管：約2.8、ハイパーバボトン：約3.2）と比較しても優れた値である。

[0472]

熱伝達特性の詳細解析から、熱伝達係数は管の長さ方向に沿って42,000~58,000W/m²・Kの範囲で変化し、同一流動条件下での平滑管と比較して約2.4倍の向上が見られた。熱伝達係数の変動は、流れの発達状態と沸騰の発生状態に依存しており、入口から約10D（Dは管内径）の位置で流れが十分に発達し、熱伝達係数が安定することが確認された。また、熱流束が約12MW/m²を超えると核沸騰が開始し、熱伝達係数が急増することが示された。熱伝達係数の周方向分布も詳細に解析され、ヘリカルナットの頂部付近で最大値（約58,000W/m²・K）、ナット間の領域で最小値（約42,000W/m²・K）を示すことが確認された。この周方向の変動は約±16%であり、熱伝達の均一性としては良好な値である。周方向変動の原因を詳細に分析した結果、ナットの頂部付近では流速が高く、乱流強度も高いため熱伝達が促進されること、ナット間の領域では流れの剥離と再付着が生じるため熱伝達が若干低下することが明らかになった。ただし、ナット間の領域でも核沸騰が促進されるため、熱伝達係数の低下は限定的であることが確認された。12MW/m²以上の熱流束ではサブクール核沸騰が発生し、熱伝達係数がさらに向上することが確認された。沸騰開始点（ONB）は、壁面過熱度約12°Cで発生し、これは平滑管（壁面過熱度約18°C）と比較して低い値であった。これは、ヘリカル構造が気泡核生成サイトとして機能し、核沸騰の開始を促進することを示している。沸騰開始後の熱伝達係数の増加率は、熱流束の増加とともに上昇し、22MW/m²の熱流束では単相流時の約1.4倍に達することが確認された。沸騰領域でのボイド率は最大で0.15に達したが、これは安定した二相流が維持される範囲内であることが確認された。ボイド率の空間分布を詳細に分析した結果、ヘリカルナットの下流側に高ボイド領域が形成され、その分布はヘリカル構造に沿って螺旋状に進展することが可視化された。ボイド率の時間変動も解析され、気泡の生成と離脱のサイクルが約5msの周期で繰り返されることが確認された。この周期は、流速と気泡径に依存しており、流速が高いほど周期が短くなる傾向が示された。気泡径の分布も解析され、最頻径は約0.2mmであり、最大径は約0.8mmであることが確認された。これらの値は、サブクール度35°Cという条件下では、気泡が壁面から離脱後に急速に凝縮するため、比較的小さな値となっている。熱伝達メカニズムの詳細解析から、全熱流束のうち約65%が対流熱伝達、約35%が核沸騰熱伝達によるものであることが確認された。対流熱伝達の寄与が大きいのは、高い流速と強い乱流混合によるものであり、核沸騰熱伝達の寄与も無視できないことが示された。特に、熱流束が20MW/m²を超える領域では、核沸騰の寄与が約40%に増加し、高熱流束除去に重要な役割を果たすことが確認された。

[0473]

パラメータ最適化のための系統的解析を実施し、最適圧力範囲は11~13バール（臨界熱流束とポンプ動力のバランスを考慮）、最適質量流束範囲は2,100~2,300kg/m²s、最適サブクール度は32~38°Cであることが明らかになった。圧力の影響を詳細に分析するために、8~16バールの範囲で圧力を変化させた場合の熱伝達特性と臨界熱流束を評価した。その結果、圧力の増加とともに飽和温度が上昇し、同じ入口温度ではサブクール度が増加するため、臨界熱流束が向上することが確認された。具体的には、圧力8バールでの臨界熱流束は約26.5MW/m²、12バールでは約31.5MW/m²、16バールでは約35.8MW/m²と予測された。一方、圧力の増加とともに流体の密度が増加し、同じ質量流束でも流速が低下するため、対流熱伝達係数がわずかに低下する傾向も示された。具体的には、圧力8バールでの熱伝達係数は約44,000W/m²・K、12バールでは約42,000W/m²・K、16バールでは約40,000W/m²・Kと予測された。これらの相反する効果を総合的に評価した結果、圧力11~13バールの範囲が最適であると判断された。この範囲では、臨界熱流束が十分に高く（約30~33MW/m²）、熱伝達係数も良好（約41,000~43,000W/m²・K）であり、さらに圧力容器の設計要件も合理的な範囲内に収まることを確認された。質量流束の影響を詳細に分析するために、1,500~3,000kg/m²sの範囲で質量流束を変化させた場合の熱伝達特性と圧力損失を評価した。その結果、質量流束の増加とともに熱伝達係数が向上することが確認された。具体的には、質量流束1,500kg/m²sでの熱伝達係数は約32,000W/m²・K、2,200kg/m²sでは約42,000W/m²・K、3,000kg/m²sでは約52,000W/m²・Kと予測された。熱伝達係数の増加率は質量流束の約0.8乗に比例しており、これは乱流熱伝達の理論的予測（0.8乗則）と一致している。一方、圧力損失は質量流束の約1.8乗に比例して増加することが確認された。具体的には、質量流束1,500kg/m²sでの圧力損失は約0.21バール/m、2,200kg/m²sでは約0.42バール/m、3,000kg/m²sでは約0.74バール/mと予測された。圧力損失の増加率が熱伝達係数の増加率を上回るため、過剰な質量流束は効率的でないことが示された。ポンプ動力と熱除去性能のバランスを考慮した結果、質量流束2,100~2,300kg/m²sの範囲が最適であると判断された。この範囲では、熱伝達係数が十分に高く（約40,000~44,000W/m²・K）、圧力損失も許容範囲内（約0.38~0.45バール/m）であることが確認された。サブクール度の影響を詳細に分析するために、20~50°Cの範囲でサブクール度を変化させた場合の熱伝達特性と臨界熱流束を評価した。その結果、サブクール度の増加とともに臨界熱流束が向上することが確認された。具体的には、サブクール度20°Cでの臨界熱流束は約26.8MW/m²、35°Cでは約31.5MW/m²、50°Cでは約36.2MW/m²と予測された。臨界熱流束の増加率はサブクール度にほぼ比例しており、これはサブクール沸騰の理論的予測と一致している。一方、サブクール度の増加は冷却系の熱効率を低下させる効果もある。具体的には、サブクール度が高いほど冷却水の入口温度が低くなり、熱交換器での熱回収率が低下する。熱効率と臨界熱流束のバランスを考慮した結果、サブクール度32~38°Cの範囲が最適であると判断された。この範囲では、臨界熱流束が十分に高く（約30~32MW/m²）、熱効率も許容範囲内であることが確認された。これらのシミュレーション結果は、類似のヘリカル構造に関する実験データ（Inasaka & Nariyai, 1996; Celata et al., 1998; Kinoshita et al., 2000; Boscaray et al., 2005）と良く一致しており、計算手法の妥当性が確認された。具体的には、熱伝達係数の予測値は実験値との偏差が±12%以内であり、圧力損失の予測値は実験値との偏差が±8%以内であった。また、臨界熱流束の予測値は実験値との偏差が±15%以内であり、これは沸騰現象の複雑さを考慮すると良好な一致度である。

[0474]

構造健全性に関する詳細な有限要素解析の結果、CuCrZr冷却管内の最大von Mises応力は268MPaであり、降伏強度（約300MPa）以下であることが確認された。この最大応力は、冷却管とタングステンアーマーの接合部付近に発生し、熱膨張係数の差による熱応力が主要因であった。応力分布の詳細解析から、応力集中係数は約1.8であり、これは設計上許容される範囲内であることが確認された。応力集中の原因を詳細に分析した結果、CuCrZr冷却管と熱応力緩和層（OFC層）の界面での材料特性の不連続性が主要因であることが明らかになった。特に、降伏強度の差（CuCrZr：約300MPa、OFC：約70MPa）により、OFC層が先に塑性変形を開始し、その結果としてCuCrZr側に応力が集中することが確認された。この応力集中を緩和するために、CuCrZrとOFC層の界面を緩やかな勾配を持つ遷移層にすることが効果的であることが示された。例えば、厚さ0.1mmの遷移層を設けることで、応力集中係数を約1.4まで低減できることが予測された。CuCrZr冷却管内の応力分布を詳細に分析した結果、冷却水側の内面では圧縮応力（約-180MPa）が、外面側では引張応力（最大約268MPa）が発生することが確認された。これは、内面と外面の温度差（約75°C）による熱応力が主要因である。また、ヘリカルナット構造の影響も分析され、ナットの根元部分に局所的な応力集中（約1.2倍）が発生することが確認された。しかし、この応力集中は限定的であり、全体の構造健全性に大きな影響を与えないことが示された。タングステンアーマー内の最大von Mises応力は385MPaであり、降伏強度（約550MPa）以下であった。この最大応力は、プラズマ対向面から約3mm内部の位置に発生し、急峻な温度勾配による熱応力が主要因であった。タングステン内の応力分布を詳細に分析した結果、表面付近では圧縮応力（約-320MPa）が支配的であり、内部では引張応力（最大約385MPa）が発生することが確認された。この応力分布は、表面が高温で内部が低温という温度分布に起因するものであり、熱膨張により表面が膨張しようとするのを内部が拘束するために生じる。また、タングステンの脆性的性質を考慮して、最大主応力についても評価を行った。その結果、最大主応力は約320MPaであり、タングステンの引張強度（約650MPa）の約49%であることが確認された。これは、タングステンの脆性破壊に対しても十分な安全余裕があることを示している。熱応力緩和層により、銅-タング

ステン界面での応力集中が62%低減されることが示された。緩和層がない場合の界面応力は約620MPaと予測され、これはタングステンと銅の接合強度（約400MPa）を超える値であった。一方、緩和層を設けた場合の界面応力は約235MPaに低減され、接合強度に対して十分な安全余裕を持つことが確認された。応力緩和のメカニズムを詳細に分析した結果、純銅層が塑性変形することで熱応力を吸収し、OFC層がCuCrZrとの良好な接合性を提供することで、システム全体の構造健全性が確保されることが明らかになった。純銅層内の塑性ひずみ分布を詳細に分析した結果、最大塑性ひずみは約0.35%であり、これは純銅の破断伸び（約30%）に対して十分に小さい値であることが確認された。また、OFC層内の塑性ひずみは最大で約0.25%であり、これもOFCの破断伸び（約25%）に対して十分に小さい値であることが確認された。これらの結果から、熱応力緩和層が設計通りに機能し、接合部の構造健全性を確保できることが示された。

[0475]

熱疲労評価の詳細解析の結果、3,000サイクル後の累積疲労使用係数は0.78であり、設計寿命内での十分な疲労寿命を有することが確認された。疲労評価には、ASME基準に基づくマイナー則を適用し、各材料の疲労曲線（S-N曲線）を考慮した。CuCrZr冷却管の疲労寿命は約3,850サイクルと予測され、設計寿命（3,000サイクル）に対して約28%の余裕があることが確認された。CuCrZrの疲労特性としては、室温での疲労強度（ 10^7 サイクルでの応力振幅）が約150MPa、高温（300°C）での疲労強度が約120MPaという値を用いた。これらの値は、溶体化処理および時効処理を施したCuCrZrの実験データに基づいている。熱サイクル中の応力履歴を詳細に分析した結果、最大応力振幅は約240MPaであり、これは高温での疲労強度の約2倍に相当する。この応力レベルでの疲労寿命は、S-N曲線から約3,850サイクルと予測された。また、平均応力の影響も考慮し、Goodmanの修正式を適用した結果、修正後の疲労寿命は約4,200サイクルと予測された。これは、平均応力が引張側に偏っているため、疲労寿命がわずかに向上する効果があることを示している。タングステンアーマーの疲労寿命は約4,200サイクルと予測され、設計寿命に対して約40%の余裕があることが確認された。タングステンの疲労特性としては、室温での疲労強度が約300MPa、高温（1,000°C）での疲労強度が約250MPaという値を用いた。これらの値は、焼結タングステンの実験データに基づいている。熱サイクル中の応力履歴を詳細に分析した結果、最大応力振幅は約350MPaであり、これは高温での疲労強度の約1.4倍に相当する。この応力レベルでの疲労寿命は、S-N曲線から約4,200サイクルと予測された。また、タングステンの脆性的性質を考慮して、破壊力学的アプローチによる評価も行った。その結果、最大応力拡大係数は約 $12\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ であり、タングステンの破壊靱性値（約 $20\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ）の約60%であることが確認された。これは、脆性破壊に対しても十分な安全余裕があることを示している。設計寿命内でのき裂発生は予測されず、銅層内の最大塑性ひずみ蓄積は0.42%であり、許容範囲内（1%以下）であることが示された。塑性ひずみの蓄積は、主に熱応力緩和層の純銅部分に集中し、サイクル数の増加とともに漸進的に飽和する傾向が確認された。具体的には、最初の100サイクルで約0.35%の塑性ひずみが蓄積され、その後3,000サイクルまでに追加で約0.07%の蓄積にとどまることが示された。これは、熱応力緩和層が意図した通りに機能し、繰り返し熱負荷に対して安定した応答を示すことを意味している。塑性ひずみの蓄積メカニズムを詳細に分析した結果、最初のサイクルでは純銅層が大きく塑性変形し、その後のサイクルでは加工硬化により降伏強度が上昇し、塑性変形が抑制されることが確認された。具体的には、100サイクル後の純銅層の降伏強度は約85MPa（初期値の約1.7倍）まで上昇し、これにより追加の塑性変形が抑制されることが示された。また、ELMによる過渡的熱負荷の影響も評価され、ELMによる追加の塑性ひずみは約0.02%/1000ELMと予測された。これは、設計寿命内（約 12×10^6 ELM）での累積塑性ひずみが約0.24%となり、許容範囲内であることを示している。

[0476]

熱膨張管理に関する詳細解析から、タングステン表面での最大変位は0.38mmであり、タングステン（線膨張係数約 $4.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）とCuCrZr（線膨張係数約 $17 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）の熱膨張差は銅/OFC中間層により効果的に吸収されることが確認された。熱膨張差の詳細分析から、室温から運転温度（タングステン表面約1,180°C、CuCrZr約285°C）までの温度上昇による熱膨張量は、タングステンで約0.13mm、CuCrZrで約0.48mmと予測された。この差（約0.35mm）は、主に熱応力緩和層の塑性変形により吸収されることが確認された。熱サイクル中の変位の時間変化を詳細に分析した結果、加熱過程では約0.2秒で最大変位の約63%に達し、その後徐々に最大値に漸近することが示された。この応答特性は、熱伝導と熱膨張の時定数に依存しており、タングステンの熱拡散率（約 $6.8 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ）と厚さ（約25mm）から計算される熱伝導の時定数は約9.2秒、熱膨張の時定数は約0.3秒と予測された。これらの値は、シミュレーション結果と良く一致しており、熱応答の物理的メカニズムを裏付けている。冷却過程では、約0.5秒で変位が最大値の約40%まで減少し、その後徐々に初期状態に戻ることが確認された。冷却過程の応答が加熱過程よりも遅いのは、温度が低下するにつれて熱伝達係数が低下し、冷却効率が低下するためである。具体的には、加熱過程での平均熱伝達係数は約 $42,000 \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 、冷却過程での平均熱伝達係数は約 $35,000 \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ と予測された。この差は、加熱過程では核沸騰が促進されるのに対し、冷却過程では核沸騰が抑制されるためである。冷却後の残留変位は約0.02mm（最大変位の約5%）であり、これは熱応力緩和層内の塑性変形に起因するものであった。残留変位の蓄積を詳細に分析した結果、最初の10サイクルで約0.015mmの残留変位が蓄積され、その後3,000サイクルまでに追加で約0.005mmの蓄積にとどまることが示された。これは、塑性変形が主に最初のサイクルで生じ、その後は加工硬化により抑制されることを示している。冷却後の残留応力は86MPaであり、降伏強度以下に維持されることが示された。残留応力の分布を詳細に分析した結果、最大残留応力はCuCrZr冷却管とOFC層の界面付近に発生し、その値は冷却管の降伏強度の約29%であることが確認された。この残留応力レベルは、次のサイクルでの応力状態に影響を与えるが、累積的な増加は見られず、サイクル数の増加とともに安定した状態に収束することが示された。具体的には、最初の10サイクルで残留応力が約80MPaまで上昇し、その後3,000サイクルまでに約86MPaに漸近することが確認された。この挙動は、材料の加工硬化と応力緩和のバランスによるものであり、長期的には安定した状態に達することを示している。また、残留応力の分布パターンも安定化し、10サイクル以降では分布形状がほとんど変化しないことが確認された。これは、塑性変形が局所化され、その後の変形が抑制されることを示している。熱膨張差の吸収メカニズムを詳細に分析した結果、純銅層が塑性変形することで熱膨張差の約70%を吸収し、残りの約30%は弾性変形と微小な塑性変形の組み合わせで吸収されることが確認された。この吸収メカニズムにより、タングステンアーマーとCuCrZr冷却管の間の相対変位が抑制され、接合部の健全性が維持されることが示された。

[0477]

応力緩和手法の詳細比較分析の結果、2層構造（純銅層とOFC層）は直接接合と比較して界面最大応力を42%低減し、傾斜機能材料（Cu-W）は直接接合と比較して界面最大応力を48%低減することが明らかになった。2層構造の場合、純銅層（厚さ0.3mm）はその高い延性により熱応力を塑性変形で吸収し、OFC層（厚さ0.2mm）はCuCrZrとの良好な接合性を提供することが確認された。純銅層の役割を詳細に分析するために、純銅層の厚さを0.1~0.5mmの範囲で変化させた場合の応力分布を評価した。その結果、厚さ0.1mmでは応力緩和効果が不十分（応力低減率約25%）であり、厚さ0.3mm以上ではほぼ同等の応力緩和効果（応力低減率約42~45%）が得られることが確認された。これは、純銅層の塑性変形能力が厚さ0.3mm程度で飽和することを示している。また、純銅層の降伏強度の影響も評価され、降伏強度が低いほど応力緩和効果が高いことが確認された。具体的には、降伏強度30MPaの純銅では応力低減率約48%、降伏強度70MPaの純銅では応力低減率約38%と予測された。これは、降伏強度が低いほど塑性変形が容易に生じ、熱応力を効果的に吸収できることを示している。OFC層の役割も詳細に分析され、OFC層がないと純銅とCuCrZrの接合強度が低下し、界面での剥離リスクが高まることが確認された。具体的には、OFC層なしの場合、界面せん断応力は約85MPaと予測され、これは純銅-CuCrZr接合部の許容せん断応力（約70MPa）を超える値であった。一方、OFC層がある場合、界面せん断応力は約55MPaに低減され、接合強度に対して十分な安全余裕を持つことが確認された。傾斜機能材料の場合、タングステン側から銅側に向かって5層構造（各層厚さ0.1mm）で組成を徐々に変化させることで、線膨張係数の急激な変化を避け、応力集中を分散

させる効果が確認された。各層の組成は、タングステン:銅=100:0、75:25、50:50、25:75、0:100とし、これにより線膨張係数が約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ から約 $17 \times 10^{-6}/K$ まで緩やかに変化することが示された。線膨張係数の変化パターンを詳細に分析した結果、各層の線膨張係数は組成比にほぼ比例して変化し、タングステン側から銅側に向かって約 $4.5 \times 10^{-6}/K$ 、約 $7.6 \times 10^{-6}/K$ 、約 $10.8 \times 10^{-6}/K$ 、約 $13.9 \times 10^{-6}/K$ 、約 $17 \times 10^{-6}/K$ という値を示すことが確認された。この緩やかな変化により、層間の熱応力が低減され、全体として応力集中が緩和されることが示された。また、層数の影響も評価され、3層構造では応力低減率約42%、5層構造では約48%、7層構造では約50%と予測された。これは、層数が増えるほど線膨張係数の変化が滑らかになり、応力緩和効果が向上することを示している。ただし、層数の増加に伴う効果は徐々に飽和し、5層以上ではわずかな改善にとどまることが確認された。傾斜機能材料はわずかに優れた性能を示すが、製造の複雑さが増すことが示された。具体的には、傾斜機能材料の製造には粉末冶金法と高温焼結が必要であり、製造コストは2層構造と比較して約1.8倍高いと見積もられた。また、製造プロセスの複雑さから、品質のばらつきや欠陥の発生リスクも高まることが指摘された。一方、2層構造の製造にはスパッタリングと電気めっきという比較的確立された技術が使用でき、製造の再現性と信頼性が高いことが利点として挙げられた。製造コストと性能のバランスを総合的に評価した結果、量産性と信頼性を重視する場合は2層構造が推奨され、最高性能を追求する場合は5層構造の傾斜機能材料が推奨されることが示された。

[0478]

中性子工学解析の詳細結果から、CuCrZr冷却管の照射損傷は2.8dpa/FPY（全出力年あたり）、ヘリウム生成量は68appm/FPYであることが示された。照射損傷の空間分布を詳細に分析した結果、冷却管の外側（タングステン側）では約3.2dpa/FPY、内側（冷却水側）では約2.4dpa/FPYと、位置による変動があることが確認された。これは、タングステンアーマーによる中性子の減速と散乱の効果によるものである。具体的には、14MeV中性子がタングステンと衝突すると、弾性散乱と非弾性散乱により中性子のエネルギーが低下し、散乱方向も変化する。その結果、冷却管の外側には比較的高エネルギーの中性子が多く入射し、内側には低エネルギーの中性子が多く入射することになる。照射損傷の主要メカニズムは、中性子と銅原子の弾性衝突による原子はじき出しであり、はじき出しエネルギーは約30eVと設定された。中性子スペクトルと断面データから計算された平均はじき出し断面は約3.2パーンであり、これにより照射損傷率が決定される。ヘリウム生成の主要反応は $^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$ であり、これはCuCrZr中の銅同位体（特に ^{63}Cu 、天然存在比約69.2%）と高速中性子の反応によるものであることが確認された。この反応の閾エネルギーは約5MeVであり、断面は約0.04パーンである。また、クロムとジルコニウムからのヘリウム生成も考慮され、 $^{52}\text{Cr}(n,\alpha)^{49}\text{Ti}$ と $^{90}\text{Zr}(n,\alpha)^{87}\text{Sr}$ の反応が評価された。これらの反応の寄与は、銅からのヘリウム生成の約5%程度であることが確認された。ヘリウム生成量の空間分布も分析され、照射損傷と同様に外側で多く、内側で少ない傾向が確認された。具体的には、外側で約75appm/FPY、内側で約60appm/FPYと予測された。タングステンの核変換率は5FPY後に1.2%（主にReとOsへの変換）であることが確認された。核変換の詳細分析から、主要反応は $^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$ とそれに続く $^{187}\text{W} \rightarrow ^{187}\text{Re} \rightarrow ^{187}\text{Os}$ の崩壊連鎖、および $^{184}\text{W}(n,\gamma)^{185}\text{W}$ とそれに続く $^{185}\text{W} \rightarrow ^{185}\text{Re} \rightarrow ^{185}\text{Os}$ の崩壊連鎖であることが示された。 ^{186}W の天然存在比は約28.6%、 ^{184}W の天然存在比は約30.7%であり、これらの同位体からの核変換が支配的である。 ^{187}W の半減期は約23.9時間、 ^{185}W の半減期は約75.1日であり、いずれも比較的短時間で崩壊してレニウムに変換される。 ^{187}Re の半減期は約 4.3×10^{10} 年、 ^{185}Re の半減期は安定であり、レニウムは長期間にわたって蓄積される。5FPY後のタングステン中のレニウム濃度は約1.0%、オスミウム濃度は約0.2%と予測された。これらの核変換反応は、タングステンの機械的特性と熱的特性に影響を与えることが知られている。特に、レニウムの添加はタングステンの延性を向上させる効果があり、これは核融合炉環境下では有利な変化である。一方、オスミウムの蓄積は脆化を促進する可能性があり、長期的には注意が必要である。核変換による材料特性変化を詳細に評価するために、レニウムとオスミウムの濃度分布を考慮した材料特性モデルを構築し、機械的特性の変化を予測した。その結果、5FPY後のタングステンの降伏強度は約5%上昇し、延性（破断伸び）は約15%向上することが予測された。これは、レニウムによる延性向上効果が支配的であることを示している。また、熱伝導率は約8%低下することが予測され、これは合金元素の添加による電子散乱の増加が原因である。

[0479]

材料特性劣化に関する詳細解析から、CuCrZrの降伏強度は5FPY後に約18%低下し、熱伝導率は約22%低下することが予測された。降伏強度の低下は主に照射硬化と照射軟化の競合効果によるものであり、低照射量（約0.5dpa）では照射硬化により強度が増加するが、高照射量（約2dpa以上）では照射軟化により強度が低下することが示された。照射硬化のメカニズムは、中性子照射により導入される点欠陥（空孔と格子間原子）が集合して形成される欠陥クラスター（転位ループ、ポイドなど）が転位の運動を阻害することによる。照射軟化のメカニズムは、高温（約285°C）での照射により、時効処理で形成された析出物（主にCr粒子とZr粒子）が分解・粗大化し、析出強化効果が低下することによる。これらの競合効果を定量的に評価するために、欠陥クラスターの密度と析出物の状態変化をモデル化し、降伏強度の変化を予測した。その結果、0.5dpaでの降伏強度は約330MPa（約10%増加）、2dpaでは約300MPa（変化なし）、5dpaでは約245MPa（約18%低下）と予測された。この予測は、類似の銅合金の照射実験データと良く一致しており、モデルの妥当性が確認された。熱伝導率の低下は、照射欠陥（特に空孔クラスターと転位ループ）による電子散乱の増加が主要因であることが確認された。熱伝導率の変化を定量的に評価するために、欠陥濃度と電子散乱断面をモデル化し、熱伝導率の変化を予測した。その結果、0.5dpaでの熱伝導率は約315W/m・K（約10%低下）、2dpaでは約280W/m・K（約20%低下）、5dpaでは約273W/m・K（約22%低下）と予測された。この予測も、照射実験データと良く一致しており、モデルの妥当性が確認された。また、照射によるCuCrZrの延性（破断伸び）の変化も評価され、5FPY後には約50%低下（12%から約6%に減少）することが予測された。これは、照射欠陥による塑性変形能力の低下が主要因である。具体的には、照射欠陥が転位の運動を阻害し、局所的な応力集中を引き起こすことで、早期破断が生じる。タングステンの脆化開始は約3.5FPY後と予測された。タングステンの脆化は、照射欠陥の蓄積と再結晶の進行によるものであり、特に粒界での脆化が顕著であることが示された。脆化のメカニズムとしては、照射により導入される点欠陥が粒界に偏析し、粒界強度を低下させることが主要因である。また、高温（約1,180°C）での長時間使用により、再結晶が進行し、結晶粒が粗大化することも脆化を促進する。脆化の進行は、延性-脆性遷移温度（DBTT）の上昇として現れ、未照射状態では約400°CであったDBTTが、3.5FPY後には約650°Cまで上昇することが予測された。これは、運転温度（約1,180°C）がDBTTを十分に上回っているため、運転中の脆性破壊リスクは低いことを示している。ただし、炉の起動・停止時など、低温状態での熱応力には注意が必要である。また、タングステンの照射による体積変化（スウェリング）も評価され、5FPY後には約0.5%の体積増加が予測された。これは、照射により形成されるポイドや気泡（特にヘリウム気泡）による体積膨張が主要因である。この体積変化は比較的小さく、構造健全性に大きな影響を与えないことが確認された。これらの材料特性変化を考慮した構造解析を実施した結果、5FPY後でも構造健全性は維持されるが、安全余裕は未照射状態と比較して約25%減少することが確認された。具体的には、CuCrZr冷却管の最大応力（268MPa）は照射後の降伏強度（約245MPa）をわずかに超えるが、局所的な塑性変形にとどまり、構造全体の健全性は維持されることが示された。また、タングステンアーマーの最大応力（385MPa）は照射後の降伏強度（約580MPa、レニウム添加効果による増加）に対して十分な余裕があることが確認された。

[0480]

放射化分析の詳細結果から、2週間冷却後の接触線量率は約120mSv/hであり、主要な核種はタングステン中の ^{182}Ta 、 ^{186}Re 、CuCrZr中の ^{60}Co 、 ^{64}Cu であることが示された。放射化の時間変化を詳細に分析した結果、運転停止直後の線量率は約2,500mSv/hであり、その後急速に減衰して1日後には約350mSv/h、1週間後には約180mSv/h、1ヶ月後には約85mSv/hとなることが予測された。この急速な減衰は、短半減期核種（特に ^{187}W ：半減期約23.9時間、 ^{64}Cu ：半減期約12.7時間）の崩壊によるものである。運転停止直後の放射能の約70%はこれらの短半減期核種によるものであり、1週間後にはその

寄与が約5%まで減少することが確認された。長期的な放射化レベルは主に⁶⁰Co(半減期約5.3年)によって決まり、10年冷却後の線量率は約15mSv/hと予測された。⁶⁰Coは主にCuCrZr中の⁵⁹Co(不純物として約0.01%含有)の中性子捕獲反応(⁵⁹Co(n,γ)⁶⁰Co)により生成される。また、CuCrZr中の銅からも⁶³Cu(n,α)⁶⁰Co反応により⁶⁰Coが生成されるが、その寄与は⁵⁹Coからの生成の約10%程度である。核種ごとの放射能を詳細に分析した結果、運転停止直後の主要核種は¹⁸⁷W(約35%)、⁶⁴Cu(約25%)、¹⁸⁷Re(約15%)、⁶⁰Co(約10%)、¹⁸²Ta(約5%)であることが確認された。2週間冷却後には、⁶⁰Co(約45%)、¹⁸²Ta(約25%)、¹⁸⁶Re(約15%)が主要核種となり、1年後には⁶⁰Co(約80%)が支配的となることが予測された。崩壊熱は1日冷却後で約0.08MW/m³であることが確認された。崩壊熱の時間変化を詳細に分析した結果、運転停止直後の崩壊熱は約0.6MW/m³であり、その後急速に減衰して1時間後には約0.2MW/m³、6時間後には約0.12MW/m³となることが予測された。崩壊熱の主要寄与核種も時間とともに変化し、運転停止直後は¹⁸⁷W(約40%)が最も寄与が大きく、1日後には¹⁸⁶Re(約30%)と¹⁸²Ta(約25%)が主要となり、1週間後には¹⁸²Ta(約40%)と⁶⁰Co(約30%)が主要となることが確認された。この崩壊熱レベルは、冷却系が機能停止した場合でも、自然対流と輻射のみで除去可能であることが熱解析により確認された。具体的には、冷却系停止後の最高温度は約450°Cと予測され、これはCuCrZrの耐熱温度(約500°C、短時間であれば)以下であることが確認された。また、廃棄物分類の観点からの評価も行われ、冷却期間に応じた廃棄物区分が決定された。具体的には、100年冷却後の放射能濃度は約0.1GBq/tと予測され、これは低レベル放射性廃棄物(クラスC)に分類されることが確認された。この評価は、核融合炉の廃炉計画と廃棄物管理戦略の策定に重要な情報を提供する。

[0481]

絶縁層性能に関する詳細解析から、Al₂O₃層の電気抵抗率は照射後も10¹²Ω・cm以上を維持し、運転中の放射線誘起導電率は電氣的絶縁性に対して無視できる影響であることが示された。照射による絶縁層の劣化メカニズムとしては、照射欠陥の生成、酸素空孔の形成、結晶構造の非晶質化などが考えられるが、運転温度(約200~300°C)では欠陥の回復効果も働いたため、絶縁性能の著しい劣化は生じないことが確認された。照射欠陥の生成と回復のバランスを詳細に評価するために、照射欠陥の生成率と温度依存の回復率をモデル化し、定常状態での欠陥濃度を予測した。その結果、運転温度での定常欠陥濃度は飽和値の約15%程度にとどまり、これにより電気抵抗率の低下も限定的であることが示された。具体的には、5FPY後の絶縁抵抗は未照射状態の約85%を維持し、これは電氣的絶縁性能として十分な値であることが示された。また、運転中の放射線誘起導電率(RIC)も評価され、最大で約10⁻⁸S/mと予測された。これは、絶縁層の厚さ(100μm)を考慮すると、漏れ電流は約10⁻⁴A/m²程度であり、実用上問題ないレベルであることが確認された。RICの評価には、線量率と温度の関数としてモデル化し、RIC=K・D^Δ・exp(-Ea/kT)という関係式を用いた。ここで、Kは材料定数、Dは線量率、Δは線量率依存指数(約0.8~1.0)、Eaは活性化エネルギー、kはボルツマン定数、Tは絶対温度である。Al₂O₃の場合、K≈10⁻¹⁶、Δ≈0.9、Ea≈0.1eVという値が実験データから得られており、これを用いてRICを予測した。また、絶縁層の機械的健全性についても評価を行い、熱サイクルによる応力と照射による体積変化(スウェリング)を考慮しても、亀裂や剥離は発生しないことが確認された。絶縁層内の最大応力は約120MPaであり、Al₂O₃の圧縮強度(約2,500MPa)と引張強度(約300MPa)に対して十分な余裕があることが示された。応力分布を詳細に分析した結果、絶縁層の大部分は圧縮応力状態にあり、これは熱膨張係数の差(Al₂O₃:約8.0×10⁻⁶/K、CuCrZr:約17×10⁻⁶/K)によるものであることが確認された。圧縮応力状態は亀裂の発生を抑制する効果があり、絶縁層の健全性維持に有利である。また、照射によるAl₂O₃のスウェリングも評価され、5FPY後には約0.2%の体積増加が予測された。これは比較的小きな値であり、絶縁層の健全性に大きな影響を与えないことが確認された。絶縁層の密着性も重要な評価項目であり、熱サイクルによる界面せん断応力を詳細に分析した結果、最大せん断応力は約25MPaであり、Al₂O₃-CuCrZr界面の密着強度(約50MPa)に対して十分な余裕があることが確認された。この密着強度は、アルミナ層形成前のプラスト処理による表面粗化と、熱スプレー過程での機械的インターロック効果により確保されている。

[0482]

システムレベルの性能に関する詳細解析の結果、プラズマ崩壊事象中の温度変動は30°C未満であり、崩壊後の回復時間は約8.2秒であることが確認された。プラズマ崩壊時の熱負荷変動を詳細にモデル化し、熱流束が100ms以内に22MW/m²から約0.1MW/m²まで急減する条件での冷却システムの応答を解析した。その結果、タングステン表面温度は約1,180°Cから約1,150°Cまで低下し、その後約8.2秒で定常状態に達することが確認された。温度変化の時間応答を詳細に分析した結果、温度低下は約0.5秒で最大値の約70%に達し、その後徐々に定常状態に漸近することが示された。この応答特性は、タングステンの熱容量と熱伝導率、および冷却条件に依存しており、実験的に観測される応答とも良く一致している。CuCrZr冷却管の温度変動はさらに小さく、最大で約15°Cの低下にとどまることが示された。これは、タングステンの熱容量が緩和効果を持ち、急激な熱負荷変動を吸収するためである。具体的には、タングステンの体積比熱(密度×比熱)は約2.5MJ/m³・Kであり、これにより短時間の熱負荷変動が緩和される。また、タングステンからCuCrZrへの熱伝導経路の熱抵抗も、温度変動の緩和に寄与している。熱抵抗の内訳を詳細に分析した結果、タングステン内の熱伝導抵抗が約45%、熱応力緩和層の熱伝導抵抗が約15%、冷却管壁の熱伝導抵抗が約10%、対流熱伝達抵抗が約30%を占めることが確認された。この熱抵抗分布により、熱負荷変動の影響が冷却管に到達する前に緩和されることが示された。冷却材喪失事故(LOCA)時の最大圧力上昇は16.8バー(約77mmHg)であり、設計限界(20バー)以下であることが示された。LOCAシナリオとしては、冷却管の破断を想定し、破断面積を冷却管断面積の約10% (約77mm²)とした。破断後の圧力上昇は、冷却水の急速な蒸発(フラッシング)によるものであり、破断後約0.5秒で最大圧力16.8バーに達し、その後安全弁の作動により約15バーに維持されることが確認された。圧力上昇の時間変化を詳細に分析した結果、破断直後は約20バー/秒の速度で圧力が上昇し、約0.3秒後に上昇速度が低下し始め、約0.5秒で最大値に達することが示された。この圧力上昇パターンは、破断初期には冷却水の流出量が少なく、圧力低下も小さいため蒸発が抑制されるが、破断が進行するにつれて流出量が増加し、圧力低下も大きくなるため蒸発が促進されるという物理的メカニズムと一致している。安全弁の応答特性も詳細に評価され、設定圧力(15バー)に達してから約0.1秒で全開状態となり、その後は圧力を約15±0.5バー範囲に制御できることが確認された。安全弁の設計仕様としては、吹き出し容量約5kg/s(冷却系の最大流量に相当)、弁径約40mm、パネ定数約50N/mmという値が適切であることが示された。この安全弁設計により、LOCA時の圧力上昇を設計限界以下に抑えつつ、不要な弁の作動を防止できることが確認された。また、LOCA時の温度上昇も評価され、冷却水喪失後約10秒でタングステン表面温度が約1,500°Cに達し、約30秒で約2,000°Cに達することが予測された。この温度上昇は、プラズマ停止操作(約5秒)が迅速に行われれば、タングステンの融点(約3,400°C)に達する前に熱負荷を除去できることを示している。これにより、LOCAが発生しても、適切な安全対策により炉心の健全性を維持できることが確認された。

[0483]

冗長性の有効性に関する詳細解析から、1つの冷却ループが故障した場合、最高温度は168°C上昇するが、残りの冷却能力は定格の約62%(設計目標の60%を上回る)を維持できることが確認された。冷却ループ故障のシナリオとしては、ポンプの停止または配管の閉塞を想定し、1つのループの流量が完全に喪失する条件での冷却システムの応答を解析した。その結果、タングステン表面温度は約1,180°Cから約1,348°Cまで上昇するが、これはタングステンの再結晶温度(約1,300°C)をわずかに超えるものの、融点(約3,400°C)に対しては十分な余裕があることが確認された。温度上昇の空間分布を詳細に分析した結果、熱負荷の高い領域(ストライクポイント付近)での温度上昇が最も大きく、約168°Cの上昇が見られるのに対し、熱負荷の低い領域では約100°C程度の上昇にとどまることが確認された。これは、熱負荷と冷却能力のバランスが領域によって異なるためである。また、温度上昇の時間変化も分析され、ループ故障後約5秒で温度上昇の約80%に達し、約20秒で定常状態に達することが示された。この応答時間は、システムの熱容量と残存冷却能力に依存しており、実際の核融合炉での運転条件とも整合している。CuCrZr冷却管の最高温度は約285°Cから約335°Cまで上昇するが、これは材料の耐熱温

度(約350°C)以下であることが示された。冷却管温度の上昇パターンを詳細に分析した結果、温度上昇は冷却管の周方向で不均一であり、熱負荷の高い側で約50°C、低い側で約30°Cの上昇が見られることが確認された。これは、冷却管内の流速低下により熱伝達係数が低下し、温度分布の不均一性が増加するためである。冷却故障後に臨界温度(CuCrZrの場合は350°C)に達するまでの時間は約28秒であり、安全停止に十分な時間であることが確認された。この時間余裕は、プラズマ停止操作(約5秒)と安全系の作動(約10秒)に必要な時間を考慮しても十分であることが示された。また、冷却ループ故障時の流量再分配も詳細に分析され、残存ループの流量が約10%増加することが確認された。これは、1つのループが閉塞することで系全体の圧力損失が減少し、残存ループの流量が増加するためである。この流量増加は、残存ループの冷却能力を約62%まで向上させる効果があり、これが温度上昇を抑制する要因となっている。冗長設計の最適化も検討され、2ループ構成と3ループ構成の比較が行われた。その結果、3ループ構成(各ループが定格容量の40%を担当)の場合、1ループ故障時の温度上昇は約100°C、2ループ故障時でも約250°Cにとどまり、より高い安全性が確保できることが示された。ただし、3ループ構成はシステムの複雑さとコストが増加するため、要求される安全性と経済性のバランスを考慮して最適な構成を選定する必要がある。

[0484]

制御系応答に関する詳細解析から、PID制御器は通常運転時に温度を設定値の $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内に維持し、熱負荷のステップ変化に対する応答時間は約4.6秒であることが確認された。制御系のモデルとしては、冷却水流量を操作変数、冷却管出口温度を制御変数とするPID制御系を実装し、その応答特性を解析した。PIDパラメータは、ジグラー・ニコルス法により最適化し、比例ゲイン $K_p=2.5$ 、積分時間 $T_i=8.0$ 秒、微分時間 $T_d=2.0$ 秒とした。これらのパラメータは、制御の安定性と応答性のバランスを考慮して選定されたものである。比例ゲインが大きすぎると応答は速くなるが、オーバーシュートや振動が発生しやすくなり、小さすぎると応答が遅くなる。積分時間が短すぎると積分効果が強くなり、オーバーシュートが増加し、長すぎると定常偏差の除去が遅くなる。微分時間が長すぎると高周波ノイズに敏感になり、短すぎると微分効果が弱くなる。これらのトレードオフを考慮して最適なパラメータを選定した結果、安定性と応答性のバランスが良好な制御性能が得られることが確認された。この制御系に対して、熱負荷の20%ステップ増加(22MW/m²から26.4MW/m²への変化)を与えた場合、冷却管出口温度は一時的に約8°C上昇した後、約4.6秒で設定値の $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内に収束することが確認された。応答の詳細分析から、熱負荷変化後約1.2秒で温度上昇が検出され、約1.5秒で流量制御が開始され、約4.6秒で温度が安定することが示された。この応答時間は、温度センサの応答遅れ(約0.5秒)、制御演算の周期(約0.1秒)、流量制御弁の応答時間(約0.8秒)、および系の熱的時定数(約2.5秒)によって決まる。オーバーシュートは約3°C(設定値の約1.7%)であり、制御性能として良好な値であることが示された。オーバーシュートの大きさは、PIDパラメータの調整により制御可能であり、比例ゲインを小さくするとオーバーシュートは減少するが、応答時間が長くなるというトレードオフがある。安定性マージンは約12dBであり、これはシステムパラメータの変動(例えば、流量-圧力特性の $\pm 20\%$ 変化)に対しても安定性が維持されることを意味している。安定性マージンの評価には、ボード線図を用いたゲイン余裕と位相余裕の解析が行われ、ゲイン余裕は約12dB、位相余裕は約60度であることが確認された。これらの値は、制御系の堅牢性を示す指標であり、一般的な設計基準(ゲイン余裕6dB以上、位相余裕30度以上)を十分に満たしている。また、制御系の堅牢性を評価するために、センサノイズ(標準偏差約1°C)と外乱(熱負荷の $\pm 5\%$ ランダム変動)を加えた条件でのシミュレーションも実施し、温度変動が設定値の $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内に抑えられることが確認された。これは、実際の運転条件下でも安定した制御が可能であることを示している。さらに、適応制御アルゴリズムの導入効果も評価され、プラズマ条件の変化に応じて制御パラメータを自動調整することで、より安定した温度制御が可能であることが示された。具体的には、熱負荷の大きさに応じてPIDパラメータを調整することで、低熱負荷時と高熱負荷時の両方で最適な応答が得られることが確認された。この適応制御により、温度変動を設定値の $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内に抑えることが可能となり、従来のPID制御と比較して約30%の性能向上が見込まれることが示された。

[0485]

ヘリカルナット冷却システムと代替冷却技術の詳細比較分析を行った結果、ヘリカルナットシステムの最大熱流束は22.8MW/m²、圧力損失は0.42バール/m、ポンプ動力は28.4kWであることが確認された。これに対し、平滑管の最大熱流束は10.2MW/m²、スワール管は16.5MW/m²、ハイパーバポトロンは25.3MW/m²であった。圧力損失は平滑管が0.32バール/m、スワール管が0.58バール/m、ハイパーバポトロンが0.65バール/mであり、ポンプ動力はそれぞれ21.6kW、39.2kW、43.8kWであった。これらの値は、同一の冷却条件(圧力12バール、質量流束2,200kg/m²s、サブクール度35°C)で比較したものである。熱伝達メカニズムの詳細比較から、平滑管では主に対流熱伝達が支配的であるのに対し、ヘリカルナットシステムでは対流熱伝達と核沸騰熱伝達の両方が重要な役割を果たすことが確認された。スワール管では、テーブ状インサートによる旋回流が熱伝達を促進するが、流路断面積の減少により圧力損失が増大することが示された。ハイパーバポトロンでは、複雑なフィン構造により核沸騰が強化され、最も高い熱流束を処理できるが、流路の複雑さにより圧力損失も最大となることが確認された。各冷却技術の性能指標として、熱伝達効率(除去熱流束/ポンプ動力)を計算した結果、ヘリカルナットシステムは0.80MW/kW、平滑管は0.47MW/kW、スワール管は0.42MW/kW、ハイパーバポトロンは0.58MW/kWであり、ヘリカルナットシステムが最も効率的であることが示された。この効率の優位性は、ヘリカルナット構造が熱伝達促進と圧力損失増加のバランスを最適化しているためである。具体的には、ヘリカルナット構造により熱伝達係数が約2.4倍に向上する一方、圧力損失は約1.3倍の増加にとどまり、結果として熱伝達効率が向上する。

[0486]

製造複雑性は、平滑管が低、ヘリカルナットシステムとスワール管が中、ハイパーバポトロンが高と評価された。製造複雑性の評価基準としては、製造工程数、特殊工程の必要性、品質管理の難易度、歩留まりなどを考慮した。平滑管の製造は単純な押し出し加工と切断のみであるのに対し、ヘリカルナットシステムは機械的タッピング加工が追加される。タッピング加工は標準的な工作機械で実施可能であり、特殊な設備や技術を必要としない。タッピング加工の工程能力指数(Cpk)は約1.5であり、これは製造品質のばらつきが十分に小さく、安定した品質の製品が得られることを示している。スワール管は内部にテーブ状インサートを挿入する工程が必要であり、インサートの位置決めと固定に特殊な技術が必要となる。インサート挿入の工程能力指数は約1.2であり、品質のばらつきがやや大きいことが示された。ハイパーバポトロンは複雑なフィン構造を形成するための精密機械加工または電解加工が必要であり、高度な技術と設備が要求される。フィン構造形成の工程能力指数は約1.0であり、品質のばらつきが比較的大きいことが示された。製造コストの詳細分析から、ヘリカルナットシステムの製造コストは平滑管の約1.4倍、スワール管の約0.9倍、ハイパーバポトロンの約0.55倍であることが確認された。これは、ヘリカルナットシステムが平滑管よりもやや高コストであるが、スワール管やハイパーバポトロンと比較すると経済的であることを示している。製造時間の分析からも、ヘリカルナットシステムの製造時間は平滑管の約1.5倍、スワール管の約0.8倍、ハイパーバポトロンの約0.4倍であることが確認された。これは、ヘリカルナットシステムが量産性においても比較的優れていることを示している。熱疲労寿命はいずれも3,000サイクル以上であったが、詳細な疲労解析の結果、平滑管は約3,500サイクル、ヘリカルナットシステムは約3,850サイクル、スワール管は約3,700サイクル、ハイパーバポトロンは約4,100サイクルと予測された。ヘリカルナットシステムの疲労寿命が平滑管よりも長いのは、熱伝達が向上することで温度勾配が緩和され、熱応力が低減するためである。ハイパーバポトロンの疲労寿命が最も長いのは、フィン構造による熱伝達の均一化効果が大きいためである。相対的なコスト評価では、ヘリカルナットシステムを1.0とした場合、平滑管は0.7、スワール管は1.1、ハイパーバポトロンは1.8であった。コスト評価には、材料費、加工費、検査費、組立費などを考慮し、各冷却技術の製造実績に基づいて算出した。材料費の内訳を詳細に分析した結果、ヘリカルナットシステムとスワール管はほぼ同等であり、平滑管は約10%低く、ハイパーバポトロンは約20%高いことが確認された。加工費の差が最も大きく、ヘリカルナットシステムを基準とすると、平滑管は約50%、スワール管は約120%、ハイパーバポトロンは約250%という比率であった。検査費と組立費も同様の傾向を示し、製造複雑性が高いほどコストが増加することが確認された。

[0487]

ヘリカルナット冷却システムは、熱性能、製造性、コスト効率のバランスに優れていることが示された。特に、熱伝達効率（除去熱流束/ポンプ動力）においてヘリカルナットシステムが最も優れており、これは実用的な観点から重要な指標である。熱伝達効率の優位性は、ヘリカルナット構造による熱伝達促進効果と圧力損失増加のバランスが最適化されているためである。具体的には、ヘリカルナット構造により流体に適度な旋回成分が付与され、壁面近傍での流体混合が促進される。この混合効果により、熱伝達係数が大幅に向上する一方、圧力損失の増加は比較的抑えられる。また、ヘリカルナット構造は気泡核生成サイトとしても機能し、核沸騰熱伝達を促進する効果もある。これらの複合的な効果により、高い熱伝達効率が実現される。製造性の観点からも、ヘリカルナットシステムは機械的タッピングという比較的単純な加工方法で製造可能であり、特殊な設備や技術を必要としない。タッピング加工は標準的な工作機械で実施可能であり、加工精度も比較的容易に確保できる。また、タッピング加工は自動化が容易であり、量産性にも優れている。これらの特性により、製造コストの抑制と品質の安定化が図られる。コスト効率の観点からも、ヘリカルナットシステムは平滑管よりもやや高コストであるが、スワール管やハイパーバポロンと比較すると経済的である。特に、ハイパーバポロンは熱性能は優れているものの、製造コストが約1.8倍と大幅に高く、経済性に劣る。核融合炉のような大規模システムでは、コスト効率は極めて重要な要素であり、この点でもヘリカルナットシステムの優位性が示された。ハイパーバポロンはわずかに高い熱流束を処理できるが、製造プロセスがはるかに複雑でポンプ動力も高いことが確認された。ハイパーバポロンの製造複雑性は、内部フィン構造の形成に起因する。フィン構造は通常、精密機械加工、電解加工、または積層造形などの特殊な加工方法で形成される。これらの加工方法は、高度な技術と設備を必要とし、加工時間も長い。また、フィン構造の形状精度と表面粗さの管理も難しく、品質のばらつきが生じやすい。これらの要因により、ハイパーバポロンの製造コストと製造時間が増加し、量産性に劣ることが示された。また、ハイパーバポロンの場合、複雑なフィン構造の製造精度と再現性の確保が課題となり、大量生産に適さない可能性がある。フィン構造の形状や寸法のばらつきは、熱伝達性能にも影響を与えるため、厳格な品質管理が必要となる。これに対し、ヘリカルナットシステムは、機械的タッピングという比較的単純な加工方法で製造可能であり、製造精度と再現性の確保が容易であることが利点として挙げられる。タッピング加工は標準化された工程であり、加工条件（回転速度、送り速度など）を適切に管理することで、安定した品質の製品が得られる。また、タッピング加工は自動化が容易であり、大量生産にも適している。これらの特性により、ヘリカルナットシステムは核融合炉のような大規模システムに適した冷却技術であることが示された。

[0488]

設計の堅牢性を評価するための詳細な感度分析を実施した結果、ヘリカルナット高さの $\pm 0.1\text{mm}$ 変動は熱伝達係数に $\pm 8\%$ の変化をもたらす、管内径の $\pm 0.05\text{mm}$ 変動は圧力損失に $\pm 4\%$ の変化をもたらすことが確認された。ヘリカルナット高さの影響を詳細に分析するために、高さを $0.8\sim 1.2\text{mm}$ の範囲で変化させた場合の熱伝達特性を評価した。その結果、高さが増加するほど熱伝達係数が向上することが確認された。具体的には、高さ 0.8mm での熱伝達係数は約 $38,000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 1.0mm では約 $42,000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 1.2mm では約 $45,000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ と予測された。これは、高さが増加するほど流体の攪拌効果が強まり、熱伝達が促進されるためである。ただし、高さの増加に伴い圧力損失も増加し、高さ 0.8mm での圧力損失は約 0.36 バール/m、 1.0mm では約 0.42 バール/m、 1.2mm では約 0.49 バール/mと予測された。熱伝達係数の増加率（約 $\pm 8\%/\pm 0.1\text{mm}$ ）は圧力損失の増加率（約 $\pm 8\%/\pm 0.1\text{mm}$ ）とほぼ同等であり、熱伝達効率（熱伝達係数/圧力損失）はほぼ一定であることが確認された。これは、ヘリカルナット高さの変動が性能に与える影響は比較的小さく、設計の堅牢性が高いことを示している。管内径の影響も詳細に分析され、内径 $8.4\sim 8.6\text{mm}$ の範囲での変動が評価された。その結果、内径が小さいほど流速が増加し、熱伝達係数が向上することが確認された。具体的には、内径 8.4mm での熱伝達係数は約 $43,500\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 8.5mm では約 $42,000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 8.6mm では約 $40,500\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ と予測された。一方、内径が小さいほど圧力損失も増加し、内径 8.4mm での圧力損失は約 0.44 バール/m、 8.5mm では約 0.42 バール/m、 8.6mm では約 0.40 バール/mと予測された。内径の変動による熱伝達係数の変化率（約 $\pm 3.5\%/\pm 0.05\text{mm}$ ）は、圧力損失の変化率（約 $\pm 4\%/\pm 0.05\text{mm}$ ）とほぼ同等であり、熱伝達効率への影響は小さいことが確認された。これらの製造公差は、一般的な機械加工で達成可能な範囲内であり、特殊な精密加工を必要としないことが確認された。具体的には、タッピング加工の標準的な公差は約 $\pm 0.05\text{mm}$ であり、これは熱伝達係数に約 $\pm 4\%$ の変動をもたらす。この変動は、冷却システムの性能に大きな影響を与えるものではなく、設計の堅牢性を示している。熱応力緩和層厚さの $\pm 0.05\text{mm}$ 変動は界面最大応力に $\pm 12\%$ の変化をもたらすことが示された。この感度は比較的高く、熱応力緩和層の厚さ管理が重要であることを示している。緩和層厚さの影響を詳細に分析するために、純銅層の厚さを $0.25\sim 0.35\text{mm}$ 、OFC層の厚さを $0.15\sim 0.25\text{mm}$ の範囲で変化させた場合の応力分布を評価した。その結果、純銅層が厚いほど応力緩和効果が高まることを確認された。具体的には、純銅層厚さ 0.25mm での界面最大応力は約 255MPa 、 0.3mm では約 235MPa 、 0.35mm では約 220MPa と予測された。これは、純銅層が厚いほど塑性変形による応力吸収能力が高まるためである。一方、OFC層の厚さの影響は比較的小さく、厚さ $0.15\sim 0.25\text{mm}$ の範囲での界面最大応力の変動は約 $\pm 3\%$ にとどまることが確認された。これは、OFC層の主な役割がCuCrZrとの接合性確保であり、応力緩和への寄与は限定的であるためである。この感度分析結果から、純銅層の厚さ管理が特に重要であることが示された。この感度は比較的高いが、スパッタリングと電気めっきの工程管理により、 $\pm 0.02\text{mm}$ 程度の公差で製造可能であることが確認された。スパッタリング工程の厚さ制御精度は、堆積時間と堆積速度の管理により約 $\pm 0.01\text{mm}$ が達成可能であり、電気めっき工程の厚さ制御精度も、電流密度と時間の管理により約 $\pm 0.01\text{mm}$ が達成可能である。これらの工程を組み合わせることで、全体として $\pm 0.02\text{mm}$ 程度の公差が実現可能である。これにより、界面応力の変動は $\pm 5\%$ 程度に抑えられ、構造健全性に対する影響は最小限に抑えられることが示された。

[0489]

運転パラメータの詳細な感度分析から、 ± 1 バールの圧力変動は臨界熱流束に $\pm 6\%$ の変化をもたらす、 $\pm 10\%$ の質量流束変動は熱伝達係数に $\pm 8\%$ の変化をもたらすことが確認された。圧力の影響を詳細に分析するために、 $11\sim 13$ バールの範囲で圧力を変化させた場合の臨界熱流束と熱伝達特性を評価した。その結果、圧力の増加とともに飽和温度が上昇し、同じ入口温度ではサブクール度が増加するため、臨界熱流束が向上することが確認された。具体的には、圧力 11 バールでの臨界熱流束は約 29.6MW/m^2 、 12 バールでは約 31.5MW/m^2 、 13 バールでは約 33.4MW/m^2 と予測された。これは、サブクール度の増加により気泡の凝縮が促進され、伝熱面からの熱除去が効率化されるためである。一方、圧力の変化が熱伝達係数に与える影響は比較的小さく、圧力 $11\sim 13$ バールの範囲での熱伝達係数の変動は約 $\pm 2\%$ にとどまることが確認された。これは、この圧力範囲では流体の物性値（密度、粘度など）の変化が小さく、流動状態にあまり影響を与えないためである。圧力変動の影響は、臨界熱流束に対しては比較的大きいが、通常の熱伝達性能に対しては小さいことが示された。これは、運転圧力の制御精度として ± 0.5 バール程度を確保すれば、熱伝達性能の変動は $\pm 3\%$ 程度に抑えられることを意味している。質量流束の影響を詳細に分析するために、 $1,980\sim 2,420\text{kg/m}^2\text{s}$ （基準値の $\pm 10\%$ ）の範囲で質量流束を変化させた場合の熱伝達特性と圧力損失を評価した。その結果、質量流束の増加とともに熱伝達係数が向上することが確認された。具体的には、質量流束 $1,980\text{kg/m}^2\text{s}$ での熱伝達係数は約 $38,600\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 $2,200\text{kg/m}^2\text{s}$ では約 $42,000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 $2,420\text{kg/m}^2\text{s}$ では約 $45,400\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ と予測された。熱伝達係数の変化率は質量流束の変化率の約 0.8 倍であり、これは乱流熱伝達の理論的予測と一致している。一方、圧力損失は質量流束の約 1.8 乗に比例して増加することが確認された。具体的には、質量流束 $1,980\text{kg/m}^2\text{s}$ での圧力損失は約 0.35 バール/m、 $2,200\text{kg/m}^2\text{s}$ では約 0.42 バール/m、 $2,420\text{kg/m}^2\text{s}$ では約 0.50 バール/mと予測された。これらの変動は、通常の運転条件の変動範囲内であり、冷却システムの性能に対する影響は許容範囲内であることが示された。特に、質量流束の制御精度として $\pm 5\%$ 程度を確保すれば、熱伝達性能の変動は $\pm 4\%$ 程度に抑えられることが確認された。 $\pm 5^\circ\text{C}$ の入口温度変動は最大表面温度に $\pm 4\%$ の変化をもたらすことが示された。入口温度の影響を詳細に分析するために、 $145\sim 155^\circ\text{C}$ の範囲で入口温度を変化させた場合の温度分布と熱伝達特性を評価した。その結果、入口温度が低いほどサブクール度が大きくなり、核沸騰熱伝達が促進されることが確認された。具体的には、入口温度 145°C での熱伝達係数は約 $43,500\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 、 150°C では約 $42,000\text{W}$

$m^2 \cdot K$ 、 $155^\circ C$ では約40,500W/m²・Kと予測された。これは、サブクール度の増加により気泡の凝縮が促進され、核沸騰熱伝達が向上するためである。また、入口温度が低いほど冷却材の平均温度も低下し、タングステン表面温度も低下することが確認された。具体的には、入口温度 $145^\circ C$ でのタングステン最高温度は約 $1,130^\circ C$ 、 $150^\circ C$ では約 $1,180^\circ C$ 、 $155^\circ C$ では約 $1,230^\circ C$ と予測された。この感度は比較的強く、入口温度の制御精度が $\pm 2^\circ C$ 程度であれば、表面温度の変動は $\pm 1.6\%$ 程度に抑えられることが確認された。これは、システムの熱的安定性が高いことを示している。入口温度の制御は、熱交換器の二次側流量を調整することで実現可能であり、一般的な温度制御系で $\pm 2^\circ C$ 程度の精度は容易に達成できる。これらの運転パラメータの感度分析結果から、冷却システムは運転条件の変動に対して比較的堅牢であり、通常の制御精度で安定した性能を発揮できることが確認された。

[0490]

材料特性の不確かさに関する詳細な感度分析から、タングステン熱伝導率の $\pm 10\%$ 変動は最高温度に $\pm 7\%$ の変化をもたらし、CuCrZr降伏強度の $\pm 10\%$ 変動は安全余裕に $\pm 9\%$ の変化をもたらすことが確認された。タングステン熱伝導率の影響を詳細に分析するために、 $156 \sim 190 W/m \cdot K$ (基準値の $\pm 10\%$)の範囲で熱伝導率を変化させた場合の温度分布を評価した。その結果、熱伝導率が高いほど熱拡散が促進され、表面温度が低下することが確認された。具体的には、熱伝導率 $156 W/m \cdot K$ での最高表面温度は約 $1,265^\circ C$ 、 $173 W/m \cdot K$ では約 $1,180^\circ C$ 、 $190 W/m \cdot K$ では約 $1,100^\circ C$ と予測された。これは、熱伝導率が高いほど熱抵抗が低下し、熱流の流れが促進されるためである。熱伝導率の変化率と最高温度の変化率の比は約0.7であり、これは熱伝導率方程式の理論的予測と一致している。タングステンの熱伝導率は、製造方法(焼結条件、密度など)や不純物濃度によって変動する可能性があり、その範囲は約 $\pm 10\%$ 程度と見積もられている。この変動が最高温度に与える影響は比較的大きいが、設計上の安全余裕(再結晶温度 $1,300^\circ C$ に対して約 $120^\circ C$)を考慮すれば、許容範囲内であることが確認された。CuCrZr降伏強度の影響を詳細に分析するために、 $270 \sim 330 MPa$ (基準値の $\pm 10\%$)の範囲で降伏強度を変化させた場合の応力分布と安全余裕を評価した。その結果、降伏強度が高いほど安全余裕が増加することが確認された。具体的には、降伏強度 $270 MPa$ での安全余裕(降伏強度/最大応力)は約1.01、 $300 MPa$ では約1.12、 $330 MPa$ では約1.23と予測された。これは、降伏強度の変化が直接的に安全余裕に影響するためである。CuCrZrの降伏強度は、熱処理条件(溶体化温度、時効温度、時効時間など)によって変動する可能性があり、その範囲は約 $\pm 10\%$ 程度と見積もられている。この変動が安全余裕に与える影響は比較的大きいが、適切な熱処理条件の管理により、降伏強度のばらつきを $\pm 5\%$ 程度に抑えることが可能であることが確認された。これにより、安全余裕の変動も $\pm 4.5\%$ 程度に抑えられ、構造健全性に対する影響は最小限に抑えられることが示された。銅層熱伝導率の $\pm 10\%$ 変動は界面温度に $\pm 5\%$ の変化をもたらすことが示された。銅層の熱伝導率の影響を詳細に分析するために、 $360 \sim 440 W/m \cdot K$ (基準値の $\pm 10\%$)の範囲で熱伝導率を変化させた場合の温度分布を評価した。その結果、熱伝導率が高いほど界面温度が低下することが確認された。具体的には、熱伝導率 $360 W/m \cdot K$ での界面最高温度は約 $315^\circ C$ 、 $400 W/m \cdot K$ では約 $300^\circ C$ 、 $440 W/m \cdot K$ では約 $285^\circ C$ と予測された。これは、熱伝導率が高いほど熱抵抗が低下し、熱流の流れが促進されるためである。熱伝導率の変化率と界面温度の変化率の比は約0.5であり、これは銅層が熱伝導経路の一部を占めるに過ぎないためである。この感度は比較的強く、銅層の熱伝導率のばらつきが界面温度に与える影響は限定的であることが確認された。これは、熱応力緩和層の主要な機能が熱伝導よりも熱膨張差の吸収にあるためである。銅の熱伝導率は、純度や加工状態によって変動する可能性があるが、高純度銅(99.99%以上)を使用し、適切な熱処理を施すことで、熱伝導率のばらつきを $\pm 5\%$ 程度に抑えることが可能であることが確認された。これにより、界面温度の変動も $\pm 2.5\%$ 程度に抑えられ、熱応力に対する影響は最小限に抑えられることが示された。

[0491]

感度分析の総合的な結果から、本設計は製造公差と運転変動に対応するための十分な余裕を持つことが確認された。最も感度の高いパラメータは熱応力緩和層の厚さであり、この部分の製造管理を重点的に行うことで、システム全体の信頼性を確保できることが示された。熱応力緩和層の厚さ管理には、スパッタリングと電気めっきの工程管理が重要であり、特に堆積時間と堆積速度の精密制御が必要である。具体的には、スパッタリング工程では、ターゲット-基板間距離を一定に保ち、スパッタリング電力と時間を精密に制御することで、純銅層の厚さを $\pm 0.01 mm$ 以内の精度で形成できることが確認された。また、電気めっき工程では、電流密度と時間を精密に制御し、めっき浴の組成と温度を一定に保つことで、OFC層の厚さを $\pm 0.01 mm$ 以内の精度で形成できることが確認された。これらの工程管理により、熱応力緩和層全体の厚さを $\pm 0.02 mm$ 以内の精度で形成することが可能であり、これにより界面応力の変動を $\pm 5\%$ 程度に抑えることができる。この変動は、構造健全性に対して十分な安全余裕を持つことが確認された。また、運転パラメータの中では圧力が最も感度の高いパラメータであり、圧力制御の精度を ± 0.5 パーセント程度に維持することで、システムの安定運転が可能であることが確認された。圧力制御には、精密な圧力センサと比例制御弁を用いた自動制御系が必要であり、センサの精度は $\pm 0.1\% F.S.$ (フルスケール)、制御弁の応答性は約0.5秒以内が要求される。これらの要件は、現在の計装技術で十分に達成可能であり、 ± 0.5 パーセント程度の圧力制御精度は実現可能であることが確認された。この制御精度により、臨界熱流束の変動を $\pm 3\%$ 程度に抑えることができ、熱除去性能の安定性が確保される。質量流束の制御精度も重要であり、 $\pm 5\%$ 程度の精度を確保することで、熱伝達性能の変動を $\pm 4\%$ 程度に抑えることができる。質量流束の制御には、精密な流量センサとインバータ制御ポンプを用いた自動制御系が必要であり、センサの精度は $\pm 0.5\% F.S.$ 、ポンプの応答性は約1秒以内が要求される。これらの要件も現在の技術で達成可能であり、 $\pm 5\%$ 程度の流量制御精度は実現可能であることが確認された。入口温度の制御精度としては、 $\pm 2^\circ C$ 程度を確保することで、表面温度の変動を $\pm 1.6\%$ 程度に抑えることができる。入口温度の制御には、精密な温度センサと熱交換器二次側流量制御弁を用いた自動制御系が必要であり、センサの精度は $\pm 0.1^\circ C$ 、制御弁の応答性は約2秒以内が要求される。これらの要件も現在の技術で達成可能であり、 $\pm 2^\circ C$ 程度の温度制御精度は実現可能であることが確認された。これらの制御系を統合した総合制御システムにより、冷却システムの安定運転が可能であることが示された。

[0492]

計算解析に基づく設計最適化の詳細な提案として、以下の点が挙げられる。ヘリカルナット形状については、ピッチ径比を1.5から1.65に増加させることで、熱伝達を5%低減するだけで圧力損失を18%低減できることが示された。これは、ポンプ動力の大幅な削減(約15%)につながり、システム全体の効率向上に寄与する。ピッチ径比の最適化は、流れの旋回強度と圧力損失のバランスを考慮したものであり、ピッチ径比が1.65の場合、旋回流の接線方向速度成分は約3.8m/s(1.5の場合の約90%)となるが、圧力損失係数は約0.34(1.5の場合の約82%)に低減されることが確認された。これは、ピッチが大きくなることで旋回の強制力が若干弱まるものの、流れの方向変化が緩やかになり、形状抵抗が大幅に低減されるためである。ピッチ径比の影響を詳細に分析するために、 $1.3 \sim 1.8$ の範囲でピッチ径比を変化させた場合の熱伝達特性と圧力損失を評価した。その結果、ピッチ径比1.3での熱伝達係数は約 $44,000 W/m^2 \cdot K$ 、圧力損失は約0.52パウル/m、ピッチ径比1.5では熱伝達係数約 $42,000 W/m^2 \cdot K$ 、圧力損失約0.42パウル/m、ピッチ径比1.65では熱伝達係数約 $40,000 W/m^2 \cdot K$ 、圧力損失約0.34パウル/m、ピッチ径比1.8では熱伝達係数約 $38,000 W/m^2 \cdot K$ 、圧力損失約0.30パウル/mと予測された。これらの結果から、ピッチ径比の増加に伴い熱伝達係数は緩やかに低下するが、圧力損失は急速に低下することが確認された。熱伝達効率(熱伝達係数/圧力損失)を計算した結果、ピッチ径比1.3では約 $84,600 W/m^2 \cdot K / (パウル/m)$ 、ピッチ径比1.5では約 $100,000 W/m^2 \cdot K / (パウル/m)$ 、ピッチ径比1.65では約 $117,600 W/m^2 \cdot K / (パウル/m)$ 、ピッチ径比1.8では約 $126,700 W/m^2 \cdot K / (パウル/m)$ となり、ピッチ径比の増加とともに熱伝達効率が向上することが示された。ただし、ピッチ径比が1.8を超えると旋回流が弱まりすぎて熱伝達係数が大幅に低下するため、ピッチ径比1.65~1.7が最適範囲であると判断された。このピッチ径比の最適化は、タップのピッチを変更するだけで実現可能であり、製造プロセスや製造コストに大きな影響を与えないという利点がある。また、ナット断面形状を丸みを帯びた台形に修正することで、流れの剥離を減少させ、熱性能を7%向上させることが可能であることが確認された。具体的には、ナットのエッジ部に半径約0.2mmの丸みを付けることで、エッジ付近での流れの剥離が抑制され、熱伝達が促進されることが示された。流れの剥離は圧力損失の主

要因であるとともに、熱伝達を阻害する要因でもある。エッジ部に丸みを付けることで、流れが表面に沿って滑らかに流れるようになり、剥離領域が縮小する。これにより、圧力損失が約10%低減されるとともに、熱伝達係数が約7%向上することが確認された。断面形状の最適化を詳細に分析するために、エッジ部の丸み半径を0~0.3mmの範囲で変化させた場合の流れ構造と熱伝達特性を評価した。その結果、丸み半径0mmでの熱伝達係数は約42,000W/m²・K、圧力損失は約0.42バル/m、丸み半径0.1mmでは熱伝達係数約43,500W/m²・K、圧力損失約0.40バル/m、丸み半径0.2mmでは熱伝達係数約45,000W/m²・K、圧力損失約0.38バル/m、丸み半径0.3mmでは熱伝達係数約44,000W/m²・K、圧力損失約0.37バル/mと予測された。これらの結果から、丸み半径0.2mm付近で熱伝達効率が最大となることが確認された。この形状修正は、タップの形状を適切に設計することで実現可能であり、製造コストの増加は最小限に抑えられることが確認された。具体的には、標準的なタップの先端角度と切れ刃形状を調整することで、所望の丸みを持つタップ形状を形成できることが示された。これらの最適化により、熱伝達効率が約25%向上し、同じ熱除去性能を維持しながらポンプ動力を約20%削減できることが確認された。

[0493]

熱応力緩和層については、5層構造の傾斜機能材料 (Cu-W) を実装し、総厚さを0.5mmから0.6mmに増加させることで、熱疲労寿命を22%向上させることが可能であることが示された。5層構造の傾斜機能材料では、各層の組成をタングステン:銅=100:0、80:20、60:40、40:60、20:80、0:100と段階的に変化させることで、線膨張係数の変化をより滑らかにし、応力集中をさらに低減できることが確認された。層構成の最適化を詳細に分析するために、3層、5層、7層構造の傾斜機能材料を比較評価した。その結果、3層構造での界面最大応力は約220MPa、5層構造では約195MPa、7層構造では約190MPaと予測された。層数の増加に伴う応力低減効果は徐々に飽和し、5層以上ではわずかな改善にとどまることが確認された。また、各層の厚さ比の最適化も検討され、タングステン側の層を薄く、銅側の層を厚くすることで、応力分布がより均一化されることが示された。具体的には、5層構造の場合、タングステン側から銅側に向かって層厚比を0.15:0.15:0.2:0.2:0.3とすることで、界面最大応力を約185MPaまで低減できることが確認された。これは、タングステン側では線膨張係数の変化が大きいので、層を薄くして変化を緩やかにする効果があるためである。また、総厚さを0.6mmに増加させることで、各層の厚さが約0.1mmから約0.12mmに増加し、層間の応力勾配が緩和されることが示された。厚さの影響を詳細に分析するために、総厚さを0.4~0.7mmの範囲で変化させた場合の応力分布を評価した。その結果、総厚さ0.4mmでの界面最大応力は約210MPa、0.5mmでは約195MPa、0.6mmでは約185MPa、0.7mmでは約180MPaと予測された。厚さの増加に伴う応力低減効果は徐々に飽和し、0.6mm以上ではわずかな改善にとどまることが確認された。一方、厚さが増加すると熱抵抗も増加するため、冷却性能が若干低下する。総厚さ0.6mmでの熱抵抗増加は約5%であり、冷却性能への影響は許容範囲内であることが確認された。この最適化により、界面最大応力は約235MPaから約185MPaに低減され、熱疲労寿命は約3,850サイクルから約4,700サイクルに向上することが予測された。疲労寿命の評価には、修正Coffin-Manson則を用い、塑性ひずみ範囲と疲労寿命の関係を解析した。その結果、界面応力の低減により塑性ひずみ範囲が約0.18%から約0.14%に減少し、これに対応して疲労寿命が約22%向上することが確認された。ただし、傾斜機能材料の製造には粉末冶金法と高温焼結が必要であり、製造コストと複雑性が増加することが課題として挙げられる。製造プロセスの詳細分析から、傾斜機能材料の製造コストは2層構造 (純銅層とOFC層) と比較して約1.8倍高いと見積もられた。また、製造時間も約2.5倍長くなることが予測された。これらのコストと性能のトレードオフを考慮すると、量産性と信頼性を重視する場合は2層構造が現実的な選択肢であり、最高性能を追求する場合は5層構造の傾斜機能材料が推奨されることが示された。

[0494]

冷却パラメータについては、圧力12.5バル、質量流速2,250kg/m²s、サブクール度35°Cで運転することが最適な熱水力性能を得るために推奨された。これらのパラメータは、熱限界と圧力損失のバランスを考慮して最適化されたものである。圧力の最適化を詳細に分析するために、10~15バルの範囲で圧力を変化させた場合の熱限界と熱伝達特性を評価した。その結果、圧力の増加とともに飽和温度が上昇し、同じ入口温度ではサブクール度が増加するため、臨界熱流速が向上することが確認された。具体的には、圧力10バルでの臨界熱流速は約28.5MW/m²、12.5バルでは約32.5MW/m²、15バルでは約36.0MW/m²と予測された。一方、圧力の増加とともに冷却系の設計圧力も高くなり、安全弁や配管系の設計要件が厳しくなる。設計圧力は運転圧力の約1.5倍に設定されるため、運転圧力15バルでは設計圧力が22.5バルとなり、配管や機器の肉厚増加によりコストが増加する。また、圧力が高すぎると、冷却水漏洩時の影響も大きくなる。これらの要因を総合的に評価した結果、圧力12.5バルが最適であると判断された。この圧力では、臨界熱流速が十分に高く (約32.5MW/m²)、設計要件も合理的な範囲内に収まることが確認された。質量流速の最適化も詳細に分析され、2,000~2,500kg/m²sの範囲で質量流速を変化させた場合の熱伝達特性と圧力損失を評価した。その結果、質量流速の増加とともに熱伝達係数が向上することが確認された。具体的には、質量流速2,000kg/m²sでの熱伝達係数は約39,000W/m²・K、2,250kg/m²sでは約43,000W/m²・K、2,500kg/m²sでは約47,000W/m²・Kと予測された。一方、圧力損失は質量流速の約1.8乗に比例して増加することが確認された。具体的には、質量流速2,000kg/m²sでの圧力損失は約0.35バル/m、2,250kg/m²sでは約0.44バル/m、2,500kg/m²sでは約0.53バル/mと予測された。ポンプ動力は流量と圧力損失の積に比例するため、質量流速2,000kg/m²sでのポンプ動力は約23.3kW、2,250kg/m²sでは約32.9kW、2,500kg/m²sでは約44.2kWと予測された。熱伝達性能とポンプ動力のバランスを考慮した結果、質量流速2,250kg/m²sが最適であると判断された。この質量流速では、熱伝達係数が十分に高く、ポンプ動力も許容範囲内であることが確認された。サブクール度の最適化も詳細に分析され、25~45°Cの範囲でサブクール度を変化させた場合の熱限界と熱効率を評価した。その結果、サブクール度の増加とともに臨界熱流速が向上することが確認された。具体的には、サブクール度25°Cでの臨界熱流速は約27.5MW/m²、35°Cでは約32.5MW/m²、45°Cでは約37.0MW/m²と予測された。一方、サブクール度の増加は冷却系の熱効率を低下させる効果もある。熱効率は、回収される熱エネルギーの質 (温度レベル) に依存し、出口温度が高いほど熱効率が上がる。サブクール度が高いほど入口温度が低くなり、出口温度も低下するため、熱効率が低下する。具体的には、サブクール度25°Cでの熱効率は約32%、35°Cでは約30%、45°Cでは約28%と予測された。熱限界と熱効率のバランスを考慮した結果、サブクール度35°Cが最適であると判断された。この条件での飽和温度は約190°Cであり、入口温度155°C (サブクール度35°C) での運転により、出口温度は約185°Cとなることが予測された。この条件での臨界熱流速は約32.5MW/m²、熱伝達係数は約43,000W/m²・K、圧力損失は約0.44バル/mと予測された。これらの値は、熱除去性能とポンプ動力のバランスが最適化された状態を示している。また、これらのパラメータは、核融合炉の運転条件 (特にブランケット冷却系との統合) とも整合性が高く、全体システムの設計簡素化にも寄与することが示された。具体的には、ブランケット冷却系の典型的な運転条件 (圧力15バル、入口温度285°C、出口温度325°C) と比較すると、圧力レベルは異なるものの、温度レベルの差を活用した熱カスケード利用が可能であることが確認された。ダイバート冷却系の出口温度 (約185°C) は、ブランケット冷却系の入口温度 (約285°C) よりも十分に低く、熱交換器を介して熱回収が可能である。

[0495]

モノブロック設計については、長さを12mmから10mmに短縮することで最高温度を8%低減でき、プラズマ対向エッジに小さな面取り (0.5mm、45度) を施すことでエッジ加熱効果を低減できることが示された。モノブロック長さの最適化は、熱伝導経路の短縮と表面積の最適化のバランスを考慮したものである。長さの影響を詳細に分析するために、8~14mmの範囲でモノブロック長さを変化させた場合の温度分布と熱応力を評価した。その結果、長さが短いほど熱伝導経路が短縮され、表面温度が低下することが確認された。具体的には、長さ8mmでの最高表面温度は約1,050°C、10mmでは約1,085°C、12mmでは約1,180°C、14mmでは約1,280°Cと予測された。これは、長さが短いほど熱抵抗が低下し、熱流の流れが促進されるためである。一方、長さが

短すぎると、モノブロック数が増加し、製造コストと接合部数が増加する。また、長さが短いほど熱流の集中も強まり、局所的な熱応力が増加する可能性がある。熱応力の詳細分析から、長さ8mmでの最大von Mises応力は約420MPa、10mmでは約400MPa、12mmでは約385MPa、14mmでは約370MPaと予測された。これは、長さが短いほど温度勾配が急峻になり、熱応力が増加するためである。温度低減効果と熱応力増加のトレードオフを考慮した結果、長さ10mmが最適であると判断された。この長さでは、表面温度が約8%低減され、熱応力の増加は約4%にとどまることが確認された。温度低減による寿命延長効果（約35%）を考慮すると、総合的にはコスト効率が向上することが示された。また、モノブロック数の増加（約20%）による製造コストの増加は、寿命延長によるライフサイクルコストの低減により相殺されることが確認された。エッジ部の面取りの効果も詳細に分析され、面取りサイズと角度の最適化が行われた。その結果、面取りサイズ0.5mm、角度45度が最適であると判断された。この面取りにより、エッジ効果による局所的な温度上昇（約100°C）が緩和され、最高温度が約50°C低減されることが確認された。エッジ効果は、プラズマ入射角が浅い領域での熱負荷集中によるものであり、特にダイバータのストライクポイント付近で顕著である。面取りを施すことで、プラズマの入射角が変化し、熱負荷の集中が緩和される。面取りの形状と寸法の最適化を詳細に分析するために、サイズ0.3～1.0mm、角度30～60度の範囲で面取りパラメータを変化させた場合の温度分布を評価した。その結果、サイズ0.3mm/角度45度での温度低減効果は約30°C、サイズ0.5mm/角度45度では約50°C、サイズ0.7mm/角度45度では約55°C、サイズ1.0mm/角度45度では約60°Cと予測された。また、サイズ0.5mm/角度30度での温度低減効果は約40°C、サイズ0.5mm/角度45度では約50°C、サイズ0.5mm/角度60度では約45°Cと予測された。これらの結果から、サイズ0.5mm、角度45度付近で温度低減効果が最大となることが確認された。面取りが大きすぎると、プラズマ対向面積が減少し、全体の熱負荷が増加するため、適切なサイズの選定が重要である。面取り加工は、放電加工または機械加工により容易に実施可能であり、製造コストへの影響は最小限であることが確認された。

[0496]

システムレベルの改善としては、冗長性を3つの冷却ループ（各ループが定格容量の40%を担当）に増加させ、リアルタイム温度測定に基づいて流量パラメータを調整する適応制御アルゴリズムを実装することが推奨された。冷却ループ構成の最適化を詳細に分析するために、2ループ構成と3ループ構成の比較評価を行った。2ループ構成では、各ループが全体の冷却能力の60%を担うように設計されており、1つのループが故障しても残りのループで定格容量の60%を維持できる。3ループ構成では、各ループが全体の冷却能力の40%を担うように設計されており、1つのループが故障しても残りの2ループで定格容量の80%を維持でき、2つのループが故障しても残りの1ループで定格容量の40%を維持できる。故障時の性能を詳細に分析した結果、2ループ構成で1ループ故障時の最高表面温度は約1,348°C（通常時の約1,180°Cから約14%上昇）、3ループ構成で1ループ故障時の最高表面温度は約1,240°C（約5%上昇）、2ループ故障時の最高表面温度は約1,430°C（約21%上昇）と予測された。これらの温度上昇は、タングステンの融点（約3,400°C）に対して十分な余裕があり、安全性が確保されることが確認された。また、故障検出から安全停止までの時間余裕も評価され、2ループ構成で1ループ故障時の時間余裕は約28秒、3ループ構成で1ループ故障時の時間余裕は約60秒、2ループ故障時の時間余裕は約15秒と予測された。これらの時間余裕は、プラズマ停止操作（約5秒）と安全系の作動（約10秒）に必要な時間を考慮しても十分であることが確認された。信頼性の観点からも3ループ構成の優位性が示された。信頼性解析の結果、2ループ構成での1年間の故障確率は約0.5%、3ループ構成での1年間の故障確率（全ループ故障）は約0.01%と予測された。これは、3ループ構成が2ループ構成と比較して約50倍の信頼性向上をもたらすことを示している。一方、3ループ構成は配管系や制御系が複雑になり、コストが増加する。コスト分析の結果、3ループ構成のコストは2ループ構成と比較して約30%高いと見積もられた。これらの信頼性向上とコスト増加のトレードオフを考慮した結果、核融合炉のような高価値システムでは、信頼性向上の価値がコスト増加を上回るため、3ループ構成が推奨されることが示された。適応制御アルゴリズムは、赤外線カメラによるリアルタイム温度測定と、熱流束分布の推定に基づいて、各冷却ループの流量を最適に分配するものである。アルゴリズムの詳細設計として、カルマンフィルタを用いた状態推定と、モデル予測制御（MPC）を組み合わせたシステムが提案された。カルマンフィルタは、温度測定値と熱伝導モデルを組み合わせて、表面熱流束分布を推定する。この推定には、測定ノイズと過程ノイズのバランスを考慮した最適推定理論が適用される。推定された熱流束分布に基づき、MPCは将来の温度変化を予測し、制約条件（最高温度、圧力損失など）を満たしながら制御入力（各ループの流量）を最適化する。MPCの予測ホライズンは約10秒、制御ホライズンは約5秒、サンプリング時間は約1秒と設定された。これらのパラメータは、システムの応答時間と計算負荷のバランスを考慮して最適化されている。シミュレーションの結果、このアルゴリズムにより、不均一な熱負荷分布（最大/最小比約2:1）に対しても、表面温度の均一性（最大偏差約±8%）を維持できることが確認された。具体的には、標準のPID制御と比較して、温度均一性が約40%向上し、最高温度が約70°C低減されることが示された。また、プラズマ条件の変動に対しても、約2秒以内に最適流量分布に調整できることが確認された。これは、従来の固定流量分配と比較して、熱除去効率が約15%向上し、ポンプ動力が約10%低減されることを意味している。適応制御アルゴリズムの実装には、高速データ処理と制御演算が必要であり、専用のリアルタイム制御システムが推奨された。このシステムは、温度測定系、状態推定系、制御最適化系、アクチュエータ制御系から構成され、全体の応答時間は約1秒以内が要求される。これらの要件は、現在の制御技術で十分に達成可能であることが確認された。

[0497]

計算解析の総合的な結果から、改良型ヘリカルナット冷却システムは、ITERおよびDEMOクラスの核融合炉で予想される極端な熱流束を処理する能力を持つことが確認された。本設計は、最大22.8MW/m²までの効果的な熱除去能力、予想運転寿命全体にわたる構造的健全性、製造公差と運転変動に対する十分な余裕、熱効率・製造性・コストを考慮したバランスの取れた性能を提供することが示された。特に、熱伝達効率（除去熱流束/ポンプ動力）においてヘリカルナットシステムが他の冷却技術と比較して優れており、これは実用的な観点から重要な指標である。熱伝達効率の定量的比較から、ヘリカルナットシステムの効率は0.80MW/kW、平滑管は0.47MW/kW、スワール管は0.42MW/kW、ハイパーバボトロンは0.58MW/kWであり、ヘリカルナットシステムが最も効率的であることが確認された。この優位性は、ヘリカルナット構造が熱伝達促進と圧力損失増加のバランスを最適化しているためである。また、機械的タッピングという比較的単純な加工方法で製造可能であり、製造精度と再現性の確保が容易であることも大きな利点である。製造性の定量的評価から、ヘリカルナットシステムの製造時間は平滑管の約1.5倍、スワール管の約0.8倍、ハイパーバボトロンの約0.4倍であり、比較的短時間で製造可能であることが確認された。また、製造コストも平滑管の約1.4倍、スワール管の約0.9倍、ハイパーバボトロンの約0.55倍と比較的低コストであることが示された。これらの特性により、ヘリカルナットシステムは核融合炉のような大規模システムに適した冷却技術であることが確認された。熱応力緩和層の導入効果も定量的に評価され、直接接合と比較して界面最大応力が約62%低減されることが確認された。これにより、熱サイクルによる接合部の破損リスクが大幅に低減され、設計寿命（3,000サイクル）に対して約28%の余裕を持つことが示された。また、アルミナ絶縁層の性能も評価され、5FPY後も電気抵抗率が10⁻¹²Ω・cm以上を維持し、絶縁性能が確保されることが確認された。これにより、核融合炉の強磁場環境下でも電磁誘導による電流の発生を防止できることが示された。冷却条件の最適化も詳細に行われ、圧力12.5バール、質量流束2,250kg/m²s、サブクール度35°Cという条件が、熱境界と圧力損失のバランスを考慮して最適であることが確認された。この条件での臨界熱流束は約32.5MW/m²であり、設計熱流束（22MW/m²）に対して約48%の安全余裕を持つことが示された。また、冗長設計と適応制御の導入により、信頼性と効率が大幅に向上することが確認された。特に、3ループ構成の冗長設計は、2ループ構成と比較して約50倍の信頼性向上をもたらす、適応制御アルゴリズムは熱除去効率を約15%向上させることが示された。これらの改善により、核融合炉の安全性と経済性が大幅に向上することが確認された。

[0498]

ヘリカルナット冷却システムは、平滑管に比べて大幅な性能向上を実現しつつ、ハイパーバポロンの製造複雑性を回避している。具体的には、平滑管と比較して熱除去能力が約2.2倍向上し、ハイパーバポロンと比較して製造コストが約45%低減されることが示された。これは、ヘリカルナット構造が熱伝達促進と製造容易性のバランスを最適化しているためである。ヘリカルナット構造は、機械的タッピングという標準的な加工方法で形成可能であり、特殊な設備や技術を必要としない。これに対し、ハイパーバポロンの内部フィン構造は、精密機械加工、電解加工、または積層造形などの特殊な加工方法を必要とし、製造コストと時間が増加する。また、ヘリカルナット構造は、流体に適度な旋回成分を付与し、壁面近傍での流体混合を促進することで熱伝達を向上させる。この混合効果により、熱伝達係数が大幅に向上する一方、圧力損失の増加は比較的抑えられる。これに対し、ハイパーバポロンは複雑なフィン構造により核沸騰を強化し、高い熱流束を処理できるが、流路の複雑さにより圧力損失も大幅に増加する。熱伝達と圧力損失のバランスを考慮すると、ヘリカルナットシステムの方が効率的であることが確認された。提案された設計最適化（ピッチ径比の増加、ナット断面形状の修正、熱応力緩和層の最適化、モノブロック長さの短縮、エッジ部の面取り、3ループ冗長構成、適応制御アルゴリズムの実装）により、性能と信頼性をさらに向上させることが可能であり、本冷却システムは次世代核融合炉の実現可能な解決策となることが示された。これらの最適化は、基本設計の変更を最小限に抑えつつ、性能向上を図るものであり、開発リスクとコストを抑制しながら実装可能であることが確認された。具体的には、ピッチ径比の最適化はタップのピッチを変更するだけで実現可能であり、ナット断面形状の修正はタップの形状調整で実現可能である。また、熱応力緩和層の最適化は製造プロセスの調整で実現可能であり、モノブロック設計の最適化も既存の製造技術の範囲内で実現可能である。これらの最適化により、熱除去性能が約7%向上し、熱疲労寿命が約22%延長され、ポンプ動力が約15%低減されることが予測された。また、3ループ冗長構成と適応制御アルゴリズムの導入により、信頼性が約50倍向上し、熱除去効率が約15%向上することが示された。これらの改善は、核融合炉の運転コストと安全性に大きく寄与し、実用化に向けた重要なステップとなることが確認された。

[0499]

本解析のために開発された統合マルチフィジックス計算フレームワークは、熱水力、構造力学、中性子工学、システム応答の各物理領域を高精度に結合し、核融合炉環境下での冷却システムの挙動を包括的に予測することを可能にした。このフレームワークは、今後の設計反復と様々な運転シナリオ下での性能予測のための有用なツールとなる。特に、熱水力モデルと構造解析モデルの双方向結合により、流体-構造相互作用を考慮した現実的なシミュレーションが可能となり、設計の信頼性向上に大きく貢献することが示された。この双方向結合では、流体解析で得られた熱伝達係数と冷却材温度を構造解析の境界条件として与え、構造解析で得られた変形形状を流体解析の境界条件として与えるという反復計算を行う。これにより、熱変形による流路形状の変化が熱伝達特性に与える影響や、熱伝達特性の変化が温度分布と熱応力に与える影響を正確に評価することが可能となる。また、中性子輸送解析と材料特性変化モデルの統合により、長期運転における材料劣化の影響を定量的に評価することが可能となり、寿命予測の精度向上に寄与することが確認された。この統合では、中性子輸送解析で得られた照射損傷分布と核変換分布を材料特性変化モデルの入力として与え、材料特性（降伏強度、熱伝導率、延性など）の経時変化を予測する。これにより、照射環境下での材料挙動を考慮した長期信頼性評価が可能となる。さらに、システムレベルの応答解析と制御系モデルの統合により、異常事象時の挙動予測と安全対策の評価が可能となり、安全設計の最適化に貢献することが示された。この統合では、詳細な熱水力・構造解析の結果を簡略化したシステムモデルに反映し、様々な運転シナリオや異常事象に対するシステム全体の応答を高速に評価することが可能となる。これにより、制御系の設計や安全対策の有効性評価を効率的に行うことができる。このフレームワークは、核融合炉だけでなく、高熱流束機器全般（高出力レーザー装置、宇宙機器の熱制御系、高出力電子機器の冷却系など）の設計・評価にも応用可能であり、広範な工学分野に貢献することが期待される。

8. 産業上の利用可能性

[0500]

本発明は、核融合炉のダイバータ冷却システムとして利用可能である。特に、ITER、DEMO、JT-60SAなどの核融合実験炉や将来の商用核融合炉に適用することができる。また、本発明の技術は、核融合炉以外の高熱流束機器（例えば、高出力レーザー装置の冷却系、宇宙機器の熱制御系、高出力電子機器の冷却系など）にも応用可能である。

[0501]

核融合炉ダイバータ冷却への応用としては、ITERのダイバータ冷却システムの改良、DEMOのダイバータ冷却システムの設計、JT-60SAのダイバータ冷却システムの高性能化などが考えられる。特に、DEMOでは、ダイバータの熱流束が最大20MW/m²に達すると予想されており、本発明の高性能冷却システムが不可欠となる。

[0502]

高出力レーザー装置への応用としては、レーザーターゲットチャンバーの冷却、レーザー増幅器の冷却、レーザーミラーの冷却などが考えられる。これらの機器も高熱流束環境下で使用されるため、本発明の冷却技術が有効である。

[0503]

宇宙機器への応用としては、人工衛星の熱制御系、宇宙ステーションの熱制御系、惑星探査機の熱制御系などが考えられる。宇宙環境では、熱の放射による排熱が主となるため、効率的な熱輸送システムが重要である。本発明の冷却技術は、宇宙機器の熱輸送システムの高性能化に貢献できる。

[0504]

高出力電子機器への応用としては、高性能コンピュータの冷却、電力変換装置の冷却、高周波機器の冷却などが考えられる。これらの機器も発熱密度が高く、効率的な冷却が求められるため、本発明の冷却技術が有効である。