

再処理工場 ユーティリティ建屋における運転予備用ディーゼル発電機への
重油供給配管からの漏えいについて

1. 事象概要

2011年3月11日20時53分、ユーティリティ建屋において、運転予備用ディーゼル発電機^{※1}（以下、「GC-DG」という。）への重油供給配管のフィルタ差圧を計測する燃料油第2フィルタ差圧計の低圧側の計装用配管（以下、「当該の計装用配管」という。）の破損部から、重油が漏えいしていることを確認し、直ちに公設消防へ通報した。その後、当該差圧計の計器元弁を閉止し、漏えいは停止した。21時12分に漏えい量が約10リットルであることを確認した。公設消防による現場確認の結果、21時59分に火災でないことが確認された。

本事象による周辺環境への影響はなく、負傷者もなかった。

※1 外部電源の喪失に伴い自動起動する非安重設備の発電機

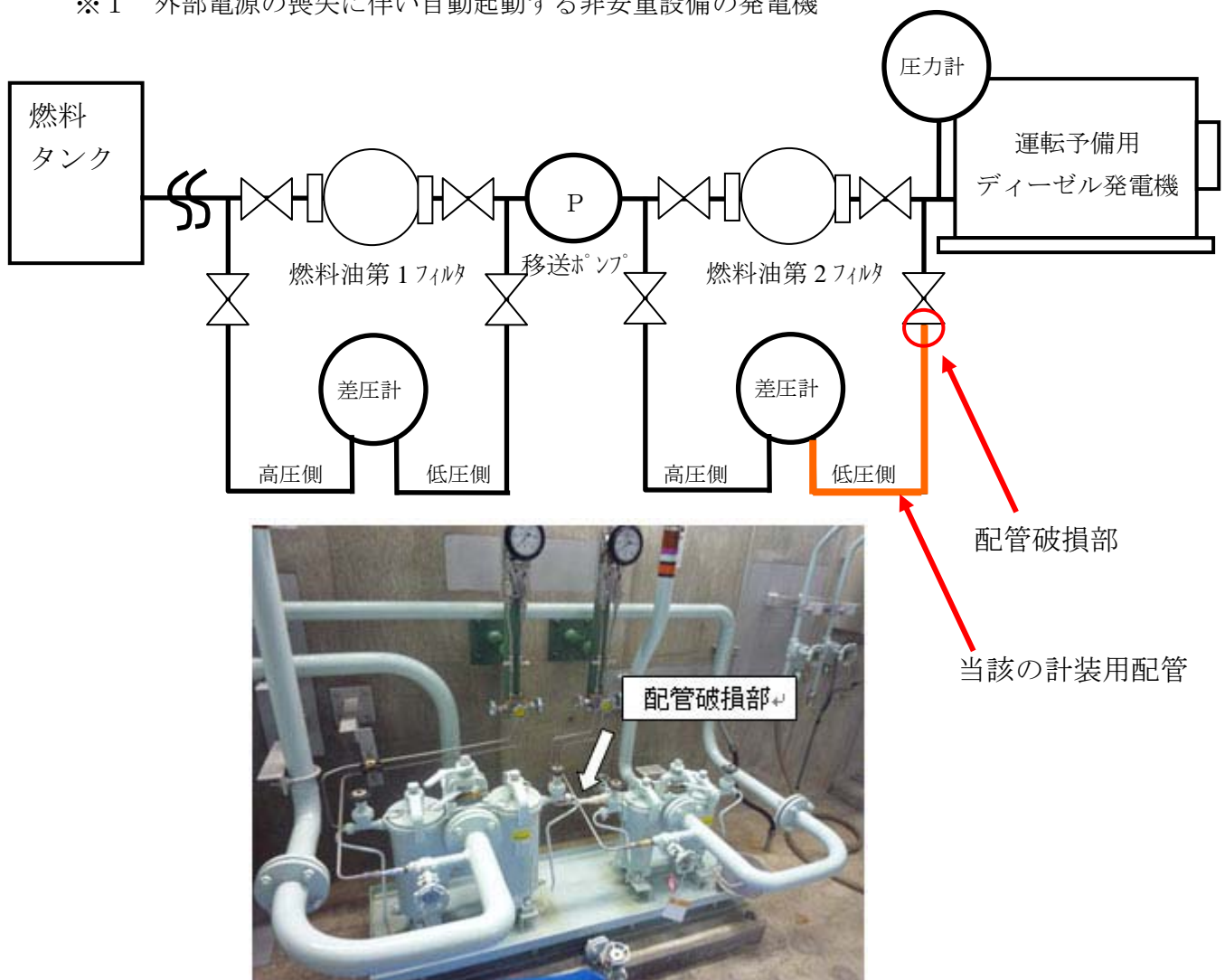


図1 当該の計装用配管を含む系統

2. 時系列

2011年

3月11日	14:46	地震発生に伴い外部電源喪失 GC-DGは、待機除外 ^{※2} により自動起動していないことを確認
	15:05	六ヶ所対応会議立ち上げ
	16:39	当直長の指示により、協力会社社員AがGC-DG起動（GC-DGは点検中であったため、直ちに復旧させた後、手動起動した。）
	20:53	協力会社社員Bが現場点検を実施したところ、当該の計装用配管の破損部から重油漏えいを確認
	20:58	当直長が公設消防へ連絡 当直長が統括当直長へ連絡
	21:00	協力会社社員Cが燃料油第2フィルタ差圧計の計器元弁を全閉し、漏えい停止
	21:12	漏えい量が約10リットルであることを確認
	21:13	連絡責任者より第1報発信（A情報）
	21:20	公設消防到着（漏えい状況確認）
	21:44	漏えいした重油のふき取り完了
	21:59	公設消防による現場確認終了（火災でないことを確認）
	23:00	当社社員が当該の計装用配管の破損部に金属性補修剤を施し応急措置を実施

※2 GC-DGは、点検のため、自動起動する待機状態から除外していた。

3. 応急措置

漏えいの当日、当社社員が金属性補修剤により破損部を補修した。6月21日に、同一仕様の配管と継手に交換した。また、漏えいの再発を防止するため、当該の差圧計の計器元弁を閉止した状態とした。

4. 原因

重油の漏えい箇所は、当該の計装用配管の破損部であることを事象発生時に確認したことから、破損した原因について以下のとおり調査を行った。

4. 1 当該の計装用配管が破損した原因

(1) 原因調査

① 現品調査

原因を特定するため、破損した当該の計装用配管（図2）の現品調査を行った。なお、破損部の一部は繋がっていたが、破面を観察するために切断した。

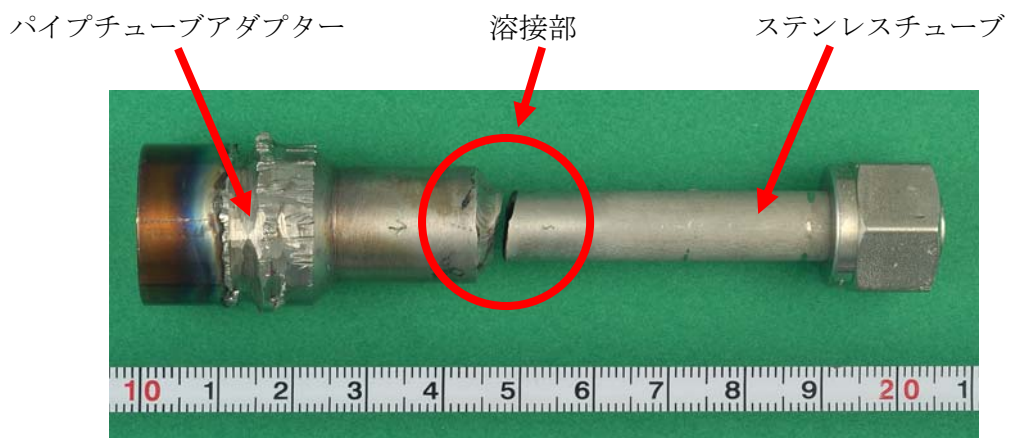


図2 当該の計装用配管

現品調査の結果は表1のとおりであり、この結果から当該の計装用配管は金属疲労^{※3}により破損したことを確認した。また、破面には一時的に大きな応力がかかり破損した特徴は確認されなかった。

※3 配管等の部材に力が繰り返し負荷されることによつてき裂を生じ、そのき裂が進展することで破損に至る現象

表1 当該の計装用配管の現品調査内容及び結果
(下線部は金属疲労の特徴を示す事実関係)

調査項目	調査内容	結果
外観観察	目視	<p>【添付資料1-1、1-2】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ステンレスチューブが破損していることを確認した。 ・破損箇所は母材と溶接部の境界（溶接端）であった。 ・破面近傍の溶接端に他の微小き裂も確認した。 ・溶接ビードには外観上、異常は認められなかった。
マクロ破面観察	破壊の形態を確認するため（静的破壊、疲労破壊など）、目視やルーペにて観察	<p>【添付資料2】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・破面は比較的平坦であり、金属疲労の様相を呈していた。 ・破損の起点部は、破面の流れ模様が収れんするステンレスチューブの外面側の溶接端であった。 ・一部繋がっていた箇所の面積は極僅かであり、大部分が貫通破面であった。 <p>⇒ 以下のSEMの観察結果より、貫通破面の起点部とその他部位で金属疲労の特徴を示す破面を確認できたことから、この貫通破面は金属疲労によるものと推定する。</p>
走査型電子顕微鏡（SEM）による観察	破壊の形態を詳細に確認するため、SEMにて観察	<p>【添付資料3】</p> <p>（破損の起点部）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>起点部において、金属疲労の特徴である組織依存型模様を呈していた。</u> <p>（その他部位）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・<u>起点部と一部繋がっていた箇所の破面部の中間位置でも金属疲労の特徴である組織依存型模様を呈していた。</u> ・<u>一部繋がっていた箇所の破面部の近傍の破面は、組織依存型模様と若干のストライエーション*が確認された。</u> ・一部繋がっていた箇所の破面部（破面を観察するために切断した箇所）には、延性破壊の特徴であるディンプルパターンが確認された。 <p>※き裂が徐々に進展した際に破面に残る縞模様（金属疲労の特徴）。</p>

表1 当該の計装用配管の現品調査内容及び結果（続き）

<p>起点部の断面組織観察</p>	<p>母材や溶接部の溶け込み及び熱影響、欠陥などの状態をSEMにて観察</p>	<p>【添付資料4】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・断面の破面部はステンレスチューブの外面側の溶接端から内面側に向けて斜めに入り、途中から直線状に内面側まで貫通していた。 <p>⇒ 金属疲労により溶接端に生じたき裂が振動のたびに、内面側に向けて斜めに進展し、途中から直線上に配管の内面側までき裂が進展した形跡と推定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・溶接部の溶け込みに異常はなかった。 ・母材の熱影響及び欠陥は確認されなかった。
<p>浸透探傷検査</p>	<p>配管表面の傷を見つけるため浸透探傷検査の実施</p>	<p>【添付資料5】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ステンレスチューブ側の溶接端の微小き裂と金属性補修剤除去時の傷以外に有意な傷は認められなかった。

②計装用配管における最大応力

当該の計装用配管が金属疲労により破損した結果を受け、図3に示すようにひずみゲージにより、運転条件（無負荷^{※4}、1/4 負荷、2/4 負荷、3/4 負荷、4/4 負荷運転）に応じた破損箇所における最大ひずみを計測し、その最大ひずみから最大応力を算出した。

※4 負荷とは発電機の段階的な出力

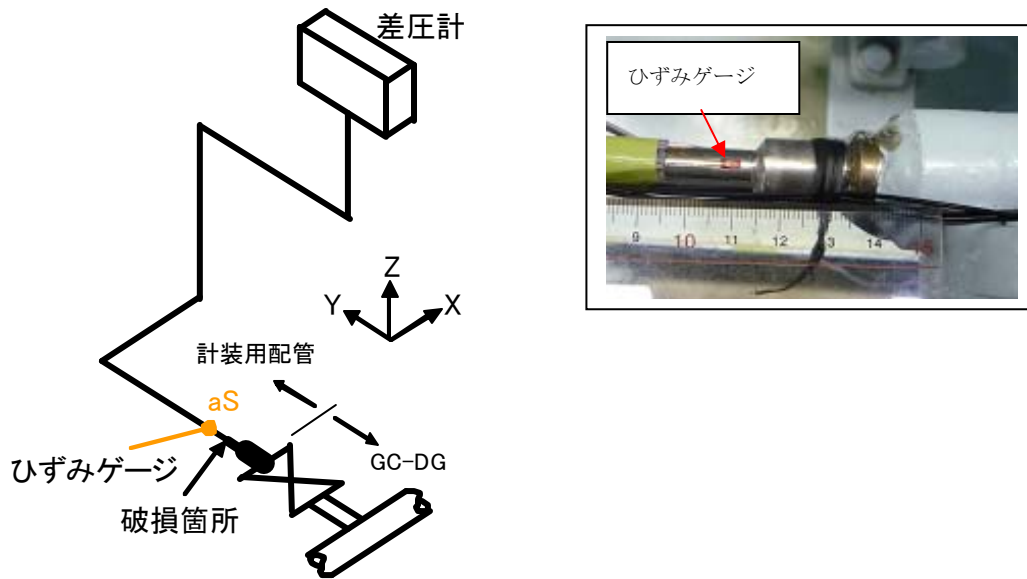


図3. ひずみゲージの計測位置

結果は表2のとおりであり、得られた結果をもとに最大推定応力^{※5}を算出し、当該の計装用配管の破損部における疲労限度と比較した結果、GC-DGの停止状態を除き、いずれの運転条件においても、最大推定応力は疲労限度を超えることを確認した。

※5 当該の計装用配管に負荷された最大応力の二乗和平方根を3倍した値である。

表2 最大推定応力と疲労限度との比較

GC-DG の 運転条件	負荷された 最大応力 (MPa)		最大推定応力 (MPa)	疲労限度 (MPa)	判定
	測定位置 : aS				
	X 方向の変位 に対して	Z 方向の変位 に対して			
停止状態	0.10	0.15	0.6	47	良
無負荷	34.61	6.40	74.7		否
1/4 負荷	45.55	11.78	99.9		否
2/4 負荷	41.23	11.27	90.9		否
3/4 負荷	61.82	16.36	135.9		否
4/4 負荷	36.58	10.73	81.0		否

なお、同様の方法で、当該の計装用配管と類似の計装用配管である燃料油第1フィルタの低圧側の計装用配管の最大推定応力を算出した。その結果、最大推定応力は疲労限度より十分小さい値であった。

この類似の計装用配管は、当該の計装用配管よりも配管長が長いが、サポートが設置 (図4参照) されている効果により、最大推定応力が小さくなったものとする。



図4. サポートの設置場所

③応力解析

NASTRAN を用いた応力解析を実施した。当該の計装用配管の破損箇所における最大推定応力の解析結果は、②の実機での結果とほぼ同一の結果となった。

また、当該の計装用配管にサポートを取り付けた場合（図5）の最大推定応力は表3のとおりであり、負荷される応力は、疲労限度に対して、十分余裕のある値となった。これは、サポートを取り付けたことにより、当該の計装用配管の振動が抑えられたためである。

本結果を受けて、GC-DGの施工当時の当社のルールを確認したところ、「プロセス配管及び機器等に振動が懸念される場合は、計装配管側で対策する。」との記載があり、今回の応力の測定結果及び解析結果を踏まえると、当該の計装用配管にはサポートが設置されていることが望ましかったと考える。

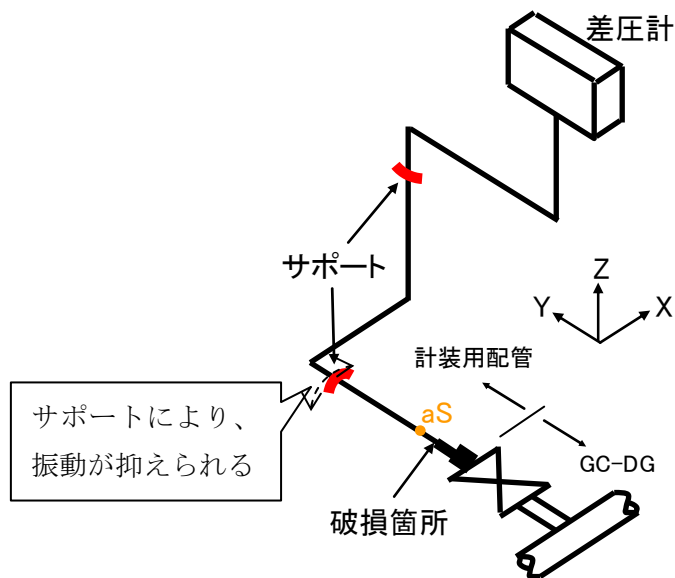


図5. サポートの設置場所

表3 サポート設置における最大推定応力と疲労限度との比較

位置	最大推定応力 (MPa)	疲労限度 (MPa)	判定
aS	8.5	47	良

(2) 原因

原因調査の結果から本事象は、当該の計装用配管にはサポートが設置されていなかったため、GC-DGの運転時の振動により、当該の計装用配管へ疲労限度を超える応力が繰り返し負荷され、当該の計装用配管は破損に至ったことを確認した。

なお、破面には一時的に大きな応力がかかり破損した特徴は確認されなかったことから、同日に発生した東日本大震災による破損ではないと評価した。

4. 2 当該の計装用配管にサポートが設置されていなかった原因

(1) 原因調査

上記のとおり、GC-DG を施工した当時の当社ルールを確認したところ、「プロセス配管及び機器等に振動が懸念される場合は、計装配管側で対策する。」との記載はあった。しかしながら、具体的な対応方法については定められていなかった。

また、施工会社のルールにおいても同様に、「プロセス配管及び機器等に振動が懸念される場合は、計装配管で対策する。」とのルールがあったが、今回の調査により当該の計装用配管の振幅が小さいことがわかり、施工当時においては GC-DG の振動が懸念されるとは判断できなかつたと推定した。

(2) 原因

当該の計装用配管にサポートが設置されていなかった原因は、

- ・ GC-DG の施工当時の当社のルールは振動に対して具体的な対応方法が定まっていなかったこと
- ・ 施工会社においては、試運転時の現場確認において当該の計装用配管については振動が小さく、振動による影響が懸念されるとは判断できなかったこと

と推定した。

5. 再発防止対策

5. 1 当該の計装用配管が破損した原因に対する対策

当該の計装用配管の破損に対して、GC-DG からの振動を抑えるために、適切な位置へサポートを設置した。

また、当該の計装用配管が接続している燃料油第2フィルタのその他の配管（高圧側配管）に対しても GC-DG からの振動を抑えるために適切な位置へサポートを設置した。

5. 2 当該の計装用配管にサポートが設置されていなかった原因に対する対策

(1) 振動に対する対応方法

新規設備または設備改造を発注する場合、振動源となる機器に接続され、かつ、内部流体が漏えいした場合に重大な事象に進展するおそれのある配管については、適切なサポートピッチにてサポートを設置することを受注者に要求する。また、機器内の配管については製造メーカーにその設備における運用実績（過去に振動による破損がなかったこと）を確認することを要求する。そして当社がその結果を確認することをルール化する。（2012年9月末までに実施）

(2) 配管の振動の確認方法

新規設備または設備改造については、試運転の稼動時間を長時間（たとえば200時間）とし、配管に異常な振動がないこと及び金属疲労の兆候がないことを目視により確認し、必要に応じて、振動に対する対策を講じることを受注者に要求し、当社がその結果を確認することをルール化する。（2012年9月末までに実施）

6. 水平展開

水平展開は個別評価を行う対象の選定と評価結果に基づく対策を2012年9月末までに実施する。

6. 1 個別評価を行う対象の選定方法

再処理工場内のすべての配管を水平展開の調査対象とし、以下の選定基準にすべて適合するものを、個別評価を行う対象の配管として選定する。対象の配管の選定は、機器内の配管と機器間の配管・計装配管に分けて行う。

(1) 機器内の配管

1) 機器内の振動源となるポンプ等へ接続している配管

機器内の振動源となるポンプ、モータ、エンジン等に接続されている配管を選定する。機器とは、除湿機、冷凍機、圧縮機、乾燥機、冷却機、ディーゼル発電機であり、約200台存在する。

2) 破損した場合に重大な影響を及ぼす可能性がある配管

配管が破損し内部流体が漏えいした場合、重大な影響を及ぼす可能性がある配管を選定する。

【内部流体】

- ・放射性液体
- ・油、薬品
- ・管理区域内の水
- ・ガス（水素ガス、プロパンガス）等

3) 疲労破壊の対策を講じていない配管

過去に疲労破壊した事象が発生していない配管、又は過去に疲労破壊を生じ、対策を実施している配管を除いた配管を選定する。

(2) 機器間の配管・計装配管

1) 耐震要求を含む施工メーカーのルールに基づきサポートが施工されている配管以外の配管

当社の耐震要求を含む施工メーカーのルールに基づき一定間隔でサポートが施工されている配管を除いた配管を選定する。

2) 振動源となる機器へ接続している配管

振動源となる機器に接続されている配管を選定する。なお、GC-DG のように振動源となる機器は再処理工場内に約 1 4 0 0 台存在する（ポンプ、除湿機、冷凍機、圧縮機、乾燥機、冷却機、ディーゼル発電機）。

3) 破損した場合に重大な影響を及ぼす可能性がある配管

配管が破損し内部流体が漏えいした場合、重大な影響を及ぼす可能性がある配管を選定する。

【内部流体】

- ・放射性液体
- ・油、薬品
- ・管理区域内の水
- ・ガス（水素ガス、プロパンガス）等

4) 疲労破壊の対策を講じていない配管

過去に疲労破壊を生じ、対策を実施している配管を除いた配管を選定する。

6. 2 選定された配管に対する個別評価及び対策

6. 1 の結果、選定した配管に対して、以下の評価及び対策を実施する。

(1) 個別評価

選定した配管の個別評価を実施する。評価方法は個別の状況に合わせて実施することとし、以下にその一例を示す。

- ・ 設備運転時における配管の振動計測を行い、金属疲労が生じるような振動がないか確認する。
- ・ 配管の表面に金属疲労による傷がないか確認する。
- ・ 振動源となる機器の運転積算時間を調査し、文献による試験データから金属疲労が発生するおそれがないか確認する。

(2) 対策

個別評価に従い、配管の設置状況を考慮して、必要な振動対策（サポートの設置、フレキシブル管の設置、配管材料の変更等）を講じる。

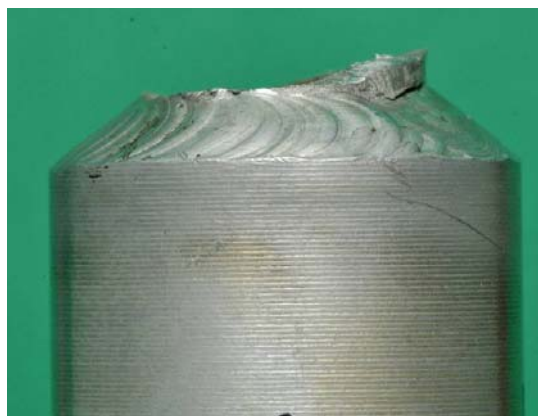
以上

パイプチューブアダプター



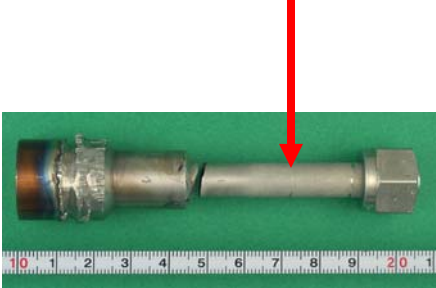
微小き裂

溶接部



パイプチューブアダプター側の外観状況

ステンレスチューブ



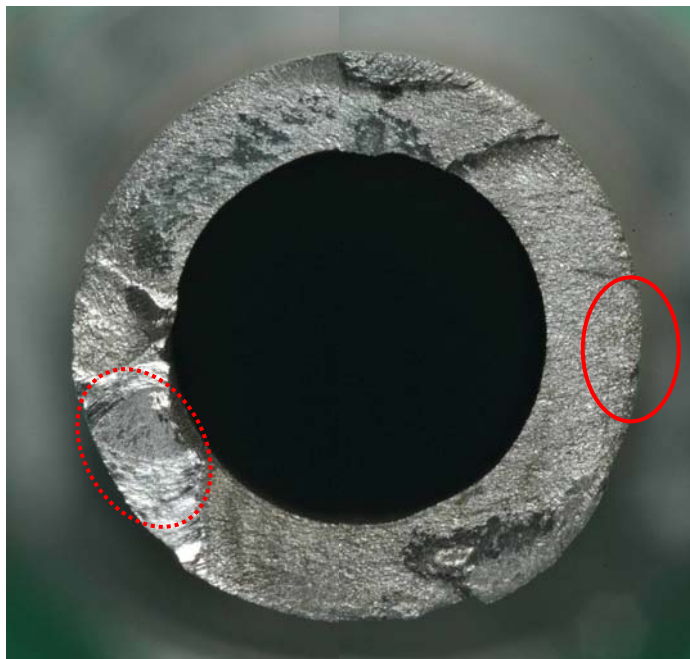
ステンレスチューブ側の外観状況



パイプチューブアダプター側の破面状況

○・・・起点部

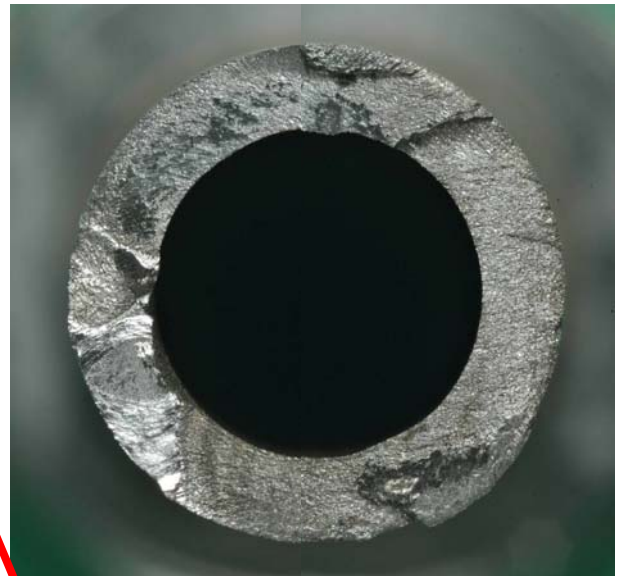
○・・・一部繋がっていた箇所を切断した部分



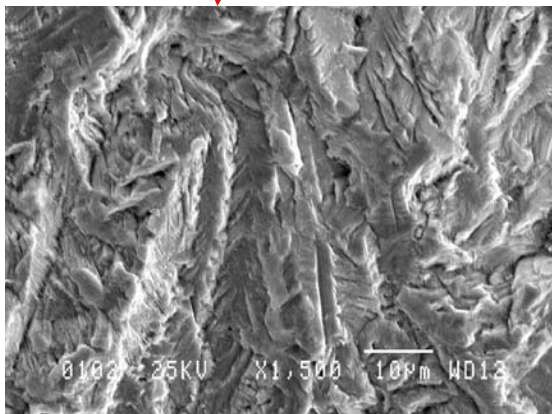
ステンレスチューブ側の破面状況



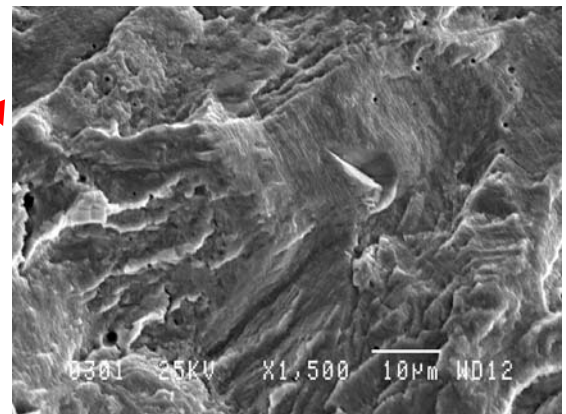
パイプチューブアダプター側



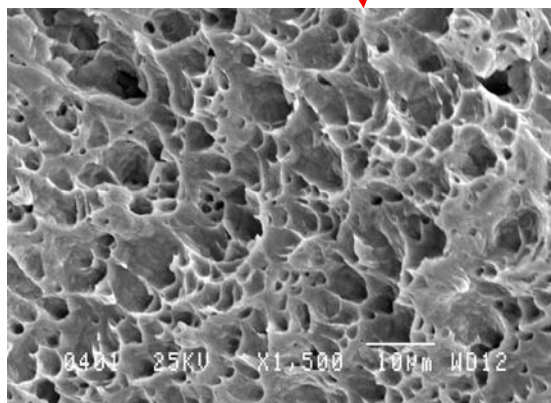
ステンレスチューブ側



起点部の破面
(組織依存型模様)



一部繋がっていた箇所の破面の近傍
(組織依存型模様+ストライエーション)

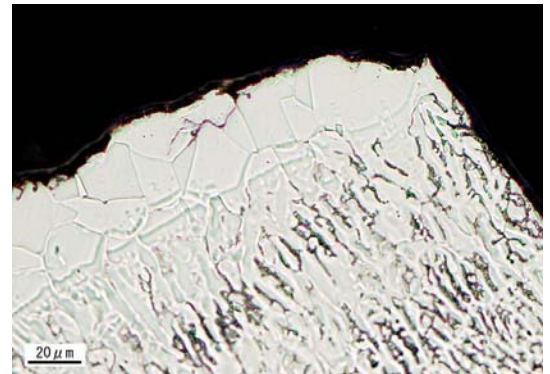


一部繋がっていた箇所の破面部
(ディンプルパターン)

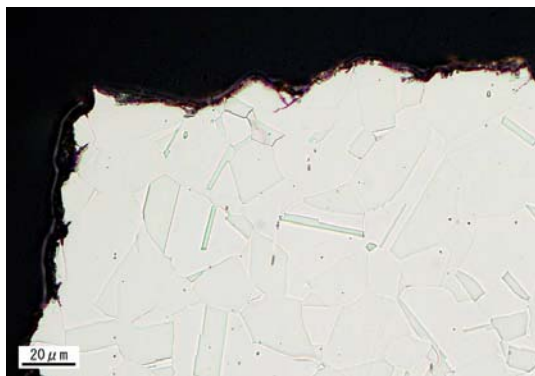
走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察



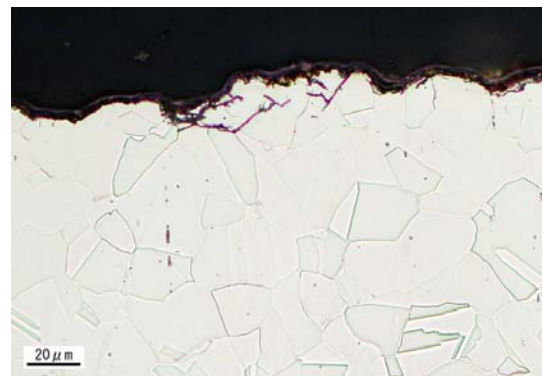
パイプチューブアダプター側の
断面組織観察位置



断面組織観察 (起点部)

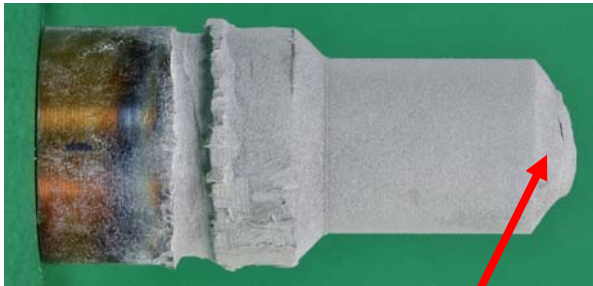
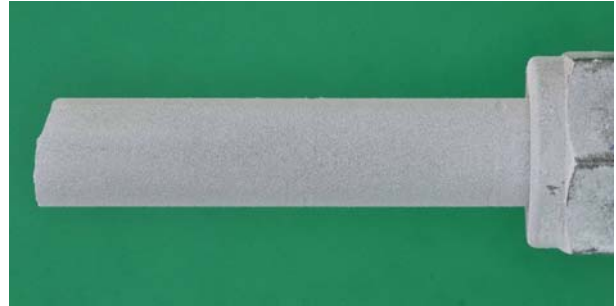


断面組織観察内面側

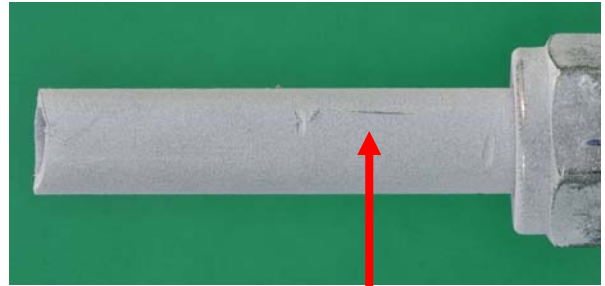


断面組織観察進展部

起点部の断面組織観察



微小き裂



金属性補修剤除去時の傷

浸透探傷検査