

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2009-25307  
(P2009-25307A)

(43) 公開日 平成21年2月5日(2009.2.5)

(51) Int.Cl.  
G 2 1 C 3/06 (2006.01)

F I  
G 2 1 C 3/06 B

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2008-186866 (P2008-186866)  
(22) 出願日 平成20年7月18日 (2008.7.18)  
(31) 優先権主張番号 11/780, 537  
(32) 優先日 平成19年7月20日 (2007.7.20)  
(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 390041542  
ゼネラル・エレクトリック・カンパニー  
GENERAL ELECTRIC CO  
MPANY  
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネ  
クタデイ、リバーロード、1番  
(74) 代理人 100093908  
弁理士 松本 研一  
(74) 代理人 100105588  
弁理士 小倉 博  
(74) 代理人 100129779  
弁理士 黒川 俊久  
(74) 代理人 100137545  
弁理士 荒川 聡志

最終頁に続く

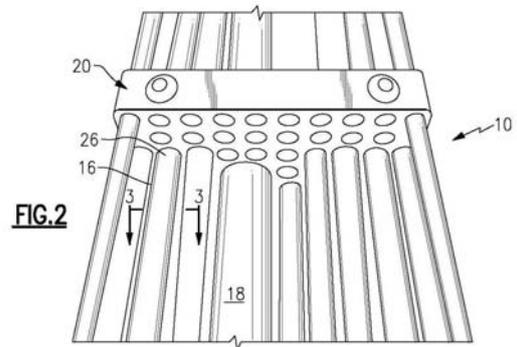
(54) 【発明の名称】 磨耗防止コーティングを備える燃料棒

(57) 【要約】

【課題】 磨耗防止コーティング(26)を有するクラッド管(22)を備える燃料棒(16)を提供すること。

【解決手段】 一実施形態では、コーティング(26)は、熱溶射処理を施してクラッド管(22)の外側表面に当てがわれる金属パウダー材料(28)で作られる。別の実施形態では、コーティング(26)は、金属パウダー材料(30)、および、セラミックパウダー材料またはクラッド管(22)を被覆するために金属パウダー材料(30)と同時に当てがわれる金属酸化物硬質相パウダー材料(32)で作られる混合物である。コーティング(26)は、燃料棒(16)においてデブリが燃料棒(16)を侵食しやすい選択された領域に当てがわれることができる。

【選択図】 図2



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

クラッド管(22)と、

前記クラッド管(22)の外面に接合される硬い金属材料(28)であって、NiCrAlY、NiCr、FeCrAlY、FeCrまたはこれらの任意の組合せからなる群から選択される硬い金属材料(28)と、を含む燃料棒(16)。

## 【請求項 2】

クラッド管(22)と、

金属マトリックス(30)とセラミック材料または金属酸化物硬質相材料(32)との混合物(26)であって、前記金属マトリックス(30)が、前記セラミック材料または前記金属酸化物硬質相材料(32)を前記クラッド管(22)に接合する結合剤として機能する、混合物(26)と、を含む燃料棒(16)。

10

## 【請求項 3】

前記金属マトリックス(30)が、NiCrAlY、NiCr、FeCrAlY、FeCrまたはこれらの任意の組合せからなる群から選択されることを特徴とする請求項 2 記載の燃料棒。

## 【請求項 4】

前記セラミック材料または金属酸化物硬質相材料(32)が、ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>またはこれらの任意の組合せからなる群から選択されることを特徴とする請求項 2 記載の燃料棒。

20

## 【請求項 5】

燃料棒(16)のフレッチング磨耗特性を向上させる方法であって、磨耗防止コーティング(26)を形成するためにNiCrAlY、NiCr、FeCrAlY、FeCrまたはこれらの任意の組合せからなる群から選択される硬い金属パウダー材料(28)をクラッド管(22)の外面に溶射するステップを含む、方法。

## 【請求項 6】

前記硬い金属パウダー材料(28)を、高速酸素燃料(Hyper-Velocity-Oxy-Fuel(HVOF))熱溶射処理、高速空気燃料(Hyper-Velocity-Air-Fuel(HVAF))熱溶射処理、またはこれらの任意の組合せの処理に、適用することを特徴とする請求項 5 記載の方法。

30

## 【請求項 7】

前記硬い金属パウダー材料(30)と同時にセラミックパウダー材料(32)を前記クラッド管の外面にプラズマ溶射するステップであって、前記硬い金属パウダー材料(30)が、前記セラミックパウダー材料(32)を前記クラッド管(22)の外面に接合する結合剤として機能する、ステップをさらに含むことを特徴とする請求項 5 記載の方法。

## 【請求項 8】

前記硬い金属パウダー材料(30)と同時に金属酸化物硬質相パウダー材料(32)を前記クラッド管の外面に高温溶射するステップであって、前記硬い金属パウダー材料(30)が、前記金属酸化物硬質相材料(32)を前記クラッド管(22)の外面に接合する結合剤として機能する、ステップをさらに含むことを特徴とする請求項 5 記載の方法。

40

## 【請求項 9】

燃料棒(16)のフレッチング磨耗特性を向上させる方法において、

金属マトリックス(30)を形成するために金属パウダー材料(28)をクラッド管(22)の外面に溶射するステップと、

前記金属材料と同時にサーメットパウダー材料(32)をクラッド管(22)の外面に溶射するステップであって、前記金属材料(28)で形成される前記金属マトリックス(30)が、磨耗防止コーティング(26)を形成するために、前記サーメット材料(32)を前記クラッド管(22)の外面に接合する結合剤として機能する、ステップと、を含む方法であって、

50

前記金属パウダー材料(28)が、高速酸素燃料(Hyper-Velocity-Oxy-Fuel(HVOF))処理、または高速空気燃料(Hyper-Velocity-Air-Fuel(HVAF))処理、またはこれらの任意の組合せの処理、に適用されて溶射され、

前記サーメットパウダー材料(32)が、高速酸素燃料(Hyper-Velocity-Oxy-Fuel(HVOF))処理、または高速空気燃料(Hyper-Velocity-Air-Fuel(HVAF))処理、または空気プラズマ熱溶射処理、またはこれらの任意の組合せの処理、に適用されて溶射される、ことを特徴とする方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本発明は、概して原子炉用の燃料要素に関し、より詳細には、横方向での補強と間隔とを設けるため、そして燃料要素を固定位置に維持するために、その燃料要素の長手方向に沿った所定の距離(複数可)位置に通常配置される補強材、スペーサまたは支持格子に関する。

【背景技術】

【0002】

沸騰水型原子炉は長年にわたり作動する。このような原子炉は、その建設時に始まりさらにその耐用年数を通して、その閉鎖循環型の減速材システム内にデブリが蓄積することがある。このデブリは、燃料バンドル(熱を発生させる燃料棒を有する炉心領域を含む)に侵入し得る場合には、その稼動に対する脅威になり得る。この問題を理解するために、炉心内でのデブリの蓄積に関連して、始めに、原子炉建設の概要を示す必要がある。その次に、燃料バンドルの建設を示そう。ここでは、燃料バンドル内での圧力降下領域が実質的に変化しないように維持することの必要性に重点を置く。その次に、デブリが燃料バンドルの燃料棒領域に侵入することによる影響を概説する。

20

【0003】

デブリ混入問題への理解のために、沸騰水型原子炉の建設を簡単に概説する。このような原子炉は大型の炉心を中央に備えている。液体水の冷却媒体/減速材の流れが底部から炉心に入り、上部から水蒸気混合物として炉心を出る。

【0004】

30

炉心は並列する多数の燃料バンドルを含む。水が、炉心の下に配置された高圧プレナムから燃料バンドル支持体キャスティングを通して各燃料バンドルへ導入される。水は分散した流れとなって個々の燃料バンドルを通過し、加熱されて蒸気を発生させ、水蒸気の二層状の混合体として炉心の上側部分から出る。その二層状の混合体から蒸気がエネルギーを発生させるために取り出される。

【0005】

炉心支持体キャスティングおよび燃料バンドルが、炉心を通る水の循環に対する圧力損失の原因となる。この圧力損失により、炉心にある個々の燃料バンドルを通る流れの、燃料バンドル全域にわたる実質的に均等な分散が保証される。炉心内に750もの個別の燃料バンドルが存在することを考えると、流れ分布の均等性を保証することが重要であると認識できる。燃料バンドル内での圧力降下が妨げられることにより、冷却媒体/減速材流の炉心の燃料バンドル内での全域にわたる分散に影響を与える可能性がでてくる。

40

【0006】

少なくとも沸騰水型原子炉の建設について記載しておくことが妥当であることから、次に、燃料バンドル自体の建設に着目する。

【0007】

沸騰水型原子炉用の燃料バンドルは、燃料棒を支持する下部タイプレートアッセンブリを有しており、このアッセンブリ内の下部タイプレートは鋳造構造体である。下部タイプレートアッセンブリは、入口ノズルを覆っている下向きに突出したベイルをその最下位置に有する。この入口ノズルは、下部タイプレート内の増大した流量に対する入口を

50

有する。燃料棒を支持するグリッドが流量の上端に配置されている。流量は支持グリッドとノズルとの間に画定される。

【0008】

燃料棒を支持するグリッドには2つの用途がある。第1に、燃料棒を支持するグリッドは、個々の燃料棒の重量を下部タイプレート全体を通して燃料支持体キャストイングへ伝達するための、機械的支持体伝達部を形成する。第2に、燃料棒を支持するグリッドは、液体水冷却媒体が、並列して支持される燃料棒の間を流れて燃料バンドル内へ流れる流路を形成する。

【0009】

各燃料バンドルは、下部タイプレートの上に、直立した複数の燃料棒をマトリックス状配置で有する。これらの燃料棒は、核反応を受けて発電用の蒸気を生成する核分裂物質をそれぞれが含んでいる密封された管である。この直立した燃料棒のマトリックスの上端部には、いわゆる上部タイプレートが配置される。上部タイプレートは、燃料棒の少なくともいくつかを垂直に並列した配列で保持する。燃料棒のいくつかは上部および下部タイプレートの両方に取り付けられる。上部タイプレートと下部タイプレートとの間には、通常、燃料に対する水減速材の比を、特に上部位置にある燃料バンドルの最大ボイド率領域において改善するために、ウォータロッドまたは同等の装置が設けられている。

【0010】

燃料バンドルはまた、燃料バンドルの長手方向に沿って、様々な高さで約7つの燃料棒スペーサを有する。これらのスペーサは、燃料棒が長くして(約406cm(約160インチ))さらに細い(直径約10.2mmから12.7mm)(約0.4から0.5インチ)ことから必要であり、流体流と燃料バンドル内での原子力発電の力学的作用のもとで接触するようになり得る。スペーサは、各燃料棒に対してそれらの個々の高さにおいて適切な拘束作用をもたらし、それにより、燃料棒間での磨耗を起こさせるような接触を防止し、さらに、燃料バンドルの長手方向に沿って互いに対して最適な効率のために均等な間隔で燃料棒を維持する。後で説明するように、これらのスペーサは、デブリが溜まって燃料棒に損傷を与える可能性がある部位である。

【0011】

各燃料バンドルはチャンネルで囲まれている。このチャンネルにより、タイプレート間を流れる水が、タイプレート間の隔離された流路内の1つのバンドルのみに限定されるようになる。このチャンネルはまた、燃料バンドルを通る蒸気発生流路を炉心を囲んでいるバイパス領域から分離する役割をもつ。このバイパス領域は制御棒を貫通させるのに利用される。また、バイパス領域内の水は中性子減速を実現する。

【0012】

沸騰水型原子炉の運転では、最初に設計された流れ分布を維持することが重要であることを理解することが肝心である。具体的には、燃料バンドルの上部タイプレートを通る蒸気と水の混合物が炉心への下側(高圧)プレナム入口から炉心の出口まで流れる場合において、典型的には100%出力/100%流量の運転条件で、約20ポンド毎平方インチ(psi)の圧力降下が起こる。この圧力降下のうちの約7から8psiは燃料支持体キャストイングで起こる。この圧力降下は、主として、原子炉を構成している多数の燃料バンドルを通る冷却媒体/減速材の流れの均等な分布を保証するためのものであり、原子炉のある出力率における原子炉内での運転の不安定さを防止することに関連する。各燃料バンドルの下部タイプレートでは、流量内への入口ノズルからさらに燃料棒を支持するグリッドを通じて、約1から約1と1/2psiの圧力降下が起こり、これは、各燃料バンドルの個別の燃料棒間の流れ分布を定めることに寄与する。最後に、燃料バンドル自体を通してさらに下側支持グリッドから上側タイプレートにある出口までにおいて、通常約11psiの圧力降下が起こる。

【0013】

沸騰水型原子炉の建設および運転について概説したが、ここで、原子炉の閉鎖循環型減速材システムに存在するデブリの問題について理解されたい。典型的に、沸騰水型原子炉

10

20

30

40

50

内のデブリは、原子炉の建設時から残っている外部物質を含む場合がある。さらに、原子炉の耐用年数の間における腐食もデブリを解放する。最後に、原子炉の幾度もの供給停止および修理の期間に、デブリがさらに入り込む可能性がある。これらのことから、原子炉が、年数が経過するに従って本質的にデブリを蓄積する閉鎖循環型のシステムを構成していることが理解されよう。

【0014】

デブリが蓄積することが特に問題を引き起こし、また、デブリが蓄積することが普通であるような場所は、燃料棒の間の燃料バンドルの特に燃料棒スペーサの近傍であることが分かっている。各燃料棒はスペーサの特定の高さにおいてスペーサによって囲まれていることを考慮されたい。デブリ粒子はスペーサ構造体と燃料棒との間に溜まりやすく、しばしば、燃料棒の密封されたクラディング材料と接触してそれを磨耗させながら冷却媒体/減速材の流れと共に動的に振動する。流れにより誘発される原子炉内でのこのような振動により、燃料棒のクラディング材料のフレッチングさらには最終的には破壊ならびに/または破断が起こる場合がある。クラディング材料の破断は、破断の前に燃料棒内に蓄積して密封された核分裂気体の望ましくない放出を招く可能性がある。クラディング材料の破断により十分な核分裂気体が放出された場合、プラントの停止が必要になる場合がある。

10

【0015】

現代の原子炉プラントは、デブリにより燃料棒に穴が開くなどの予想される運転事故を防止するように設計された余剰かつ多数の安全システムを有していることを理解されたい。このような故障は安全上の問題ではない。しかし、このような故障により、ほとんど全ての場合において、プラントが最適効率より低い効率で運転されることになる。したがって、燃料棒へ損傷を与えるデブリの発生率を低下させることが高く望まれる。

20

【特許文献1】米国特許第6033493号

【特許文献2】米国特許第5227129号

【特許文献3】米国特許第5265137号

【特許文献4】米国特許第5268946号

【特許文献5】米国特許第5434896号

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

30

【0016】

簡単には、本発明の一態様は、クラッド管とクラッド管の外面に接合された硬い金属材料とを有する燃料棒にあり、硬い金属材料は、NiCrAlY、NiCr、FeCrAlY、FeCrまたはこれらの任意の組合せからなる群から選択される。

【0017】

本発明の別に態様は、クラッド管と、金属マトリックスとセラミック材料または金属酸化物硬質相材料との混合物とを有する燃料棒にあり、この金属マトリックスは、セラミック材料または金属酸化物硬質相材料をクラッド管に接合する結合剤として機能する。

【0018】

本発明の別の態様では、燃料棒のフレッチング磨耗特性を向上させる方法が、約25ミクロンから約175ミクロンの間の厚さを有する磨耗防止コーティングを形成するためにNiCrAlY、NiCr、FeCrAlY、FeCrまたはこれらの任意の組合せからなる群から選択される硬い金属パウダー材料をクラッド管の外面に溶射するステップを含む。

40

【0019】

本発明の別の態様では、燃料棒のフレッチング磨耗特性を向上させる方法が、金属マトリックスを形成するために金属パウダー材料をクラッド管の外面に溶射するステップと、

金属材料と同時にサーメットパウダー材料をクラッド管の外面に溶射するステップであって、金属材料によって形成された金属マトリックスが、磨耗防止コーティングを形成す

50

るためにサーメット材料をクラッド管の外面に接合するための結合剤として機能する、ステップと、を含む。

【発明を実施するための最良の形態】

【0020】

本発明のこれらのおよび他の特徴、態様および利点は、複数の図面を通して同様の記号は同様の部品を示す添付図面を参照しながら以下の詳細な説明を読むことにより、よりよく理解されるであろう。

【0021】

図1を参照すると、燃料バンドルアッセンブリーが、概して参照符号10で示されている。燃料集合体10は、本発明の複数の燃料棒16の両端部を保持している上部タイプレート12および下部タイプレート14を含む。BWRアッセンブリーの場合、集合体10は1つまたは複数のウォータロッド18を含んでよい。複数のスペーサグリッド20が、燃料棒16の長手方向に沿ってタイプレート12および14の間の位置に配置される。BWRアッセンブリーの場合、集合体10は、燃料棒16を囲むチャンネル構造体19およびスペーサグリッド20を含んでよい。

【0022】

下部タイプレート14の下方から供給される冷却媒体は、上述したタイプのデブリを保持している場合がある。冷却媒体(水)が上方向に流れるとき、デブリの一部を遮断してさらに下部タイプレート14の下方に落下させることができる。しかし、一部のデブリは燃料棒16の外側表面上にならびにスペーサグリッド20上に衝突することができ、BWRアッセンブリーの場合、チャンネル構造体22を特にその下端部において囲む。燃料集合体がデブリ捕捉装置またはスクリーンを有していない場合、さらに大量のデブリが、燃料棒16の外側表面上、スペーサグリッド20上、および、燃料集合体10内の他の構成要素上に衝突すると予想される。デブリ粒子は放射線照射によりしばしば硬化し、矢印で示した方向に水が流れるときに燃料棒16の外側に急速に侵食することが知られている。

【0023】

図2および3を参照すると、燃料棒16は、例えばUO<sub>2</sub>などの核分裂物質の燃料ペレット24を含んでいるジルコニウム合金クラッド管またはクラッド管22を有する。クラッド管22は、一般に、ジルコニウム-2、ジルコニウム-4などのジルコニウム-すず合金で作られる。

【0024】

一実施形態によると、磨耗防止コーティング26は、クラッド管22の外側表面32のフレッチングが起こると予想される1つまたは複数の領域またはゾーンに当てがわれる。フレッチングが起こると予想される1つの領域は、スペーサグリッドまたはスペーサ20の近傍である。コーティング26の相対的な寸法を説明のために図3において強調した。

【0025】

次に図4および5を参照すると、磨耗防止コーティング26の種々の実施形態の顕微鏡写真が示されている。図4に示した実施形態では、コーティング26は、約25ミクロンから約175ミクロンの間の厚さを有する、NiCrAlY、NiCr、FeCrAlY、FeCrまたはこれらの任意の組合せなどの硬い金属材料28を含む。

【0026】

図5の、磨耗防止コーティング26の別の実施形態では、コーティング26は、金属マトリックス材料とセラミック(と/若しくは金属酸化物)との組合せを含む。例えば、金属とセラミック材料の混合物は、金属マトリックス30(顕微鏡写真の明るい相)およびセラミック材料または金属酸化物硬質相材料32(顕微鏡写真の暗い相)を含んでよい。金属マトリックス30は、特に、耐食性、韌性および密着性をもたらす。一方セラミック材料または金属酸化物硬質相材料32は、混合物コーティング26に、特に、付加的な硬度および耐磨耗性をもたらす。図5に示す混合物コーティング26の図示した実施形態では、金属コーティングまたは金属マトリックス30は、NiCrAlY、NiCr、Fe

10

20

30

40

50

CrAlY、FeCrなどを含み、セラミック材料または金属酸化物硬質相材料32は、 $ZrO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Cr_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、 $Cr_3C_2$ およびこれらの任意の組合せなどを含む。図示した実施形態では、コーティング26は約25ミクロンから約175ミクロンの間の厚さを有する。

#### 【0027】

<方法>

一般に、磨耗防止コーティング26は、様々なタイプの熱溶射処理を用いてクラッド管に適用可能であるが、これらの熱溶射処理はその処理に当てがわれる材料に応じて変わる。

#### 【0028】

例えば、コーティングが図4に示した単一の硬い金属層を含む場合では、硬い金属材料を、溶射ガンに、単一の硬い金属層の生成ための特有のパラメータを用いて適用することができる。具体的には、図4に示す単一の硬い金属材料28を有するコーティング26の実施形態では、そのような金属材料は熱溶射処理を用いて適用可能である。このような溶射処理には、その金属粒子をクラディング材料に付着させて互いに固着させコーティングを形成するのに十分な温度と運動エネルギー提供できる、たとえば、高速酸素燃料(Hyper-Velocity-Oxy-Fuel(HVOF))、高速空気燃料(Hyper-Velocity-Air-Fuel(HVAF))、またはこれらの任意の組合せなどでよい。例えば、HVOF処理での温度は約3000Kであり、平均サイズが約5ミクロンから約35ミクロンである金属粒子では平均粒子速度が約450m/sであった。

#### 【0029】

HVOF(高速酸素燃料(High Velocity Oxygen Fuel))熱溶射処理では、高速溶射を実現するために異なる方法を採用する複数のHVOFガンが用いられる。1つの方法は、基本的には、高圧水冷却型HVOF燃焼チャンバおよび長尺ノズルである。燃料(灯油、アセチレン、プロピレンおよび水素)ならびに酸素がチャンバ内に送られる。燃焼により高温高圧火炎が生成され、この火炎は、ノズル速度の増加と共に押し下げられる。パウダーは、高圧下で軸方向に沿ってHVOF燃焼チャンバ内に送るようにしても、あるいは、圧力が低いラバルタイプノズルの側面を通して供給するようにしてよい。別の方法は、高圧燃焼ノズルとエアキャップからなるより単純なシステムを使用することである。燃料ガス(プロパン、プロピレンまたは水素)と酸素を高圧で供給すると、ノズルの外側ではあるが、圧縮空気が供給されるエアキャップの内側で燃焼が起こる。圧縮空気は、炎を、圧迫し且つ促進させて、HVOFガンに対しては冷却媒体として機能する。パウダーは高圧下でノズルの中央から軸方向に沿って送られる。

#### 【0030】

図5に示した磨耗防止コーティング26の別の実施形態では、所望のサーメットコーティング26を生成するであろうと考えられる、異なる熱溶射処理または手法が存在する。図5に示す混合物サーメットコーティング26を生成するための一手法は、図4に示した単一層金属コーティング26より硬くさらに磨耗をより防止することができるもので、金属と、セラミック(と/または金属酸化物材料と)とを含むパウダーを、この特定のパウダーに合わせて最適化された同様の熱溶射処理に注入することである。図5に示す混合物コーティング26を生成するための別の手法は、金属パウダー材料に合わせて最適化された熱溶射処理と、セラミック(および/または酸化物パウダー材料と)に合わせて最適化された別の熱溶射処理とを施して金属パウダー材料を同時に注入することである。

#### 【0031】

例えば、混合物コーティング26は、金属パウダー材料に合わせた独立した熱溶射処理を、セラミックパウダー材料(および/または金属酸化物硬質相パウダー材料と)に合わせた別のタイプの熱溶射処理と、同時に使用することによって生成させることができる。この2つの異なる処理は、クラディング材料表面の同一の位置に向けられており、クラディング材料に衝突するときに、溶融した金属とセラミックまたは金属酸化物とが混合

10

20

30

40

50

する。このように、図5に示したタイプのコーティング構造体などの所望のコーティング構造体を生成するために、各熱溶射処理を、金属パウダー材料と、セラミックパウダー材料（および/または金属酸化物硬質相パウダー材料と）とに合わせて最適化することができる。

#### 【0032】

金属パウダー材料を用いることができる熱溶射処理はHVOF、HVAFなどであり、これらは、高温の火炎内にいる間における粒子の酸化を最小にするが、高密度のコーティングを形成するためにクラディング材料の表面上に衝突するのに十分なエネルギーを有する。金属酸化物を溶融するためには、さらに高い温度を有する空気プラズマ溶射などの熱溶射処理を使用する必要がある。サーメットパウダーがカーバイドと共に使用される場合、カーバイドを溶融または過熱しないことが好ましい。カーバイドを過熱すると、望ましくないカーバイドの分解の原因となる。したがって、HVOF処理およびHVAF処理などでは、カーバイドおよびサーメットパウダー内の金属材料が高温の火炎内にあるときに、カーバイドの分解およびサーメットパウダー内の金属材料の酸化を最小にするのが好ましい。

10

#### 【0033】

金属酸化物硬質相パウダー材料に使用されるプラズマ熱溶射処理は、基本的には、コーティングを形成するために溶融されたあるいは熱により軟化した材料を表面上に溶射することである。パウダー形態の材料が非常に高温のプラズマ炎に注入され、そこで急速に過熱されて高速まで加速される。例えば、プラズマトーチの火炎温度は約15000Kであってよい。高温の材料が基板表面上に衝突し、急速に冷却されてコーティングを形成する。正確に実行されるこのプラズマ熱溶射処理は、基板材料の損傷、冶金学的変化および変形を回避するために処理の間の基板温度を低温に維持することができることから、「冷間処理」（コーティングされる基板材料に関して）と呼ぶことができる。

20

#### 【0034】

プラズマ溶射ガンは銅アノードおよびタングステンカソードを有しており、これらは両方とも水冷却型であり、プラズマガス（アルゴン、窒素、水素、ヘリウム）がカソードの周りをならびに圧縮ノズルとして形づくられたアノードを通して流れる。プラズマは、カソードとアノードとの間に局所的な電離を引き起こしさらにDCアークのための伝導経路を形成させる高圧放電によって点火される。アークからの抵抗加熱により、ガスが極限温度に達し、解離して、プラズマを形成するためにイオン化する。プラズマは、コーティングされる表面にまでアークが及ぶプラズマ移行アークコーティング処理とは全く異なり、自由または中性プラズマ炎（電流を伝えないプラズマ）としてアノードノズルから出る。溶射に備えてプラズマが安定化されたとき、電気アークは、アノードノズルの最接近端部にショートするのではなく、降下してノズルまで達する。アークのこの伸びは熱ピンチ効果に起因する。水冷却型アノードノズルの表面周りの非導電性冷却ガスが、プラズマアークを圧迫してプラズマアークの温度および速度を増大させる。パウダーは、最も一般的にはアノードノズル出口の近傍に取り付けられた外側パウダーポートを介してプラズマ炎内に送られる。パウダーは、溶射距離が約25mmから約150mm（約0.984インチから約5.906インチ）程度になるような迅速さで加熱されて加速される。

30

40

#### 【0035】

図5に示すように、金属パウダー材料と、セラミックパウダー材料（および/または金属酸化物硬質相材料と）とを同時にクラッド管22の外側に当てがうことにより、クラッド管22の外側上に形成される磨耗防止コーティング26は、主として、セラミック材料または金属酸化物硬質相材料32をクラッド管22に接合するのに十分な量の金属マトリックス30を有するサーメット混合物となる。一実施形態では、混合物コーティング26の厚さは、好ましくは約0.127mm（約0.005インチ）より小さく、より好ましくは約0.025mmと0.125mmと（約0.00098インチと約0.00492インチと）の間である。比較的厚いコーティングは、場合によっては、クラッド管周りの冷却水の流れを妨げる可能性があることが分かった。さらに、厚いコーティングは、熱バ

50

リアとして望ましくない働きをする可能性がある。

【0036】

別法として、金属パウダー材料、セラミックパウダー材料および/または金属酸化物硬質相パウダー材料は、溶融したセラミック材料または金属酸化物硬質相材料32をクラッド管22に接合させるのに十分な金属マトリックス30ができるような比率で予混合されてよい。混合物コーティング26に加えられるセラミックパウダー材料または金属酸化物硬質相パウダー材料のサイズおよび割合は、フレッチングを引き起こすデブリの予想されるサイズによって決まり、フレッチング磨耗抵抗性と衝撃抵抗性との間で妥協される。特定の用途においてセラミックパウダー材料または金属酸化物硬質相パウダー材料を過剰に加えると、混合物コーティング26が、フレッチング磨耗ではなく動的な衝撃により破損する可能性がある。

10

【実施例1】

【0037】

図4に示したタイプに類似の磨耗防止コーティング26の一形態において、NiCrAlYを含む金属パウダー材料を、高速酸素燃料(Hyper-Velocity-Oxy-Fuel(HVOF))熱溶射処理を施して、約600mm/秒から約1200mm/秒の間の速度で新品のジルカロイクラッド管の外側表面上に当てがい、約0.178mm(約0.007インチ)の厚さの外側コーティングを形成した。

【実施例2】

【0038】

図5に示すタイプに類似の磨耗防止コーティング26の別の形態において、NiCrAlYを含む金属パウダー材料を、実施例1と同様に、新品のジルカロイクラッド管の外側表面に当てがった。直線での指標速度が約6mm/回転でありさらにコーティング表面の速度に直すと約1100mm/秒となる約2120rpmの回転速度で高速酸素燃料(Hyper-Velocity-Oxy-Fuel(HVOF))熱溶射処理を施して、コーティングを当てがった。さらに、同時に、直線での指標速度が約6mm/回転でありさらにコーティング表面の速度に直すと1100mm/秒となる約2120rpmの回転速度でプラズマ熱溶射処理を施して、TiO<sub>2</sub>を含むセラミックパウダー材料をクラッド管の外側表面に当てがい、約0.178mm(約0.007インチ)の厚さの外側コーティングを形成した。

20

30

【0039】

NiCrAlYコーティングおよびNiCrAlY/TiO<sub>2</sub>コーティングを有するクラッド管を、原子炉の運転において一般的に見られる水温、水圧、水化学、デブリ硬度、および、デブリによる圧力をシミュレートするテスト装置内に配置した。

【0040】

図7に、表Iとして、磨耗防止コーティングがない新品のジルカロイ管、HVOF処理を施して付着したNiCrAlYを含む磨耗防止コーティングを有する新品のジルカロイ管、ならびに、HVOFおよび空気プラズマ熱溶射処理をそれぞれ施して付着したNiCrAlY/TiO<sub>2</sub>を含む磨耗防止コーティングを有する新品のジルカロイ管に対して行った装置磨耗試験のデータを示す。

40

【0041】

図6は、約0.008インチの変位幅、約550Fの温度、約1500psiの圧力条件下での、3つの検体の磨耗速度(インチ<sup>2</sup>/サイクル)に対する初期接触応力(Ksi)のグラフであって、これらの検体は、それぞれ、磨耗防止コーティングなしのジルカロイクラッド管、HVOF処理を施して付着したNiCrAlYを含む磨耗防止コーティングを有するジルカロイクラッド管、そして、HVOFおよび空気プラズマ熱溶射処理をそれぞれ施して付着したNiCrAlYおよびTiO<sub>2</sub>を含む磨耗防止コーティングを有するジルカロイクラッド管である。

【0042】

図7(表1)および図6に示すように、NiCrAlYコーティングを有するクラッド

50

管およびNiCrAlY/TiO<sub>2</sub>コーティングを有するクラッド管は、コーティングなしのジルカロイクラッド管と比べて優れたフレッチング磨耗特性を示した。さらに、NiCrAlY/TiO<sub>2</sub>コーティングを有するクラッド管は、NiCrAlYコーティングを有するジルカロイクラッド管と比べて優れたフレッチング磨耗特性を示した。

【0043】

ここに記載した説明は本発明を開示するためにいくつかの例を用いているが、これは最良の形態を含んでおり、また、これにより当業者が本発明を製造および使用できるようになる。本発明の特許性のある範囲は特許請求の範囲によって定義されるが、当業者が思いつく別の例も含むことができる。このような別の例は、これらの例が特許請求の範囲の字義通りの表現と変わらない構造的要素を有する場合においても、あるいは、これらの例が特許請求の字義通りの表現とわずかに異なる同等の構造的要素を含む場合においても、特許請求の範囲内にあることを意図される。

10

【図面の簡単な説明】

【0044】

【図1】本発明による、磨耗防止コーティングを有する燃料棒を含む燃料集合体を示す、部分的に概略の斜視図である。

【図2】図1の燃料棒およびスペーサグリッドの拡大図である。

【図3】図2の線3-3に沿った、部分的に概略の、燃料棒の拡大断面図である。

【図4】本発明による、HVOF処理を用いて新品のジルカロイクラッド管の外側表面に当てがわれるNiCrAlYを含む磨耗防止コーティングのモノクロ顕微鏡写真である。

20

【図5】本発明による、HVOFおよび空気プラズマ熱溶射処理をそれぞれ用いて新品のジルカロイクラッド管の外側表面に当てがわれるNiCrAlYおよびTiO<sub>2</sub>を含む磨耗防止コーティングのモノクロ顕微鏡写真である。

【図6】磨耗防止コーティングなしのジルカロイクラッド管と、HVOF処理を施して付着したNiCrAlYを含む磨耗防止コーティングを有するジルカロイクラッド管と、HVOFおよび空気プラズマ熱溶射処理をそれぞれ施して付着したNiCrAlYおよびTiO<sub>2</sub>を含む磨耗防止コーティングを有するジルカロイクラッド管とに対しての、約0.008インチの変位量、約550Fの温度、さらに、約1500psiの圧力における、磨耗速度(インチ<sup>2</sup>/サイクル)対初期接触応力(Ksi)のグラフである。

30

【図7】表1としての装置磨耗試験の試験結果データを示す図である。

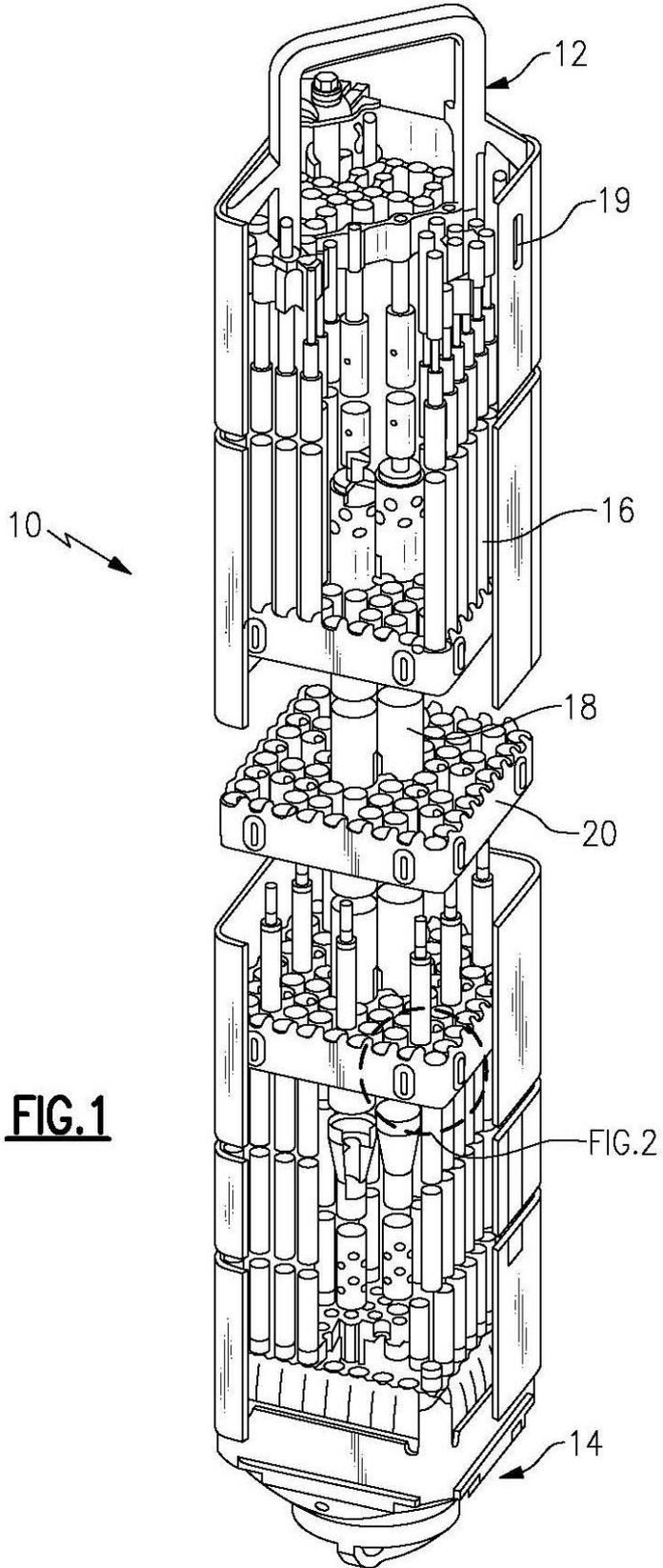
【符号の説明】

【0045】

- 10 燃料バンドルアッセンブリー
- 12 上部タイプレート
- 14 下部タイプレート
- 16 燃料棒
- 18 ウォータロッド
- 19 チャンネル構造体
- 20 スペーサグリッド
- 22 クラッド管
- 24 燃料ペレット
- 26 磨耗防止コーティング
- 28 金属材料
- 30 金属マトリックス
- 32 硬質相材料

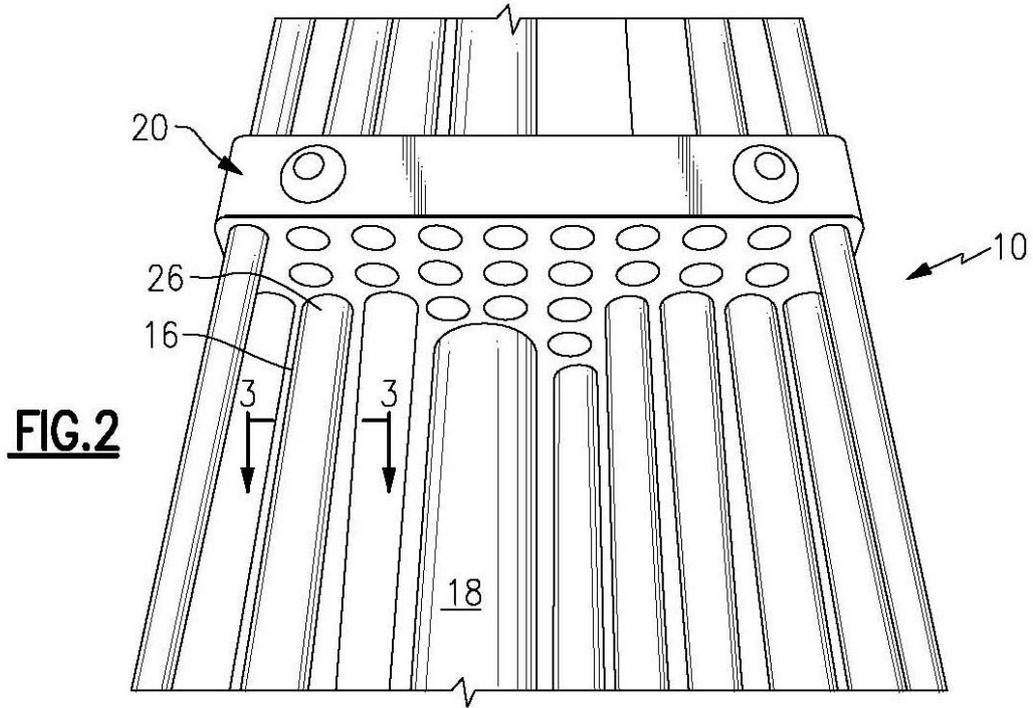
40

【 図 1 】



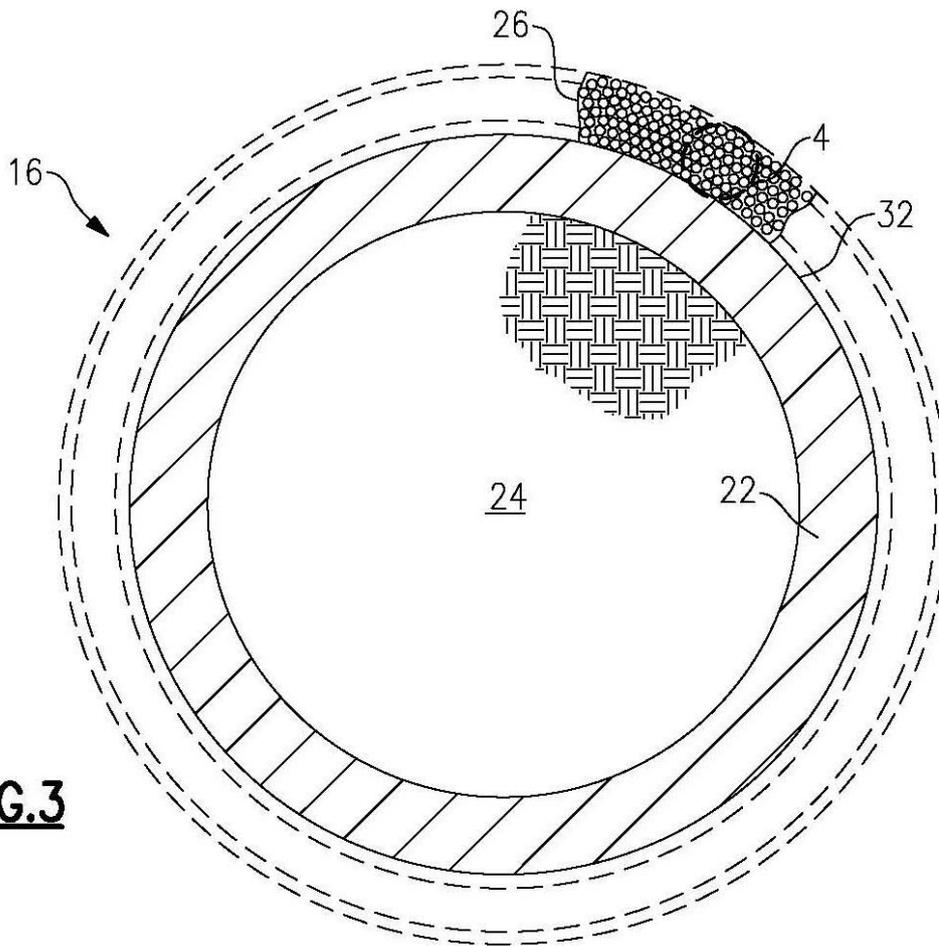
**FIG.1**

【 図 2 】



**FIG. 2**

【 図 3 】



**FIG. 3**

【 図 4 】

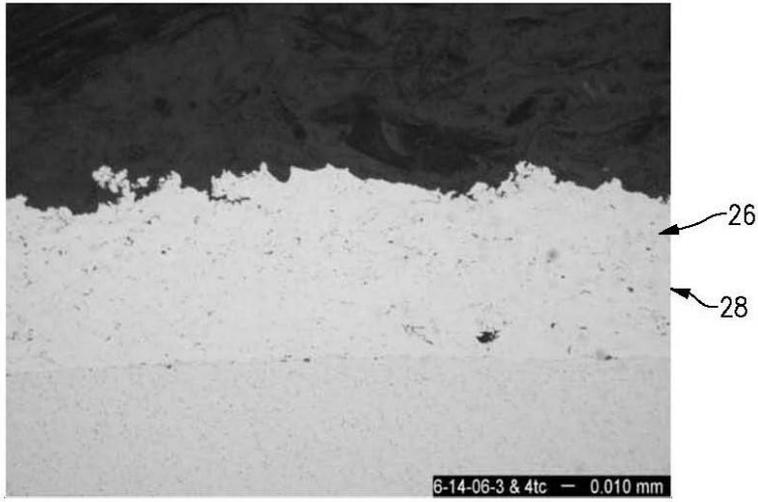


FIG.4

【 図 5 】

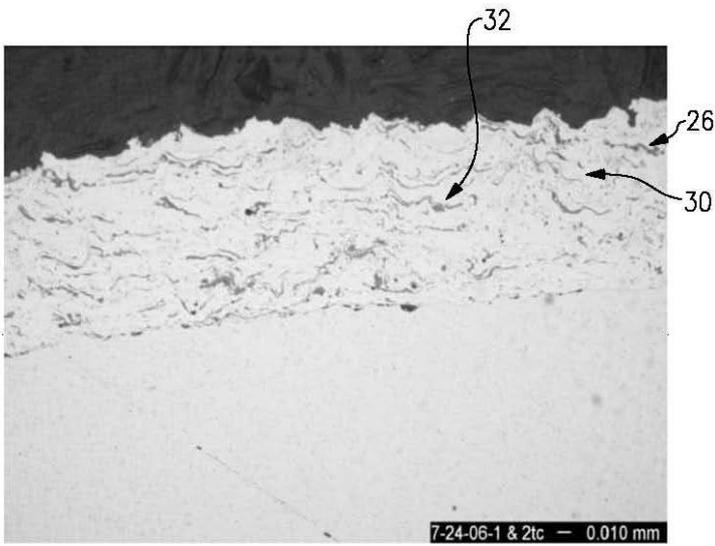


FIG.5

【 図 6 】

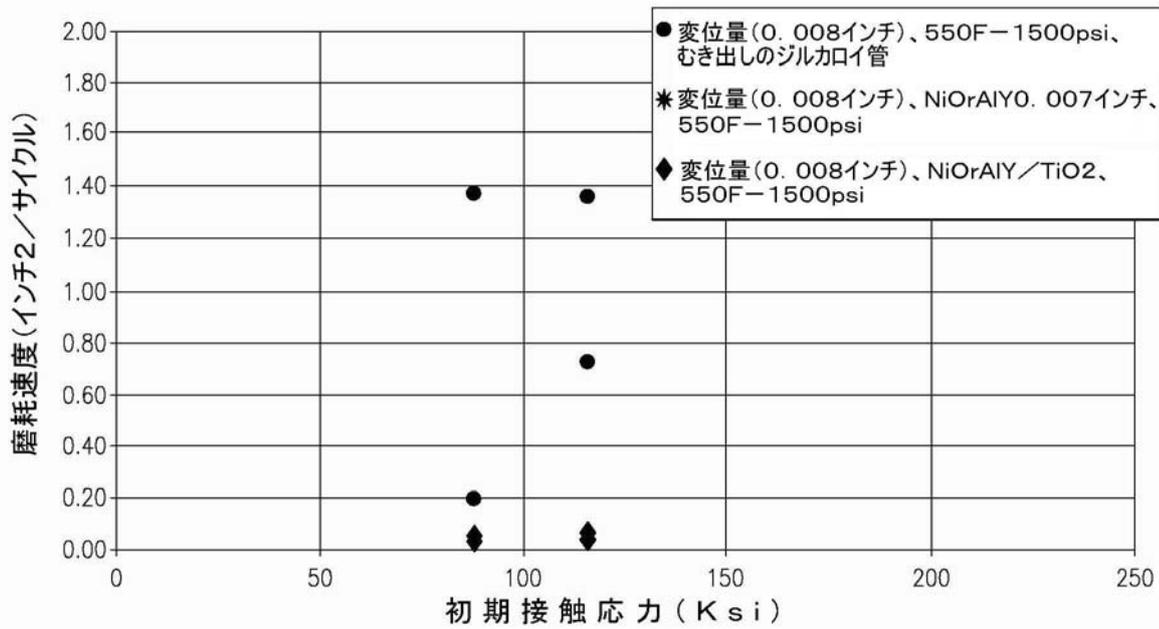


FIG.6

【 図 7 】

試料	条件	合計の側面磨耗領域 (in <sup>2</sup> )	最大深さ (inch)	最大幅 (inch)	接触応力(Ksi)	注釈	環境	サイクル	磨耗速度 in <sup>2</sup> /cycles (*10E-11)	磨耗速度 in <sup>2</sup> /cycles
ZR4-2 4oz .06R	4oz .06R-008	6.34E-04	1.16E-02	7.74E-02	116	New Zr tube	550F / 1500psi	7.00E+06	9.05E+00	9.05E-11
ZR4-3 4oz .06R	4oz .06R-008	8.12E-04	1.41E-02	8.21E-02	116	New Zr tube	550F / 1500psi	7.00E+06	1.16E+01	1.16E-10
ZR5-1 4oz .06R	4oz .06R-008	9.50E-05	2.93E-03	5.48E-02	116	NiCrAlY .007"	550F / 1500psi	7.00E+06	1.36E+00	1.36E-11
ZR5-2 4oz .10R	4oz .10R-008	1.37E-05	7.10E-04	3.87E-02	88	NiCrAlY .007"	550F / 1500psi	7.00E+06	1.96E-01	1.96E-12
ZR5-3 4oz .06R	4oz .06R-008	5.08E-05	1.54E-03	4.98E-02	116	NiCrAlY .007"	550F / 1500psi	7.00E+06	7.23E-01	7.23E-12
ZR5-4 4oz .10R	4oz .10R-008	9.62E-05	1.97E-03	6.88E-02	88	NiCrAlY .007"	550F / 1500psi	7.00E+06	1.37E+00	1.37E-11
ZR6-1 4oz .10R	4oz .10R-008	8.07E-04	1.15E-02	1.02E-01	88	New Zr tube	550F / 1500psi	7.00E+06	1.15E+01	1.15E-10
ZR6-2 4oz .10R	4oz .10R-008	7.52E-04	1.08E-02	9.20E-03	88	New Zr tube	550F / 1500psi	7.00E+06	1.07E+01	1.07E-10
ZR6-3 4oz .06R	4oz .06R-008	8.61E-04	1.37E-02	8.73E-02	116	New Zr tube	550F / 1500psi	7.00E+06	1.23E+01	1.23E-10
ZR6-4 4oz .06R	4oz .06R-008	7.34E-04	1.23E-02	8.25E-02	116	New Zr tube	550F / 1500psi	7.00E+06	1.05E+01	1.05E-10
ZR8-1 4oz .10R	4oz .10R-008	7.80E-06	6.02E-04	2.48E-03	88	NiCrAlY/TiO2	550F / 1500psi	2.60E+07	3.00E-02	3.00E-13
ZR8-2 4oz .10R	4oz .10R-008	1.22E-05	7.07E-04	3.17E-03	88	NiCrAlY/TiO2	550F / 1500psi	2.60E+07	4.69E-02	4.69E-13
ZR8-3 4oz .06R	4oz .06R-008	1.60E-05	8.76E-04	3.00E-03	116	NiCrAlY/TiO2	550F / 1500psi	2.60E+07	6.15E-02	6.15E-13
ZR8-4 4oz .06R	4oz .06R-008	1.02E-05	6.35E-04	2.55E-03	116	NiCrAlY/TiO2	550F / 1500psi	2.60E+07	3.92E-02	3.92E-13

新品のジルカロイ管: 燃料棒のクラディング材料として通常使用されるジルカロイ管。これは、デブリによるフレッチング磨耗により磨耗する材料である。  
 NiCrAlY: HVOF溶射処理によってジルカロイ管に付着される、約0.007インチの厚さのコーティング

NiCrAlY/TiO2: 高密度であり、フレッチング磨耗特性を大幅に向上させるTiO2をa%有するコーティングを生成する方法において、HVOFとプラズマ溶射との両方を同時に使用して適用されるジルカロイ管に当てがわれるコーティング

## フロントページの続き

- (72)発明者 デニス・マイケル・グレイ  
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、デランソン、マリアヴィル・ロード、7878番
- (72)発明者 デイビッド・ウィリアム・ホワイト  
アメリカ合衆国、ノースカロライナ州、ウィルミントン、サウスイースト・ハーバー・レーン、  
1701番
- (72)発明者 ピーター・ルイス・アンダーセン  
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネクタディ、ラグビー・ロード、1204番
- (72)発明者 ヤング・ジン・キム  
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、クリフトン・パーク、グローセスター・ストリート、11番
- (72)発明者 ヤン・ピ・リン  
アメリカ合衆国、ノースカロライナ州、ウィルミントン、ホールマーク・レーン、1908番
- (72)発明者 トッド・チャールズ・カーティス  
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネクタディ、イースト・リディアス・ストリート、315  
8番
- (72)発明者 チャールズ・ピーティアー・パターソン  
アメリカ合衆国、ノースカロライナ州、ウィルミントン、ピーオー・ボックス・780、メール  
・コード・エイチ25番