

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5237750号
(P5237750)

(45) 発行日 平成25年7月17日(2013.7.17)

(24) 登録日 平成25年4月5日(2013.4.5)

(51) Int.Cl.		F I	
B 2 3 K 31/00	(2006.01)	B 2 3 K 31/00	F
B 2 1 C 37/08	(2006.01)	B 2 3 K 31/00	A
B 2 1 D 26/033	(2011.01)	B 2 1 C 37/08	A
B 2 1 D 26/053	(2011.01)	B 2 1 D 26/033	
		B 2 1 D 26/053	

請求項の数 8 (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2008-268567 (P2008-268567)
 (22) 出願日 平成20年10月17日(2008.10.17)
 (65) 公開番号 特開2010-94715 (P2010-94715A)
 (43) 公開日 平成22年4月30日(2010.4.30)
 審査請求日 平成23年2月7日(2011.2.7)

(73) 特許権者 507250427
 日立GEニュークリア・エナジー株式会社
 茨城県日立市幸町三丁目1番1号
 (74) 代理人 110000350
 ポレール特許業務法人
 (72) 発明者 岩松 史則
 茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所 日立研究所内
 審査官 松本 公一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 配管の残留応力改善方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

配管の残留応力を改善する応力改善領域であって溶接部を含む前記応力改善領域から離れた、前記溶接部の上流および下流のそれぞれの第1位置に、前記配管の半径方向に広がる変形を抑制する環状の拘束部材を前記配管の外面を取り囲んで配置し、その後、前記配管内に存在して前記溶接部の内面および前記配管の、各前記拘束部材に対向するそれぞれの前記第1位置での内面に接触している水の圧力を、前記応力改善領域の外表面を前記拘束部材によって取り囲んでいない状態で上昇させて、前記応力改善領域、および前記配管の、各前記拘束部材に接触しているそれぞれの前記第1位置を塑性変形させることを特徴とする配管の残留応力改善方法。

【請求項2】

前記拘束部材が配置されるとき、前記拘束部材が前記配管の外表面に接触される請求項1に記載の配管の残留応力改善方法。

【請求項3】

前記配管が前記塑性変形された後、前記配管内の前記水の圧力を低下させる請求項1に記載の配管の残留応力改善方法。

【請求項4】

前記配管内の前記水の圧力上昇は、前記応力改善領域から離れた位置で前記配管に設けられた弁を全閉状態にし、その後、前記弁から前記応力改善領域に向う方向で前記応力改善領域から離れた位置で前記配管に設けられたポンプによって前記配管内の前記水を昇圧

することによって行われる請求項 1 または 2 に記載の配管の残留応力改善方法。

【請求項 5】

前記配管内の前記水の圧力上昇は、前記水が存在する前記配管内で前記応力改善領域の上流および下流のそれぞれの第 2 位置に氷栓を形成し、前記拘束部材を配置した各前記第 1 位置が間に存在する前記氷栓間で前記配管内に存在する前記水を凍らせることによって行われる請求項 1 または 2 に記載の配管の残留応力改善方法。

【請求項 6】

前記応力改善領域の上流および下流のそれぞれの第 2 位置に前記配管の外側を取り囲んで第 1 冷却容器をそれぞれ配置し、前記第 1 冷却容器と前記応力改善領域の間で前記応力改善領域の上流および下流のそれぞれの第 3 位置に前記配管の外側を取り囲んで第 2 冷却容器をそれぞれ配置し、各前記第 2 冷却容器と前記応力改善領域の間でそれぞれの第 1 位置に各前記拘束部材を配置し、それぞれの前記第 2 位置でにおける前記氷栓の形成は各前記第 1 冷却容器によって行い、前記氷栓間で前記配管内に存在する前記水を凍らせることは各前記第 2 冷却容器によって行われる請求項 5 に記載の配管の残留応力改善方法。

10

【請求項 7】

前記配管の厚さを T 、前記配管の内半径を R 、前記上流に配置された前記拘束部材と前記下流に配置された前記拘束部材の間の距離を D としたとき、距離 D が

$$2 \quad R T < D < 5 \quad R T$$

となるように、それぞれの前記拘束部材を配置する請求項 1 に記載の配管の残留応力改善方法。

20

【請求項 8】

前記応力改善領域が、前記上流に配置された前記拘束部材と前記下流に配置された前記拘束部材の間の真中の位置を基点にして、上流側および下流側にそれぞれ $0.3 D$ 以内の範囲に位置されている請求項 1 または 7 に記載の配管の残留応力改善方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、配管の残留応力改善方法に係り、特に、配管の溶接部付近の残留応力を改善するのに好適な配管の残留応力改善方法に関する。

【背景技術】

30

【0002】

発電プラントで使用される配管では、溶接が行われると溶接部近傍には残留応力が発生する。また、高温水配管には耐食性を考慮してステンレス鋼製配管またはニッケル合金鋼製配管を用いることが多い。ステンレス鋼およびニッケル合金鋼等を用いた配管では、配管の溶接部に引張残留応力が付与されたまま高温純水中に長時間曝されると、応力腐食割れを発生する恐れがある。したがって、溶接により発生した残留応力は、改善することが望ましい。

【0003】

配管の溶接部の残留応力を改善する方法として、配管内に形成した氷栓（アイスプラグ）を利用する方法が、特開 2005-95948 号公報および特開 2006-33459 号公報にて提案されている。

40

【0004】

特開 2005-95948 号公報に記載された配管の残留応力改善方法は、配管の溶接部の上流側と下流側の二箇所に冷媒容器をそれぞれ取り付けて配管内に氷栓をそれぞれ形成し、これらの氷栓間の水を凍らせて凍った氷の体積膨張によって配管を塑性変形させる。この塑性変形によって配管の内面に圧縮残留応力が付与される。配管の塑性変形時において配管の最大塑性変形量を制限するために、配管の塑性変形させる箇所（例えば、溶接部）の外面に、拘束治具を取り付けている。

【0005】

特開 2006-33459 号公報に記載された配管の残留応力改善方法は、配管の溶

50

接部の上流側と下流側の二箇所にて氷栓形成用の冷媒容器をそれぞれ取り付け、これらの冷媒容器と溶接部との間の二箇所にて拡管用の冷媒容器をそれぞれ取り付ける。氷栓形成用の各冷媒容器によって配管内で溶接部の上流および下流の二箇所にて氷栓を形成し、拡管用の各冷媒容器によって氷栓間に存在する水を凍らせて生成された氷の体積膨張を利用して配管の溶接部付近を外側に向けて押し広げる。これによって、配管の溶接部付近が塑性変形され、溶接部付近の内面に圧縮の残留応力が付与される。

【0006】

特開平5-154683号公報も、配管の溶接部の応力を改善する方法を記載している。この応力改善方法では、溶接部の上流側および下流側で配管の周囲に拘束部材を取り付け、配管を加熱して熱膨張させている。配管の熱膨張時において拘束部材により配管に締め付け力を与え、円周方向応力のみならず軸方向応力に対して圧縮応力を与える。これにより、配管の残留応力を改善している。

10

【0007】

【特許文献1】特開2005-95948号公報

【特許文献2】特開2006-334596号公報

【特許文献3】特開平5-154683号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

特開2005-95948号公報に記載された配管の残留応力改善方法では、溶接部の外面を含めて応力を改善する位置で配管を取り囲んで拘束治具を取り付けている。配管の溶接部近傍は、溶接金属が必要以上の寸法に盛り上がった余盛が形成される。拘束治具は、配管の最大塑性変形量を制限する機能を有しているが、余盛を考慮して作成する必要がある。しかしながら、余盛の形状は溶接部毎に異なっているため、溶接部毎に余盛を考慮して拘束治具を作成しなければならないが、余盛の形状に合わせて拘束治具を作成することは困難である。配管の溶接部の余盛が大きい場合には、配管内の氷の体積膨張によって配管が拡管されても余盛が拘束治具の内面に接触し、溶接部の拡管が拘束治具によって制限されて不十分になる可能性がある。このため、配管の溶接部において残留応力の改善が予定通り行われない可能性がある。

20

【0009】

特開平5-154683号公報に記載された拘束部材を用いる配管の応力改善方法では、加熱による配管の熱膨張もしくは肉盛溶接の収縮を利用して拘束部材により配管を締め付ける。このため、配管の拘束部材に接触している部分では、特開平5-154683号公報の図3に記載されているように、大きな軸方向の引張応力を生じる。

30

【0010】

本発明の目的は、配管に、より大きな圧縮残留応力を付与することができる配管の残留応力改善方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0011】

上記した目的を達成する本発明の特徴は、配管の残留応力を改善する応力改善領域であって溶接部を含むその応力改善領域から離れた、溶接部の上流および下流のそれぞれの第1位置に、配管の半径方向に広がる変形を抑制する環状の拘束部材を配管の外面を取り囲んで配置し、その後、配管内に存在して溶接部の内面および配管の、各拘束部材に対向するそれぞれの第1位置での内面に接触している水の圧力を、応力改善領域の外面を拘束部材によって取り囲んでいない状態で上昇させて、応力改善領域、および配管の、各拘束部材に接触しているそれぞれの第1位置を塑性変形させることにある。

40

【0012】

配管の応力改善領域から離れたそれぞれの第1位置で配管の外面を取り囲んで環状の拘束部材を配置し、配管内の水の圧力を上昇させて、応力改善領域、および配管の拘束部材に接触しているそれぞれの第1位置を塑性変形させるので、配管の応力改善領域の内面に

50

大きな圧縮残留応力を付与することができる。

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、配管の応力改善領域（例えば、溶接部）に、より大きな圧縮残留応力を付与することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0014】

発明者らは、配管の溶接部および溶接部付近においてこれらの内面により大きな圧縮残留応力を付与することができる方法を検討した。この結果、発明者らは、溶接部付近に拘束部材を取り付けた配管内の圧力を高めて、配管の応力改善領域（溶接部等）、および配管の拘束部材と接触する箇所を塑性変形させることが望ましいことを新たに見出した。この塑性変形によって、配管の応力改善領域の内面により大きな圧縮残留応力を付与することができる。このため、配管において応力腐食割れが発生する確率をさらに低減することができる。配管に拘束部材を取り付けた状態で配管内の圧力を高める方法として、配管内の水を凍らせることによる氷の体積膨張を利用する方法、および配管内の水を加圧してこの水の圧力を高める方法がある。

【0015】

以上の検討結果を反映した本発明の実施例を、以下に説明する。

【実施例1】

【0016】

本発明の好適な一実施例である実施例1の配管の残留応力改善方法を、図1を用いて説明する。本実施例を、発電プラントにおける配管の溶接部近傍の残留応力を改善する場合を例にとり説明する。

【0017】

発電プラントの、ステンレス鋼製（またはニッケル合金製）の配管1は、その端部を突合せ溶接にて接合されている。この突合せ溶接により、配管1の溶接部2、およびこの溶接部2の両側で溶接部2に隣り合って存在する、溶接の熱により機械的性質に変化を生じた熱影響部3の内面には、応力腐食割れの原因となる引張残留応力が生じている。配管1の溶接部2および熱影響部3は、突合せ溶接により引張残留応力が生じているため、応力を改善する必要がある範囲である。

【0018】

溶接部2および熱影響部3の残留応力を改善すべき配管1には、図1(A)に示すように、ポンプ5および開閉弁8が設けられている。配管7がポンプ5の上流および下流で配管1に接続され、圧力調節弁6が配管7に設けられている。

【0019】

配管1の外径を測定する位置を決定する。外径の測定位置は、溶接部2の近傍および拘束部材4を取り付けた位置の近傍にすることが好ましい。内圧上昇に伴う配管1の塑性変形でそれらの位置が分からなくならないように、決定した外径の測定位置に対して配管1の外面に油性ペン等でそれぞれマーキングを行う。これらのマーキングを用いて外径の測定位置を測定し、得られた測定値を外径の測定位置の初期値として記録する。これらを測定する際には、配管1の厚さのばらつきを考慮し、溶接部2の近傍および取り付けられた拘束部材4の近傍において配管1の軸心に垂直なそれぞれの断面内で二箇所以上を測定する。マーキングを用いて外径を測定する替りに、溶接部2の近傍および取り付けられた拘束部材4の近傍で配管1の外面にそれぞれストレインゲージを貼り付け、これらのストレインゲージを用いて配管1の周方向のひずみを測定して配管1の変形量を測定してもよい。このように配管1の外径を測定する位置を決めて、配管の外径の変化量を測定することで、配管1が膨張した時に配管1全体が塑性変形をしているか確認できる。

【0020】

溶接部2の上流および下流、具体的には熱影響部3の上流および下流で、ステンレス鋼製の円環状の拘束部材4を配管1にそれぞれ取り付ける（図1(B)参照）。拘束部材4

10

20

30

40

50

は2つの半円部材を含んでおり、拘束部材4を配管1に取り付けるときにはそれらの半円部材を配管1の周囲に配置して互いにボルト等を用いて結合する。拘束部材4の内面は配管1の外面に接触している。一对の拘束部材4間の配管1の外面はいかなる拘束部材でも拘束されていない。溶接部2および熱影響部3の各外面も拘束部材で拘束されていない。

【0021】

開閉弁8を全閉状態にし、圧力調節弁6を全開状態にする。その後、ポンプ5を駆動する。ポンプ5で昇圧された配管1内の水が、配管7を通して循環する。圧力調節弁6を徐々に閉めていき、ポンプ5より下流における配管1内の圧力を上昇させる。前述した配管1の外径測定位置で配管1の外径の変化量を測定して、設定された変形量が得られるまで、圧力調節弁6の開度を減少させる。設定された変形量は、拘束部材4と接触した配管1の位置で配管1に塑性変形が生じる変形量である。前述のように配管1内の圧力を上昇させることによって、配管1が半径方向に広がるように変形する。配管1の、拘束部材4と接触した二箇所での半径方向における変形量は、拘束部材4で拘束されている関係上、これらの位置以外での配管1のその変形量よりも小さくなる。これにより、溶接部2を中心に配管1に半径方向で外側に向かって凸となる変形が生じる(図1(C)参照)。

10

【0022】

これにより、溶接部2および熱影響部3はもとより、拘束部材4と接触した配管1の位置でも、塑性変形が生じる。これは、拘束部材4も配管1内の圧力上昇によって外側に向かっていくらか広がるからである。前述のマーキングを付した位置(溶接部2の近傍および取り付けられた拘束部材4の近傍)で、それぞれ配管1の外径を測定する。配管1の内圧上昇によって溶接部2および拘束部材4が接触している配管1の位置で塑性変形が生じ、それらの位置での外径の測定値が設定値に到達したとき、圧力調節弁6の開度を増大させ、溶接部2および熱影響部3等での配管1内の圧力を低減する。応力改善領域である溶接部2および熱影響部3における半径方向で外側に向かう変形量は、拘束部材4と接触した位置での配管1のその変形量よりも大きくなる。ポンプ5の駆動が停止され、拘束部材4が配管1から取り外される。圧力調節弁6の開度の増大は、前述したストレインゲージで測定されたひずみが設定値に到達したときに行っても良い。

20

【0023】

図2は配管1を塑性変形させて拘束部材4を取り外した後における配管1の形状を示している。配管1内の水の加圧による塑性変形により、溶接部2および熱影響部3の内面に、圧縮残留応力が付与される。配管1は2つの拘束部材4を取り付けられて塑性変形されたので、拘束部材4を取り外した配管1は、溶接部2では半径方向において外側に向かって突出し、拘束部材4を取り付けた位置では内側に向かって窪んでいる形状を有する。このように、配管1の、拘束部材4が接触している位置で塑性変形が生じるので、本実施例では、溶接部2および熱影響部3の内面における圧縮残留応力は、拘束部材4を取り付けないで配管1の内圧上昇で付与された圧縮残留応力よりも大きくなる。

30

【0024】

配管1の拘束部材4に接触していた箇所および溶接部2においてそれぞれ生じる軸方向の残留応力について説明する。配管1の拘束部材4に接触していた箇所では、配管1の半径方向の中央部に引張残留応力が生じ、配管1の内面10側および外面11側には圧縮残留応力12が生じる。配管1の拘束部材4に接触していた箇所では、配管1の内側に向かって窪んでいるが、配管1の全体が内圧によって半径方向において外側に広がって塑性変形するとき内面10側に前述したように圧縮残留応力12が生じる。配管1の拘束部材4に接触していた箇所が、圧縮残留応力が生じる程度に塑性変形されるため、溶接部2における配管1の半径方向における残留応力の分布は、図4に示すようになる。すなわち、配管1の内面10側に大きな残留圧縮応力12が生じる。溶接部2の配管1の外面11側には、引張残留応力13が生じている。

40

【0025】

本実施例は、配管1の残留応力を改善する領域(例えば、溶接部1および熱影響部3)の上流および下流で配管1に、配管1を取り囲む拘束部材4をそれぞれ接触させて設置し

50

、ポンプ5による水圧の増加によって配管1内の圧力を増加させて溶接部2および熱影響部3だけでなく拘束部材4の接触部でも配管1を塑性変形させている。このため、本実施例で配管1の、拘束部材4で外面が拘束されていない溶接部2および熱影響部3の内面に、特開2006-334596号公報に記載された、拘束部材4を設けていないそれぞれの残留応力改善方法よりも大きな圧縮残留応力を付与することができる。本実施例は、拘束部材を取り付けていない溶接部2および熱影響部3、および配管1の、拘束部材4を取り付けた位置のそれぞれを配管1内の圧力上昇により変形させるために、特開2005-95948号公報に記載された、溶接部および熱影響部等に拘束部材を配置した配管の残留応力改善方法よりも、拘束部材4が接触している位置における配管1の内面の引張残留応力を低減させることができる。

10

【0026】

このような本実施例は、特開2005-95948号公報および特開2006-334596号公報にそれぞれ記載された残留応力改善方法において内面に圧縮残留応力を付与することができない可能性がある外径が大きな配管1（例えば、外径が60mm以上の配管）に対しても、溶接部2および熱影響部3の内面に圧縮残留応力を付与することができる。したがって、本実施例は、外径が大きな配管1での応力腐食割れを防止することができる。本実施例は、外径が60mm未満の外径が小さい配管1においても、当然のことながら、溶接部2および熱影響部3の内面に圧縮残留応力を付与することができる。

【0027】

本実施例では、配管1内の圧力を上昇させるときに開閉弁8を全閉状態にしているので、配管1の内圧がこの開閉弁8にも作用する。このため、その圧力は、実施例2で詳細に説明するように、配管1の軸方向への引き伸ばしにも作用する。配管1の半径方向で外側に向う変形によって生じる圧縮残留応力に、配管1の軸方向への引き伸ばしによって生じる圧縮残留応力が付加される。したがって、本実施例は、配管1の残留応力をさらに改善することができる。

20

【0028】

拘束部材4を1個だけ熱影響部3の上流（または下流）で配管1の外面に接触させて取り付けて、前述のように配管1内の圧力を高めてもよい。この場合は、配管1の内圧の増大によって、溶接部2、溶接部2の上流側及び下流側の両方の熱影響部3、および配管1の、拘束部材4と接触している位置で塑性変形を生じる。このため、溶接部2および両方の熱影響部3の内面に圧縮残留応力が付与される。拘束部材4と接触している位置で塑性変形による残留応力の改善効果は、溶接部2、および拘束部材4に近い熱影響部3で大きくなり、溶接部2を基点にして拘束部材4の反対側に位置する熱影響部3では小さくなる。

30

【0029】

本実施例において、配管1に取り付ける拘束部材4の厚さを、図3に示す配管1の半径方向の残留応力分布を得る際に用いた拘束部材4のそれよりも厚くしても良い。厚さの厚い一対の拘束部材4を図1(B)と同じ位置に取り付けて前述したように配管1内の圧力を高めることによって、溶接部2および熱影響部3、および配管1の、拘束部材4を取り付けた位置のそれぞれを半径方向の外側に広げて塑性変形させる。この場合、配管1の拘束部材4と接触する部分での半径方向における残留応力の分布は図5に示すようになり、特開平5-154683号公報において配管の拘束部材と接触する箇所では生じる引っ張り残留応力よりも小さくなった引っ張り残留応力13が配管1の内面10側に形成される。このような場合でも、拘束部材4間における配管1の塑性変形が、特開2005-95948号公報および特開2006-334596号公報にそれぞれ記載された残留応力改善方法よりも大きくなり、溶接部2および熱影響部3の内面に生じる残留圧縮応力も大きくなる。外径が小さい配管はもとより、例えば、外径が60mm以上の外径の大きな配管に対しても、溶接部2および熱影響部3の内面に圧縮残留応力を付与することができる。拘束部材4の厚さが厚くなりすぎると、配管1の、拘束部材4を取り付けた位置で塑性変形が生じなくなる。このため、拘束部材4の厚みは配管1の、拘束部材4を取り付けた位置

40

50

で塑性変形が生じるように設定する。

【実施例 2】

【0030】

本発明の他の実施例である実施例 2 の配管の残留応力改善方法を、図 6 を用いて説明する。本実施例の配管の残留応力改善方法を適用する配管 1 は、発電プラントに設けられた配管であり、ステンレス鋼製で外径が 60 mm で厚さが 5 mm である。

【0031】

応力改善領域である溶接部 2 および熱影響部の残留応力を改善すべき配管 1 には、実施例 1 と同様に、一对の拘束部材 4 が溶接部 2 の上流および下流で、具体的には、熱影響部の上流および下流で配管 1 を取り囲んで配管 1 に取り付けられる。さらに、外側容器 15 A, 15 B および内側容器 16 A, 16 B が配管 1 の外面に取り付けられる (図 6 (A) 参照)。配管 1 内には水 17 が満たされている。

【0032】

拘束部材 4 の配管 1 への取り付けは実施例 1 と同様に行われる。拘束部材 4 は、ステンレス鋼製であり、幅が 10 mm であって厚さが 1.5 mm である。一对の拘束部材 4 間の距離 19 は 50 mm である。溶接部 2 は、一对の拘束部材 4 間の真ん中に位置している。拘束部材 4 を配管 1 に取り付けた状態では、拘束部材 4 の内径が配管 1 の外径と同じであり、拘束部材 4 の内面が配管 1 の外面に接触している。

【0033】

溶接部 2 から拘束部材 4 に向う方向において、拘束部材 4 から離れた位置に内側容器 16 A, 16 B が、それぞれ配置され、配管 1 に取り付けられる。一对の拘束部材 4 は内側容器 16 A と内側容器 16 B の間に配置され、内側容器 16 A と内側容器 16 B の間の距離は 300 mm である。上端が開放された内側容器 16 A, 16 B は、配管 1 に設置される前では上下方向にそれぞれ二分割されており、上下方向で配管 1 を挟んで取り付けられた後に二分割された構造を互いにボルトにて結合される。内側容器 16 A, 16 B の配管 1 の軸方向におけるそれぞれの長さは 200 mm である。

【0034】

溶接部 2 を基点にてして内側容器 16 A, 16 B から離れた位置に、外側容器 15 A, 15 B が配置される。内側容器 16 A, 16 B が外側容器 15 A と外側容器 15 A の間に配置される。外側容器 15 A と内側容器 16 A の間に形成された間隙 21、および外側容器 15 B と内側容器 16 B の間に形成された間隙 21 のそれぞれの幅は、100 mm である。上端が開放された外側容器 15 A, 15 B は、配管 1 に設置される前では上下方向にそれぞれ二分割されており、上下方向で配管 1 を挟んで取り付けられた後に二分割された構造を互いにボルトにて結合される。外側容器 15 A, 15 B の配管 1 の軸方向における長さも 200 mm である。

【0035】

実施例 1 と同様に、溶接部 2 の近傍および取り付けられた拘束部材 4 の近傍に設定した配管 1 の外径を測定する位置にそれぞれマーキングをする。

【0036】

内側容器 16 A, 16 B および外側容器 15 A, 15 B は、それぞれ内部が空洞になっている。内側容器 16 A, 16 B および外側容器 15 A, 15 B 内に、配管 1 が浸る程度にエチルアルコール 18 を注入する。エチルアルコール 18 が充填された外側容器 15 A, 15 B 内に、上端の開口からドライアイス 22 を投入する。投入されたドライアイス 22 によって、外側容器 15 A で取り囲まれた位置で配管 1 内の水 17 および外側容器 15 B で取り囲まれた位置で配管 1 内の水 17 が冷却される。このため、配管 1 内のそれぞれの位置で水 17 が凍って氷栓 23 が形成される (図 6 (B) 参照)。氷栓 23 間の水 17 は、氷栓 23 によって密封される。より強固なシール機能を発揮する氷栓 23 を配管 1 内に形成するために、予め実験等により求められた氷栓 23 が形成される時間よりも長い時間に亘って、外側容器 15 A, 15 B 内のドライアイスによる配管 1 の冷却を継続する。これにより、強固に配管 1 の内面に凍りついた一对の氷栓 23 が形成され、これらの氷栓

10

20

30

40

50

23の間に水17が満たされた密封領域が形成される。

【0037】

図6(C)に示すように、エチルアルコール18が充填された内側容器16A, 16B内にドライアイス22を投入する。内側容器16A, 16B内のドライアイス22によって、氷栓23間に存在する水17が冷却される。内側容器16A, 16Bを取り付けた各位置では配管1が氷点下に冷却され、氷栓23間に存在する水17が凍り始める。水17が氷になると体積が膨張するため、氷栓23間に存在する水17の圧力が上昇し始める。氷栓23間で配管1内の圧力が上昇し、この圧力上昇によって配管1が内側容器16Aと内側容器16Bの間で半径方向において外側に向かって押し広げられる。マーキングした各測定位置(溶接部2の近傍および取り付けられた拘束部材4の近傍)で配管1の外径をそれぞれ測定する。各外径の測定値が設定値に到達したかを確認する。外径の測定値が設定値に達していないときには、内側容器16A, 16B内のドライアイス22による配管1の冷却を継続する。外径の測定値が設定値に達したとき、外側容器15A, 15Bおよび内側容器16A, 16B内のドライアイス22を外部に排出し、ドライアイス22による配管1の冷却を停止する。配管1の外径の増大量としては、外径の1%とする。配管1の外径が60mmであれば、溶接部2および配管1の、拘束部材4と接触している位置で約0.6mm程度の増大が確認された後に、冷却を停止する。

10

【0038】

配管1の変形により配管1の上記した各位置での外径が設定値に達したとき、配管1の拘束部材4と接触している位置、および応力改善領域で、配管1は塑性変形している。応力改善領域(溶接部2および熱影響部)の塑性変形は、配管1の拘束部材4と接触している位置での塑性変形よりも大きくなっている。

20

【0039】

外側容器15A, 15Bおよび内側容器16A, 16B内のドライアイス22を外部に排出して配管1内の氷が全て融解して水17になった後、拘束部材4、外側容器15A, 15Bおよび内側容器16A, 16Bを配管1から取り外す。外側容器15A, 15Bおよび内側容器16A, 16Bは、冷却停止後であるならば、配管1内の氷が全て融解する前に撤去することもできる。これらを取り外された状態では、図6(D)に示すように、配管1に取り付けられていた内側容器16Aと内側容器16Bの間で、配管1が、溶接部2では半径方向において外側に向かって突出し、拘束部材4を取り付けた位置では半径方向において内側に向かって窪んでいる形状を有する。この形状は、図2に示す配管1の形状と同じである。

30

【0040】

本実施例は、実施例1で生じる各効果を得ることができる。氷栓23間に存在する水17を冷却する本実施例では、配管1内の圧力が上昇した際に、この圧力は、配管1を半径方向において外側に向かって押し広げるだけでなく、配管1の軸方向において配管1の内面に付着している各氷栓23に作用して配管1を軸方向に引き伸ばす。このため、配管1の軸方向の残留応力に対しては軸方向の応力が加わるので、配管1の半径方向で外側に向う変形によって生じる圧縮残留応力に、配管1の軸方向への引き伸ばしによって生じる圧縮残留応力が付加される。本実施例も、残留応力をさらに改善することができる。

40

【0041】

発明者らは、実施例1および2の配管の残留応力改善方法を対象に、配管1に生じる残留応力を、有限要素法を用いて解析し、これらの実施例における応力改善の機構を明らかにした。図7(A)は、上記の解析に用いた、実施例1および2に対応したモデルを示している。このモデルは、ステンレス鋼製で外径が60mm、肉厚が5mmの配管1を対象としたもので、ステンレス鋼製の一对の拘束部材4を配管1の外面を取り囲むように各拘束部材4の内面を配管1の外面に接触させて配置している。そのモデルにおいて、拘束部材4の幅は10mm、拘束部材4の厚みは1.5mmであり、一对の拘束部材4間の距離Dは10mm、50mmおよび100mmと変化させた。配管1の内面に加える圧力は、0MPaの状態から71.33MPaまで上昇させ、この圧力が71.33MPaまで上

50

昇した後に 0 MPa まで低下させた。配管 1 の内面に加わる圧力が 0 MPa まで低下した後、拘束部材 4 を配管 1 から除去した。

【 0 0 4 2 】

配管 1 の内圧を上昇させたときおよびその内圧を低下させたときに、配管 1 に生じる応力およびひずみの変化について、まず、説明する。配管 1 の内圧の上昇時および低下時における配管 1 の、拘束部材 4 から十分に離れた位置での応力とひずみは、図 8 に示すように変化する。図 8 (A) は、配管 1 の内圧の上昇時および低下時での配管 1 の内面および外面における軸方向の応力とひずみの変化を示している。軸方向の応力の変化は、図 8 (B) に示す配管 1 の内圧の上昇時および低下時における配管 1 の内面および外面の周方向の応力とひずみの変化、および図 8 (C) に示す配管 1 の内圧の上昇時および低下時における配管 1 の内面および外面の半径方向の応力とひずみの変化に基づいて説明することができる。図 8 (B) および図 8 (C) によれば、配管 1 の周方向のひずみは半径方向のひずみより絶対値が大きいために、配管 1 の軸方向には周方向と逆符号のひずみが生じる。

【 0 0 4 3 】

内圧が上昇するとき、配管 1 の周方向および半径方向では、それぞれ内面と外面においてひずみに差が生じる。ここで、配管 1 の周方向のひずみが約 0 . 2 % を超えたとき、配管 1 が塑性変形を開始する。塑性変形が開始された場合には配管 1 の周方向のひずみの差より半径方向のひずみの差が大きくなるので、配管 1 の内面の軸方向応力は圧縮応力となる。配管 1 は塑性変形しているために、内面に圧縮応力が残留する。図 8 (B) に示す配管 1 の周方向の応力の変化に注目する。配管 1 の内面には圧力が作用しているので、配管 1 の内面は配管 1 の外面より低い応力で塑性変形を開始する。これにより、配管 1 の内面と外面に応力差が生じて、配管 1 の内部の圧力が低下したとき、この応力差により、配管 1 の内面を圧縮応力にすることができる。このような理由により、配管 1 の内圧を上昇させて配管 1 が塑性変形するまで配管 1 を半径方向において外側に向かって変形させることによって、配管 1 の内面の軸方向および周方向のそれぞれの残留応力を圧縮応力にすることができる。

【 0 0 4 4 】

図 7 (A) に示すモデルを用いた有限要素法による、配管 1 に生じる残留応力の解析結果を図 7 (B) に示す。この残留応力は、配管 1 の内面での軸方向の応力である。図 7 (B) の横軸は、配管 1 に取り付けられた一对の拘束部材 4 間の真中、すなわち、一方の拘束部材 4 からの距離 2 5 と他方の拘束部材 4 からの距離 2 6 が等しくなる、配管 1 の内面における位置を基点 2 7 とし、基点 2 7 からの配管 1 の軸方向における距離 2 8 を示している。縦軸は軸方向応力を示している。基点 2 7 から拘束部材 4 に向う 1 0 mm までの領域を、残留応力を改善すべき応力改善領域 2 9 として、有限要素法により、配管 1 に生じる残留応力の解析を行った。拘束部材 4 の間の距離 D が $2 \text{ } R T$ より小さい 1 0 mm の場合は、一对の拘束部材 4 が近づき過ぎるために、応力改善領域 2 9 内で軸方向応力が引張残留応力になっている。この場合の周方向応力は圧縮残留応力である。 R は配管 1 の内半径であり、 T は配管 1 の厚さである。距離 D が $2 \text{ } R T$ より大きく $5 \text{ } R T$ より小さい 5 0 mm の場合は、拘束部材 4 を取り付けない場合と比較して、応力改善領域 2 9 内の軸方向応力が大きな圧縮残留応力になっている。距離 D が 5 0 mm の場合には、応力改善領域 2 9 内の周向応力も大きな圧縮残留応力になっている。距離 D が $5 \text{ } R T$ より大きい 1 0 0 mm の場合は一对の拘束部材 4 が互いに離れ過ぎるために、応力改善領域 2 9 内では拘束部材 4 を取り付けしたことによる応力改善効果が得られない。以上の検討結果に基づけば、一对の拘束部材 4 は、 $2 \text{ } R T < D < 5 \text{ } R T$ を満たすように、配管 1 に取り付けることが望ましい。

【 0 0 4 5 】

次に、有限要素法により $2 \text{ } R T < D < 5 \text{ } R T$ を満たす距離 D が 3 0 mm、4 0 mm および 5 0 mm について配管 1 に生じる軸方向残留応力の解析を行った結果を図 9 に示す。距離 D が 3 0 mm では基点 2 7 から 9 . 5 mm 以内、距離 D が 4 0 mm では 1 2 . 8 mm 以内、距離 D が 5 0 mm では 1 5 . 5 mm 以内に応力改善領域 2 9 が位置するように拘

10

20

30

40

50

束部材 4 を取り付けることで、残留応力改善効果を高めることができる。以上の検討結果に基づけば、応力改善領域 2 9 が基点 2 7 から 0 . 3 D 以内に位置するように拘束部材 4 を取り付けることが望ましい。

【 0 0 4 6 】

実施例 1 および 2 におけるそれぞれの配管の残留応力改善方法では、前述したように、配管 1 の内圧上昇は、前述したように、配管 1 を半径方向において外側に向かって変形させるだけでなく、配管 1 を軸方向に引っ張る力も発生させる。この引っ張り力によって、配管 1 の軸方向に引張応力が生じる。配管 1 の軸方向に生じる引張応力に相当する荷重を配管 1 の端部に負荷した場合の、有限要素法を用いた解析による残留応力の分布を、図 1 0 に示す。配管 1 の内圧が上昇した際に、軸方向応力が生じることで、配管 1 の軸方向応力および周方向応力共に、軸方向応力に相当する荷重を負荷しない場合に比べて高い残留応力改善効果が得られる。

10

【図面の簡単な説明】

【 0 0 4 7 】

【図 1】本発明の好適な一実施例である実施例 1 の配管の残留応力改善方法の工程を示す説明図であり、(A) は実施例 1 の残留応力改善方法を適用する配管系の構成図、(B) は配管に一对の拘束部材を取り付けた状態を示す説明図、および (C) は配管内の圧力を上昇させて実施例 1 の残留応力改善方法を実施した後の配管の変形状態を示す説明図である。

【図 2】図 1 (C) の状態から一对の拘束部材を取り外した状態を示す説明図である。

20

【図 3】図 2 の III 部の拡大図である。

【図 4】図 2 の IV 部の拡大図である。

【図 5】配管の内圧が異なる場合における図 2 の III 部の拡大図である。

【図 6】本発明の他の実施例である実施例 2 の配管の残留応力改善方法の工程を示す説明図であり、(A) 実施例 2 の残留応力改善方法を適用する配管に拘束部材等を取り付けた状態を示す説明図、(B) は一对の外側容器内のドライアイスを用いて配管内に一对の氷栓を形成した状態を示す説明図、(C) は配管内の氷栓間の圧力を上昇させて配管を外側に向かって変形させた状態を示す説明図および (D) は実施例 2 の残留応力改善方法を実施した後における配管の変形状態を示す説明図である。

【図 7】実施例 1 および 2 における配管の残留応力改善方法によって配管の内面に生じた残留応力の解析結果を示す説明図であり、(A) はその解析に用いたモデルの説明図、(B) は一对の拘束部材間の距離を変えた場合における配管の軸方向応力および周方向応力を示す特性図である。

30

【図 8】配管の内圧を変化させた場合における応力とひずみの関係を示す特性図であり、(A) は配管の軸方向応力および軸方向ひずみの変化を示す特性図、(B) は配管の周方向応力および周方向ひずみの変化を示す特性図、および (C) は配管の半径方向応力および半径方向ひずみの変化を示す特性図である。

【図 9】一对の拘束部材間の距離を変えた場合における配管の溶接部の軸方向応力を示す特性図である。

【図 1 0】実施例 1 および 2 の残留応力改善方法を適用した後における配管の軸方向応力および周方向応力を示す特性図である。

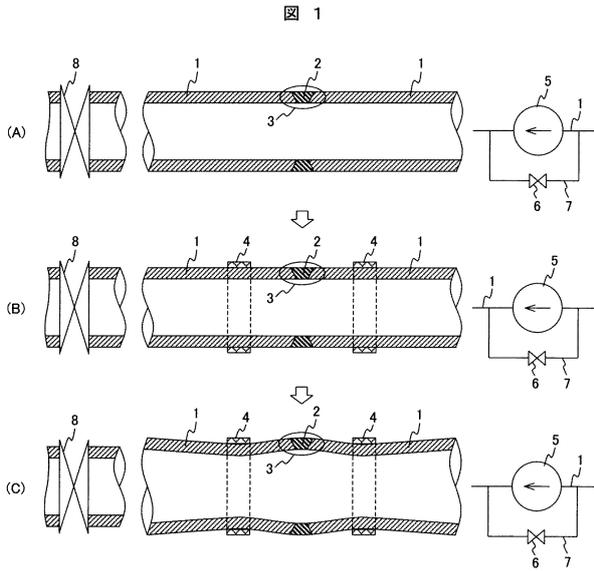
40

【符号の説明】

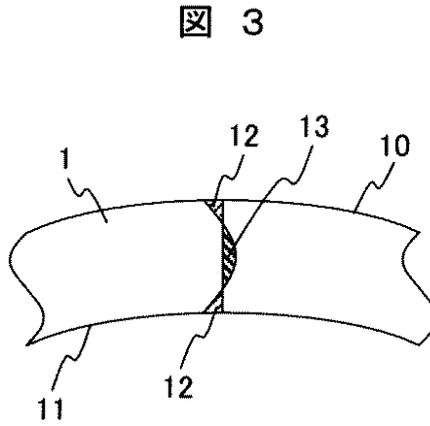
【 0 0 4 8 】

1 ... 配管、2 ... 溶接部、3 ... 熱影響部、4 ... 拘束部材、5 ... ポンプ、8 ... 開閉弁、1 0 ... 配管内面、1 1 ... 配管外面、1 5 A , 1 5 B ... 外側容器、1 6 A , 1 6 B ... 内側容器、1 7 ... 水、1 8 ... エチルアルコール、2 2 ... ドライアイス、2 3 ... 氷栓。

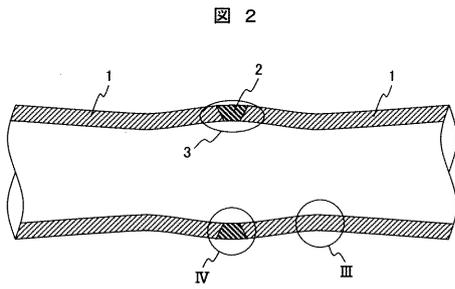
【図1】



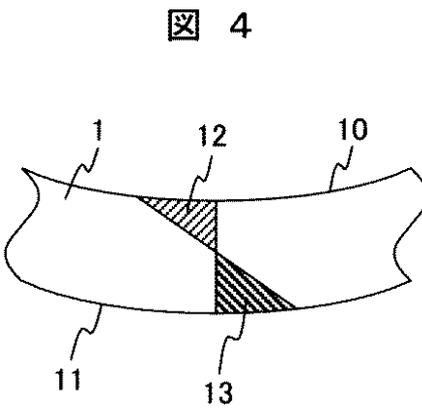
【図3】



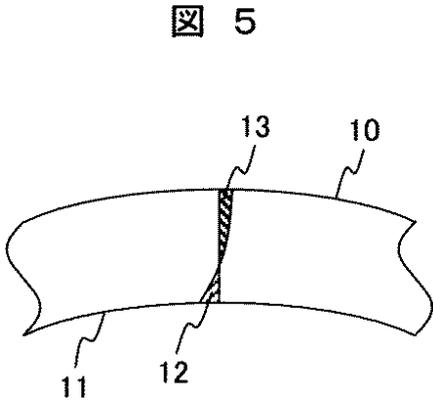
【図2】



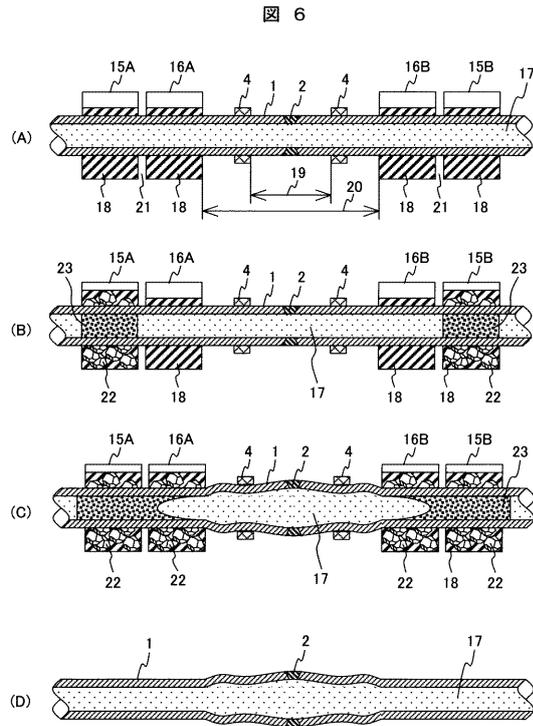
【図4】



【図5】

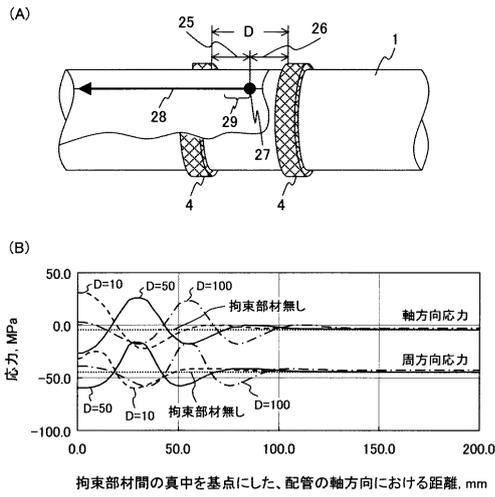


【図6】



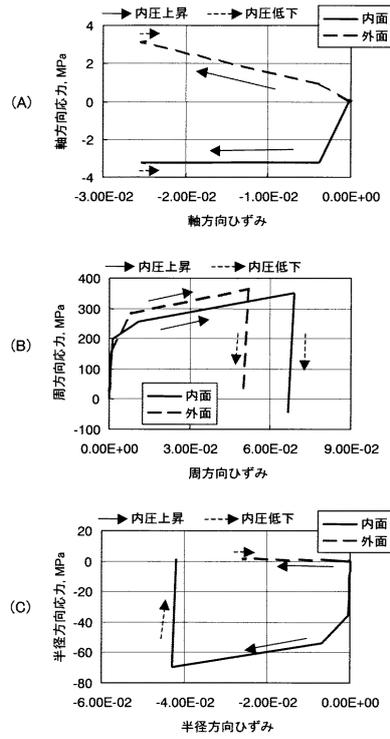
【 図 7 】

図 7



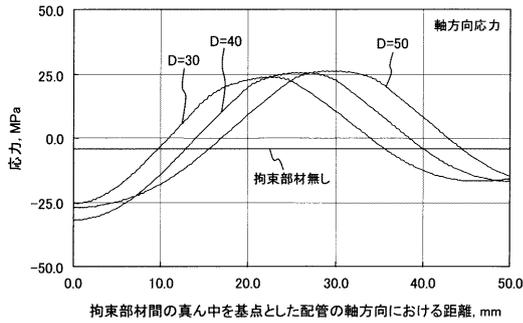
【 図 8 】

図 8



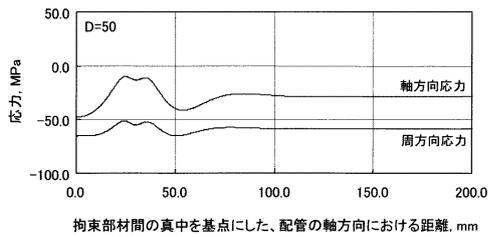
【 図 9 】

図 9



【 図 10 】

図 10



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開昭53-028055(JP,A)
特開昭58-120722(JP,A)
特開昭63-112089(JP,A)
特開平05-169255(JP,A)
特開2005-095948(JP,A)
特開2006-334596(JP,A)
特開2008-238190(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B23K 31/00
B21D 26/033 - 26/057