

柏崎刈羽原子力発電所 6号機

原子炉建屋天井クレーン走行伝動用継手部の破損について

平成19年10月11日

東京電力株式会社

目 次

| | |
|---------------------|---|
| 1. 件 名 | 1 |
| 2. 事象発生の日時 | 1 |
| 3. 事象発生の原子炉施設 | 1 |
| 4. 新潟県中越沖地震発生時の運転状況 | 1 |
| 5. 事象の概要 | 1 |
| 6. 調査 | 2 |
| 6. 1 使用環境面に関する調査 | 2 |
| 6. 2 設計面に関する調査 | 3 |
| 6. 3 地震荷重に係わる評価 | 4 |
| 7. その他の部位の健全性確認 | 5 |
| 8. 推定原因 | 5 |
| 9. 暫定対策 | 6 |
| 添付資料 | 7 |

1. 件名

柏崎刈羽原子力発電所 6号機
原子炉建屋クレーン走行伝動用継手部の破損

2. 事象発生の日時

平成19年7月24日 15時15分
(南側車輪側及び北側車輪側の走行伝動用継手部に破損を確認)

3. 事象発生の原子炉施設

燃料取扱設備 原子炉建屋クレーン

4. 新潟県中越沖地震発生時の運転状況

第8回定期検査中(冷温停止中)

5. 事象の概要

平成19年7月16日に発生した新潟県中越沖地震後、7月24日に実施した各種機器の地震後の設備点検において、柏崎刈羽原子力発電所6号機 原子炉建屋クレーン(以下、「天井クレーン」または「原子炉建屋天井クレーン」という。)の走行伝動用継手(以下、「ユニバーサルジョイント」という。)の車輪側のクロスピンが、南側走行装置と北側走行装置の両側で破損していることを確認した。クロスピンは4本のピンを有する十字型をしているが、破損したクロスピンのいずれも、対称位置の2本のピンが破損していた。

また、8月3日に、破損している南側車輪側クロスピンを取り外す作業の一環としてユニバーサルジョイントの電動機側カバーを取り外したところ、電動機側クロスピンにも破損を確認した。これをうけて北側電動機側クロスピンについてもカバーを取り外した上で目視点検を行ったが、外観上の異常は確認されなかった。

なお、目視点検により異常が確認されなかった北側電動機側クロスピンについては、浸透探傷検査*1(以下、「PT (penetrant test)」という。)を行い、異常のないことを確認した。

(添付資料—1, 2, 3, 4)

*1 浸透探傷検査：目視では確認しづらい材料の表面傷を染色により可視化する非破壊検査手法

表1 ユニバーサルジョイント・クロスピン状態

| ユニバーサルジョイント | クロスピン | 状態 | 破損確認日 |
|-------------|-------|----|------------|
| 北側 | 車輪側 | × | 平成19年7月24日 |
| | 電動機側 | ○ | — |
| 南側 | 車輪側 | × | 平成19年7月24日 |
| | 電動機側 | × | 平成19年8月3日 |

○：異常なし ×：異常あり(破損)

6. 調査

地震後に確認されたユニバーサルジョイントの破損について調査を行った。調査にあたっては、ユニバーサルジョイントが破損に至った要因について、要因分析表に基づき検討し、調査項目を抽出した。(添付資料—5)

6. 1 使用環境面に関する調査

(1) 天井クレーンの点検状況

平成19年2月1日～3月23日の期間でクレーン等安全規則*2に基づく年次点検にて走行装置の外観点検を実施している。この際の外観点検においては、ユニバーサルジョイントに異常は確認されていない。また、その後もクレーン等安全規則に基づく月例点検(4～7月の毎月1回)にて走行装置の動作試験を実施しており、走行動作(ユニバーサルジョイントの動作)に異常のないことを確認している。

*2クレーン等安全規則：労働安全衛生法に基づき、クレーンの使用等に関して規定した労働省令

(2) 天井クレーンの使用状況

定期検査準備や定期検査において様々な資機材の移動のために使用されていた。また、地震発生当日も、資機材移動のため天井クレーンを使用しており、動作に異常はなかった。なお、地震時は、無負荷(物品を吊り上げていない状態)で原子炉ウェル上付近にブレーキを掛けて停止している状態にあった。

(3) 金属調査

a. 外観観察結果

破損したユニバーサルジョイントについて、取外・分解を行い、グリースを除去して目視観察した結果、腐食の痕跡、有意なキズ、摩耗、異物の噛み込み痕は確認されなかった。(添付資料—4)

b. 破面観察結果

ユニバーサルジョイントのクロスピンの取外・分解を行い、クロスピン本体側の破面観察を実施した。破面は、クロスピン破断後も引き続き地震動が作用したことにより、破断面同士が接触したことによるものと考えられる「潰れ」が多いが、一部潰れていない破面が認められたため、その部分を中心に走査型電子顕微鏡(以下、「SEM (scanning electron microscope)」という。)観察を実施した。

破面の大半は若干の延性破面が混在した擬へき開破面*3であった。また、延性破断の様相を示すディンプル*4模様が認められた。これらより今回の破断はいずれも大きな荷重が負荷されたことによるものと判断される。

いずれの破面においてもストライエーション*5やビーチマーク*6など、金属疲労の様相を示すものは観察されなかった。また破面全体において腐食の痕跡を示すサビ等の付着はなかった。これらは今回の破面が形成される前に腐食や疲労などの劣化がなかったことを示している。

破面外表面近傍および破面中央（グリース穴）近傍に粒界状の様相*7を示しており、これらは、浸炭処理*8によるものと判断される。（添付資料—6）

また、破面のマクロな様相から推定される破壊の進行方向を添付資料—6に示す。いずれもユニバーサルジョイントがトルクを伝達する方向（図中の 90° → 270° 方向あるいは 270° → 90° 方向）と一致することから、クロスピンを破損させた力がユニバーサルジョイントの回転方向の過大トルクであったことが推定される。なお、これらの様相は、破損した3箇所に通じて確認されている。

*3 擬へき開破面：若干の塑性変形を伴った過大荷重等により脆性的に破壊が生じた際に見られる破面形態。

*4 ディンプル：多数の凹みが観察される、延性破面のミクロ的特徴。

*5 ストライエーション：疲労破面上に形成される縞状のミクロ的特徴。

*6 ビーチマーク：疲労破面上で疲労負荷が変化したときにできる縞状のマクロ的特徴

*7 粒界状の様相：金属の結晶の境界である結晶粒界に添って割れが確認されている状況。

*8 浸炭処理：機械加工された金属材料に対して焼入硬化させ、摩耗・疲労強度の向上させる一般的な手法。

6. 2 設計面に関する調査

(1) 設計確認

ユニバーサルジョイントの駆動伝達用に適用するにあたり、クロスピンの材質・形状に関してクレーン走行電動機の最大駆動トルクに対して、十分な強度を有していることを確認した。また、クロスピンの出荷時には、外観点検を行っていることから、加工傷等の形状加工不良による強度不足は考えられない。（添付資料—7）

(2) 金属調査

a. 断面マクロ観察

破損したクロスピン（北側車輪側クロスピン本体部分）の断面マクロ観察の結果、内部及び表面の割れ等の材料欠陥は認められず、金属組織上も異常は確認されなかった。

（添付資料—8）

b. 化学成分分析

破損したクロスピン（北側車輪側クロスピン本体部分/SCM420H）について成分分析を実施した結果、J I S規格通りの成分であることが確認された。（添付資料—9）

c. 引張試験

破損したクロスピンについて、北側車輪側クロスピン本体部分より試験片を切出し引張試験を実施した結果、J I Sに記載の引張特性を満足し、十分な強度を有していることを確認した。（添付資料—9）

d. 外観観察結果

ユニバーサルジョイントについて、取外・分解を行い、グリースを除去して目視観察した結果、加工不良と思われる有意なキズは確認されなかった。（添付資料—4）

e. 硬さ測定

破損したクロスピン（北側車輪側クロスピン本体部分）についてビッカース硬さ*9 を測定した。測定の結果、仕様通りの表面の有効浸炭層深さ（ビッカース硬さ：550HV 以上、表面より厚さ約 1.0mm）が形成されており、材料硬さについて異常は確認されなかった。

（添付資料—9）

*9 ビッカース硬さ：金属材料をダイヤモンドにより押し込み、圧痕形状より硬さを測定するもの。

(3) 天井クレーンの点検・使用状況

クレーン等安全規則に基づく年次点検・月例点検状況及び、地震発生当日の動作状況に異常はなく、組立不良は確認されていない。

6. 3 地震荷重に係わる評価

(1) 金属調査

破面観察の結果、過大な荷重による強制的な延性破面の様相を示すディンプル等が確認されていること、また、破壊の進行方向とユニバーサルジョイントがトルクを伝達する方向が一致していることから、クロスピンを破損させた力はユニバーサルジョイントの回転方向の過大なトルクであったことが推察された。（6. 1 (3) 参照）

(2) 地震荷重評価

天井クレーンの現場調査の結果、走行レールと走行車輪にクレーン自体が強制的に移動したと思われる摺動痕（走行レール上の約 30cm に渡り断続的に確認）が確認されており、クレーン本体に車輪軸方向（南北方向）及び上下方向の地震動が加わりながら、クレーン本体がクレーン走行方向（東西方向）に移動したことが推察された。（添付資料—10）

走行レール及び走行車輪の摺動痕の状況や、前述の破面観察によりユニバーサルジョイントの回転方向に過大なトルクが加わったと推定される状況が確認されていることから、走行車輪には走行レールとの摩擦力による回転方向のトルクが生じたものと考えられ、そのトルクは、ユニバーサルジョイント及びクロスピンに過大なトルクとして加わったものと推察される。

なお、クレーンの車輪軸方向（南北方向）及び上下方向に地震荷重を受け、ユニバーサルジョイント及びクロスピンに作用する慣性力による応力は自荷重分程度であり、これはクロスピンの引張強さに比べ十分に小さく、破損の原因となるものではない。

また、クレーンが地震動により強制的に摩擦摺動を伴いながら走行方向（東西方向）に移動した場合に、ユニバーサルジョイントは強度的に破損する可能性があることを確認した。

（添付資料—7）

なお、原子炉建屋天井クレーンは耐震重要度分類「Bクラス」であり、クレーンの落下による重要な機器の損傷を防止する観点から、落下を防止するための機器（脱線防止ラグ）が取り

付けられている。脱線防止ラグにより基準地震動 S_1 に対してクレーンが落下しないこと（脱線防止ラグ、走行レールが基準地震動 S_1 により応力評価上、変形・損傷しないこと）を評価・設計しているが、クレーンの走行機能を目的としたユニバーサルジョイント（含むクロスピン）については、個別に地震動に対する評価は実施していない。

7. その他の部位の健全性確認

破損しなかったクロスピン残存部、走行装置、脱線防止ラグについて点検を実施した。また、他号機についても、当該号機における破損部位と同様の部位について点検を行った。

(1) 破損しなかったクロスピン残存部の点検

南側車輪側、南側電動機側、北側車輪側の破損したクロスピンの、破損せずに残ったピンの破損部位相当部及び、破損しなかった北側電動機側クロスピンの破損部位相当部に対して、PTを実施した。結果、指示模様は観察されなかった。（添付資料—6）

(2) 減速機点検、電動機・ブレーキ点検

ユニバーサルジョイントの破損時の力が、電動機側のフランジで接続されている減速機にも加わった可能性が高いため、減速機の歯車の外観点検を実施するとともに手回しを実施した。結果、歯車に損傷は認められずスムーズに回転し異常は確認されなかった。

また、電動機ならびにブレーキについても、異常は確認されなかった。（添付資料—11）

(3) 脱線防止ラグの外観点検

原子炉建屋天井クレーンにはクレーンの落下による重要な機器の損傷を防止する観点から、落下を防止するための機器（脱線防止ラグ）が取り付けられている。今回の地震による影響を考慮して、脱線防止ラグ、走行レールについて外観点検を実施し、変形、割れの異常は確認されなかった。（添付資料—12）

(4) 他号機の状況

1～3号機の原子炉建屋天井クレーンは、当該号機と同様のユニバーサルジョイントを有しているが、ユニバーサルジョイントの取外・分解を行い、クロスピンの目視点検・PTを実施し、異常のないことを確認した。

なお、4, 5, 7号機の原子炉建屋天井クレーンは、当該号機とは走行装置の構造が異なりユニバーサルジョイント（含むクロスピン）を使用しておらず、現在までの点検において、走行装置等に異常は確認されていない。（添付資料—13）

8. 推定原因

原子炉建屋天井クレーンユニバーサルジョイント破損の原因は以下のとおりと推定した。

- ・地震発生時、原子炉建屋天井クレーンは停止している状態であり、走行車輪はブレーキ（電動機側に設置されている）が掛かっている状態であった。

- ・地震動により、原子炉建屋天井クレーンの走行車輪にブレーキが掛かった状態で、強制的にクレーンの走行方向（東西方向）の力が発生した。
- ・クレーンの走行方向（東西方向）の力により走行車輪に回転しようとする力が作用したが、電動機側の回転を阻止する力（ブレーキ）の相反する作用により、走行車輪と電動機の上に位置するユニバーサルジョイントに過大なトルクが発生し、クロスピンが破損した。

9. 暫定対策

破損したクロスピンを含むユニバーサルジョイント一式について同型・新品に交換した。

原子炉建屋天井クレーンについては、破損部位を復旧した当該号機のほか、他号機についても、各種作動試験・荷重試験等を行い、異常のないことを確認したことから、原子炉建屋天井クレーンの使用を開始した。

なお、地震荷重に係わる詳細な評価については、今後、適宜実施する予定である。

以上

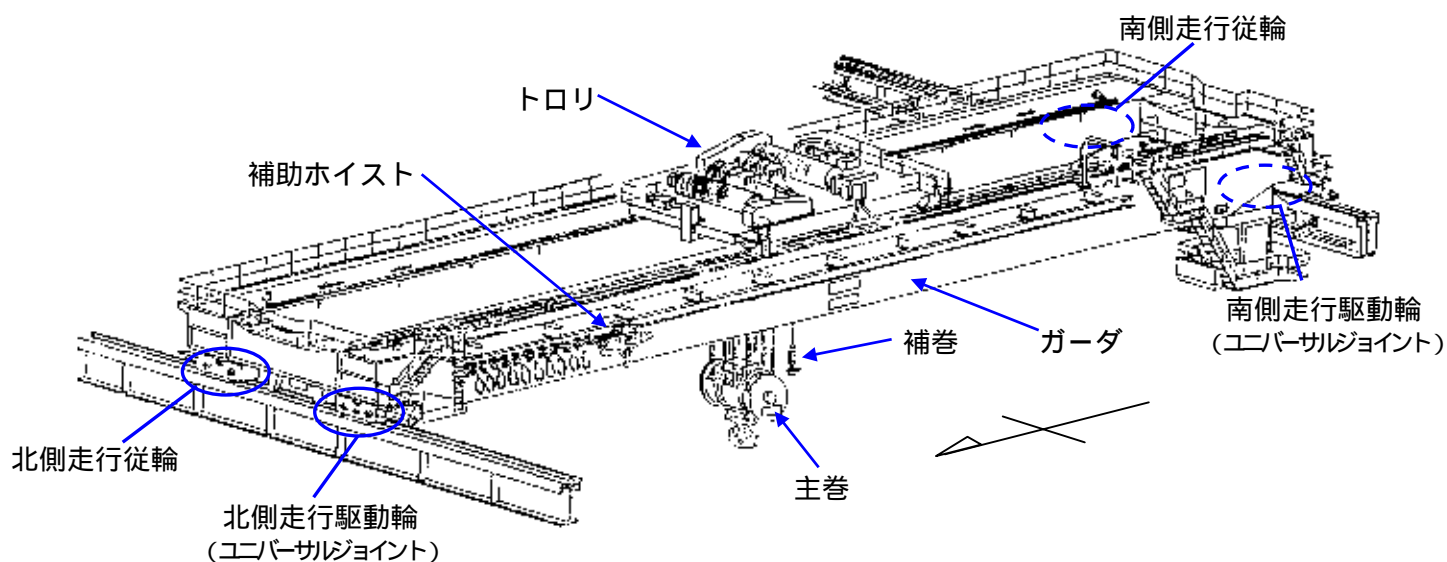
添 付 資 料

- 添付資料－ 1 : 原子炉建屋天井クレーン 仕様
- 添付資料－ 2 : 原子炉建屋天井クレーン停止位置及び全体写真
- 添付資料－ 3 : 原子炉建屋天井クレーン破損箇所
- 添付資料－ 4 : (1 / 5) ユニバーサルジョイント・クロスピン破損状況
(2 / 5) 北側車輪側 (北－S) クロスピン外観状況
(3 / 5) 南側車輪側 (南－S) クロスピン外観状況
(4 / 5) 南側電動機側 (南－G) クロスピン外観状況
(5 / 5) クロスピン浸透探傷検査状況
- 添付資料－ 5 : ユニバーサルジョイント破損要因分析
- 添付資料－ 6 : (1 / 7) ユニバーサルジョイント・クロスピン破損箇所
(2 / 7) 北側車輪側クロスピン天側 (北－S①) 破面観察
(3 / 7) 北側車輪側クロスピン地側 (北－S③) 破面観察
(4 / 7) 南側車輪側クロスピン天側 (南－S①) 破面観察
(5 / 7) 南側車輪側クロスピン地側 (南－S③) 破面観察
(6 / 7) 南側電動機側クロスピン天側 (南－G①) 破面観察
(7 / 7) 南側電動機側クロスピン地側 (南－G③) 破面観察
- 添付資料－ 7 : ユニバーサルジョイントの破断強度評価
- 添付資料－ 8 : 断面マクロ組織観察結果
- 添付資料－ 9 : 金属調査 (引張試験・化学成分分析・硬さ測定)
- 添付資料－ 10 : 走行車輪・レール摺動痕
- 添付資料－ 11 : 減速機・電動機・ブレーキ外観状況
- 添付資料－ 12 : 脱線防止ラグ外観状況
- 添付資料－ 13 : ユニバーサルジョイント・クロスピン点検結果

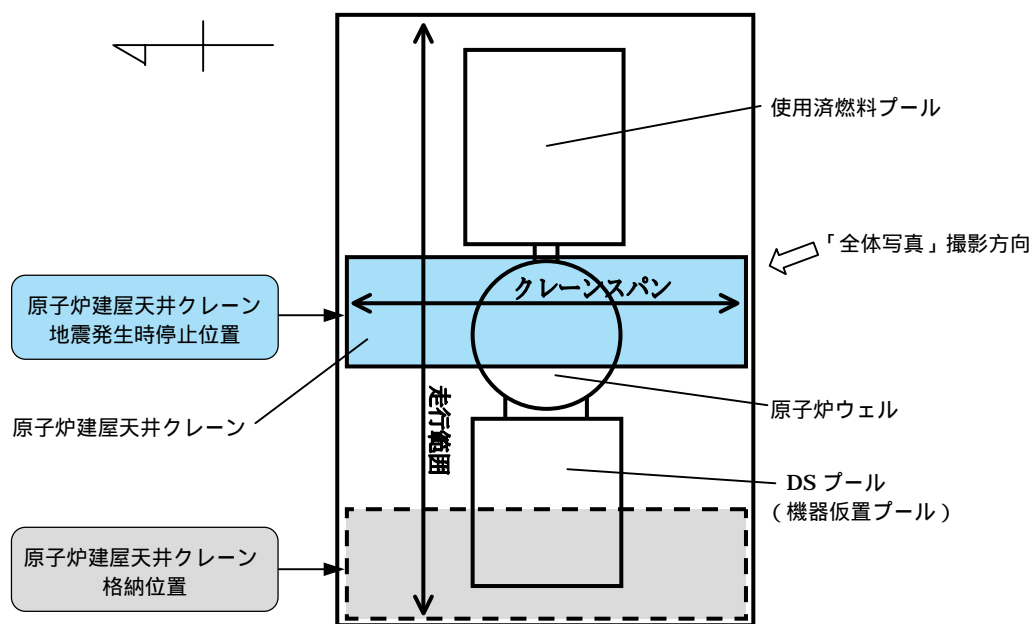
原子炉建屋天井クレーン 仕様

| | | |
|---------|-------------------------------------|-------|
| 名称 | 原子炉建屋クレーン | |
| 種類 | 天井走行式 | |
| 定格荷重 | 主巻 | 150 t |
| | 補巻 | 5 t |
| 総重量 | 約310 t | |
| クレーンスパン | 約35 m (南北方向) | |
| 走行範囲 | 約45 m (東西方向) | |
| 耐震クラス | Bクラス (基準地震動 S_1 に対し落下しないことを確認) | |

| 走行装置 | 北側 | 南側 |
|-----------------------|---------------------|---------------------|
| 走行車輪 | 走行駆動輪：2輪 走行従輪：2輪 | 走行駆動輪：2輪 走行従輪：2輪 |
| 駆動用電動機 | 1台 | 1台 |
| ユニバーサルジョイント | 1個 | 1個 |
| クロスピン (材質：SCM420H) | 2個 | 2個 |



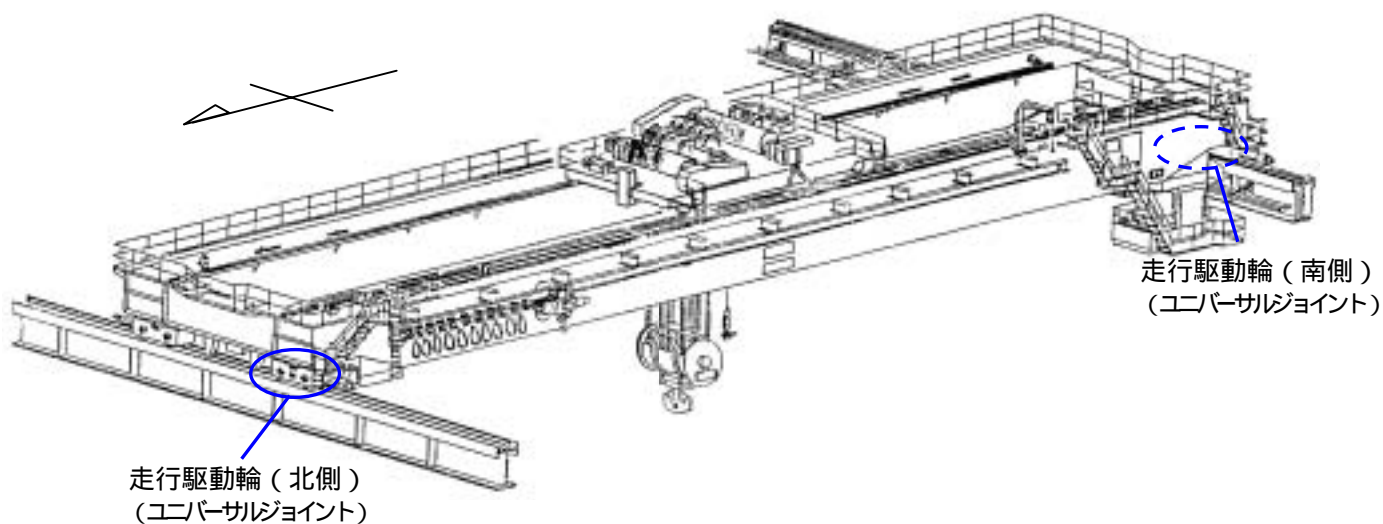
原子炉建屋天井クレーン外観図



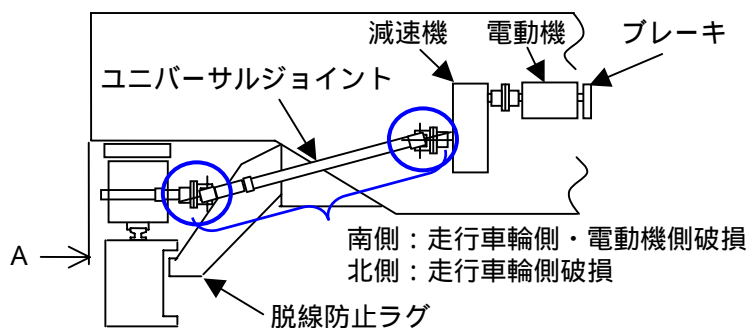
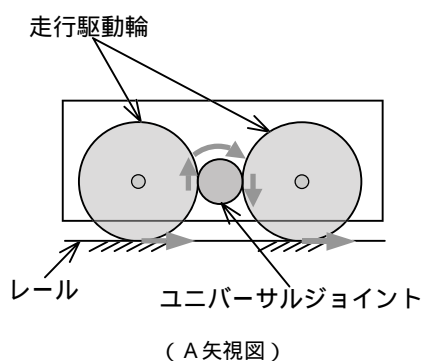
原子炉建屋天井クレーン停止位置



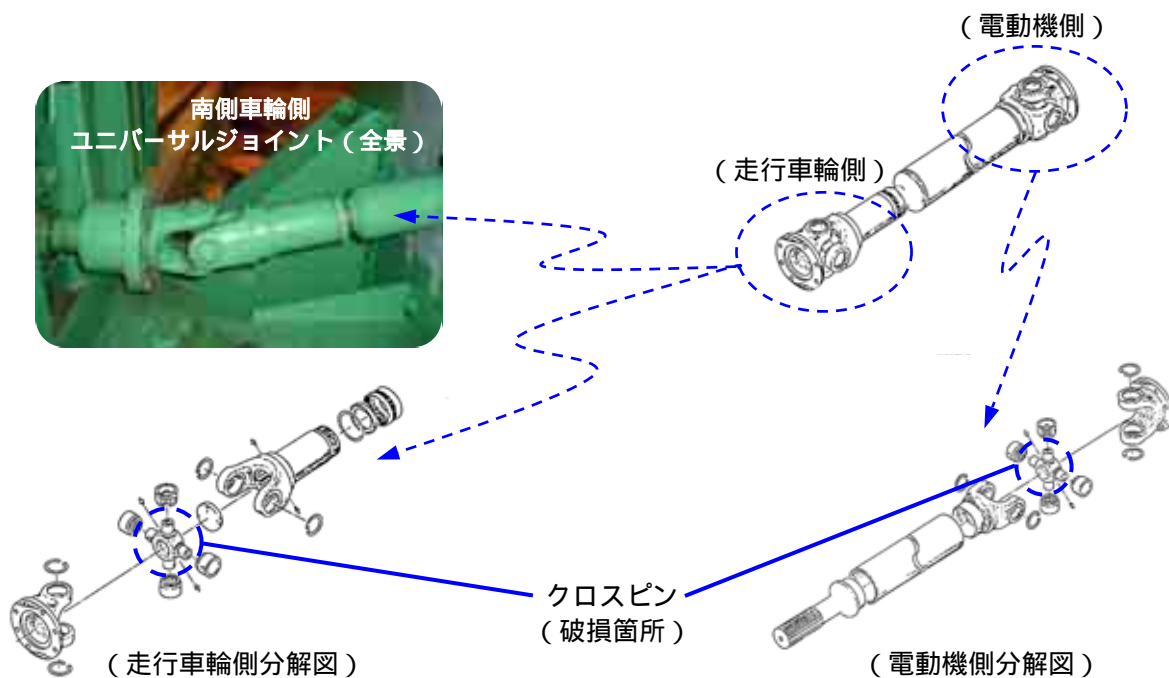
原子炉建屋天井クレーン全体写真



【原子炉建屋天井クレーン外観図】

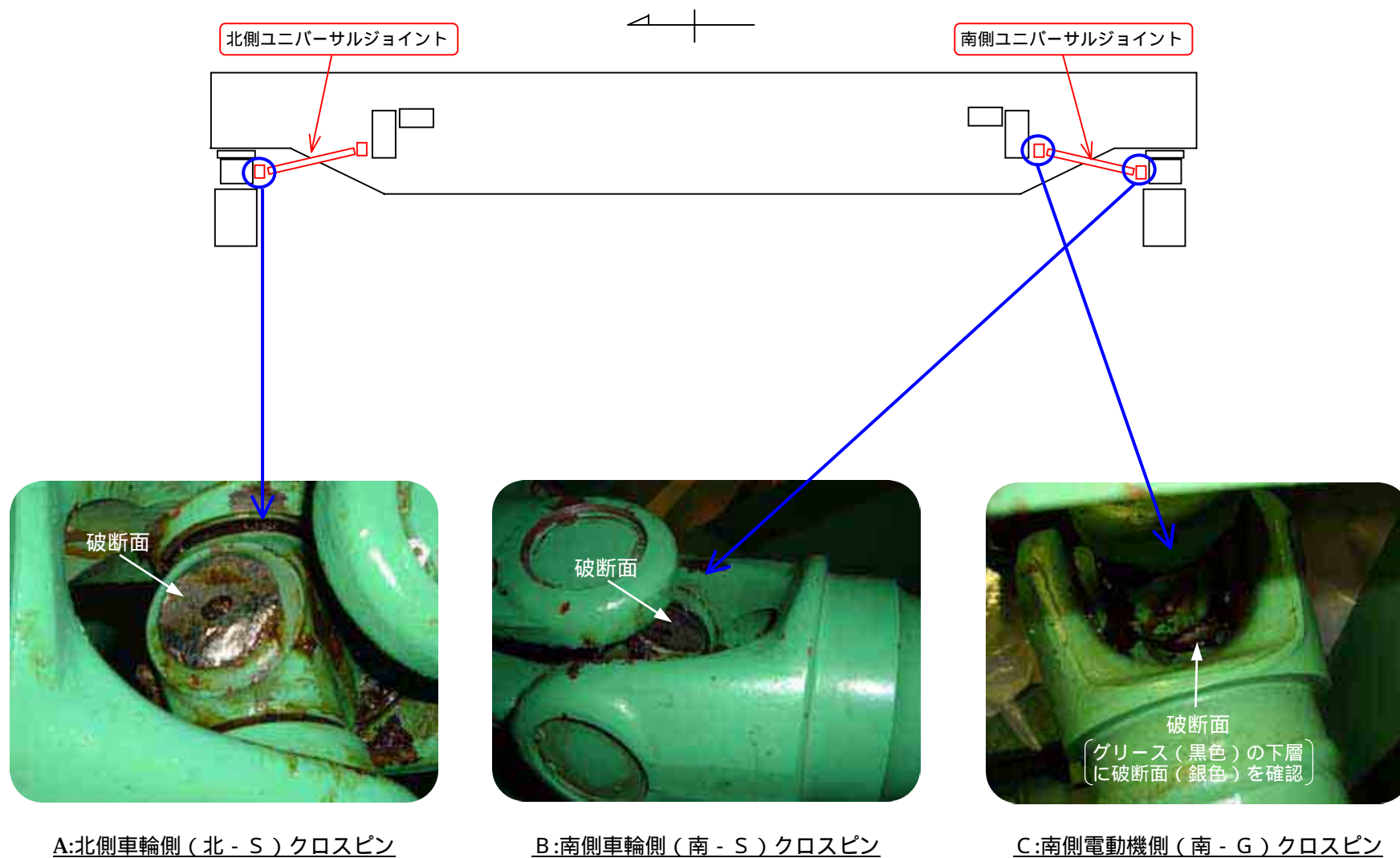


【走行装置模式図】

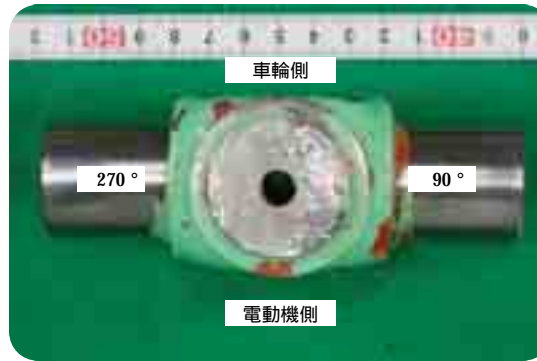
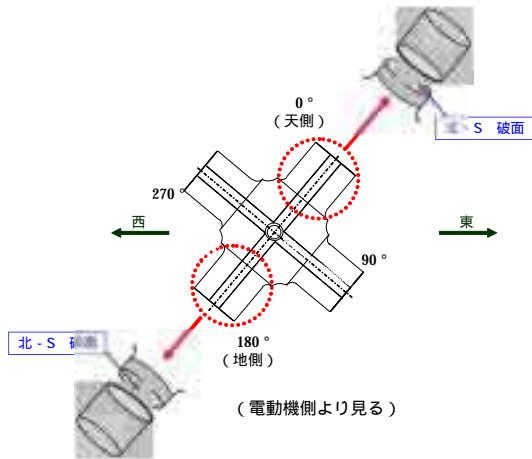


【ユニバーサルジョイント分解図】

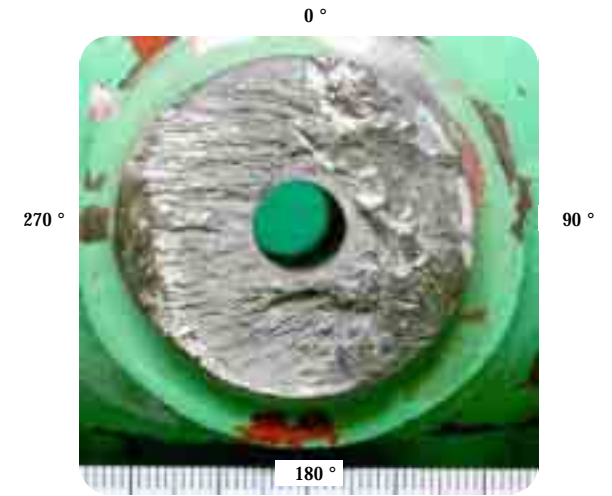
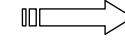
原子炉建屋天井クレーン破損箇所



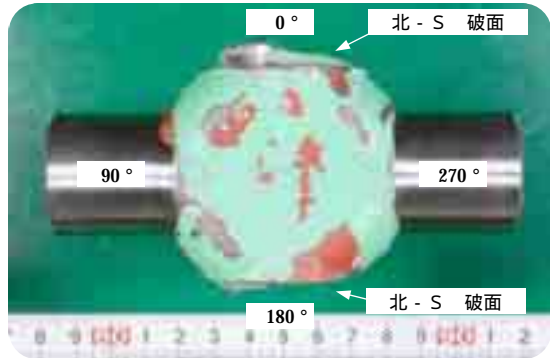
ユニバーサルジョイント・クロスピン破損状況



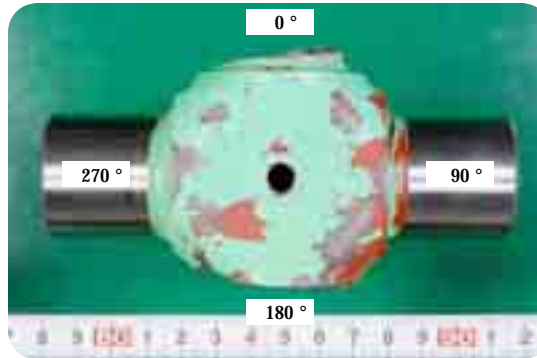
北-S 破面 (天側 (0° 側) より見る)



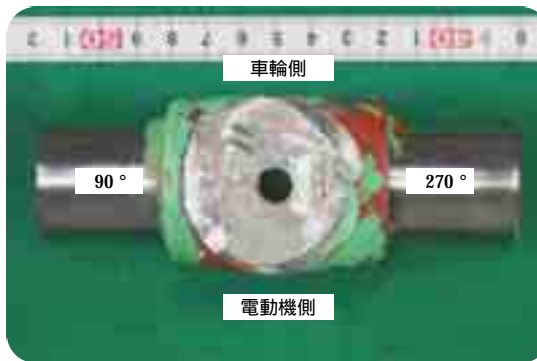
北-S 破面 (拡大)



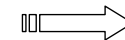
(車輪側より見る)



(電動機側より見る)

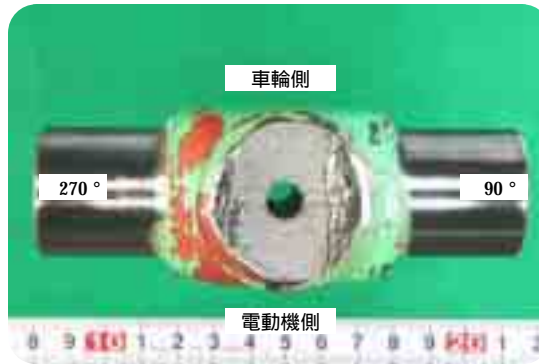
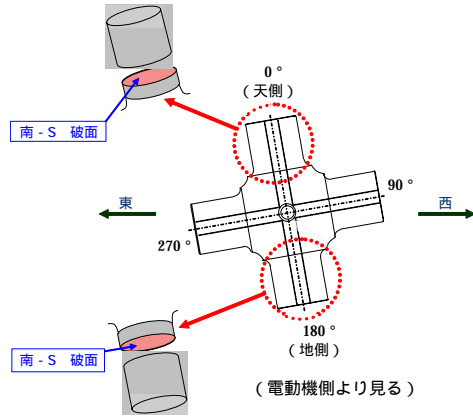


北-S 破面 (地側 (180° 側) より見る)

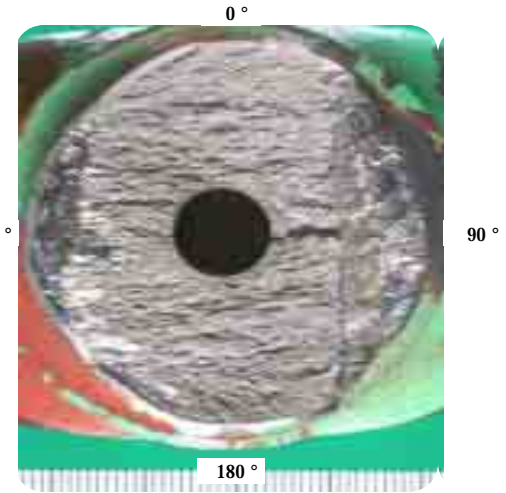


北-S 破面 (拡大)

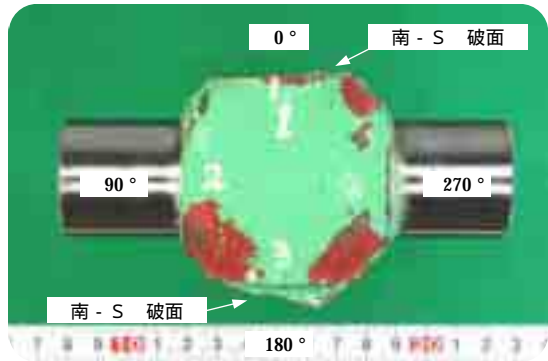
北側車輪側 (北-S) クロスピン外観状況



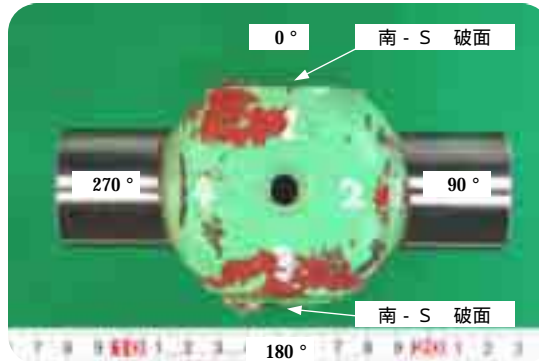
南 - S 破面 (天側 (0° 側) より見る)



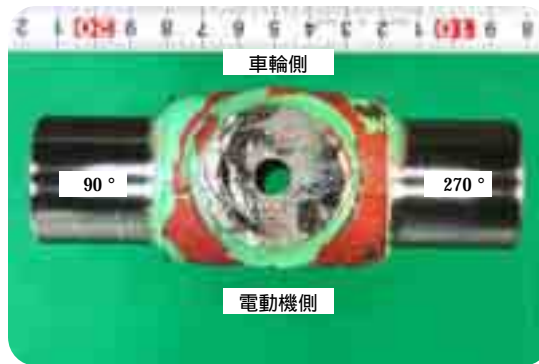
南 - S 破面 (拡大)



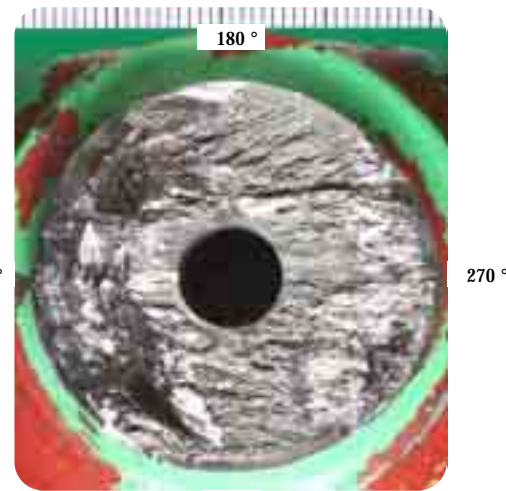
(車輪側より見る)



(電動機側より見る)

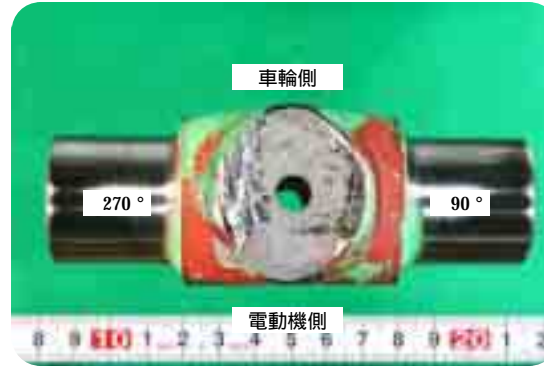
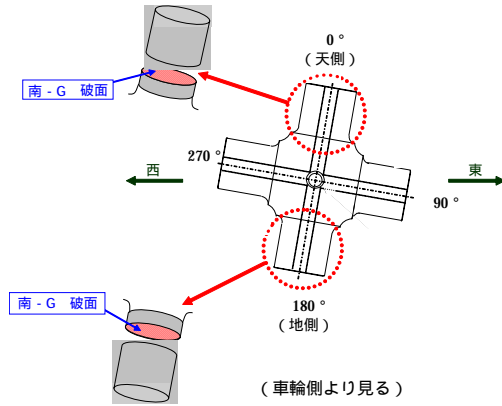


南 - S 破面 (地側 (180° 側) より見る)

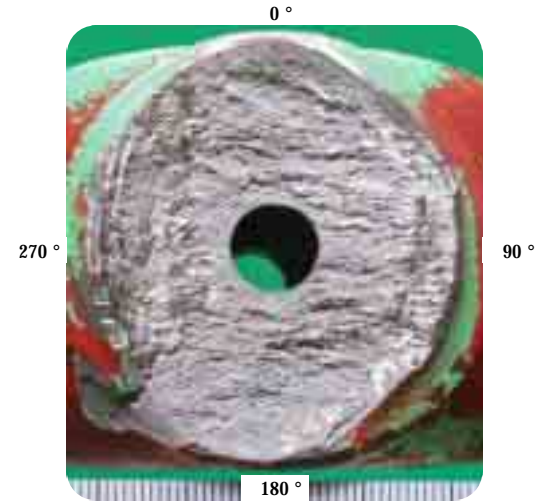


南 - S 破面 (拡大)

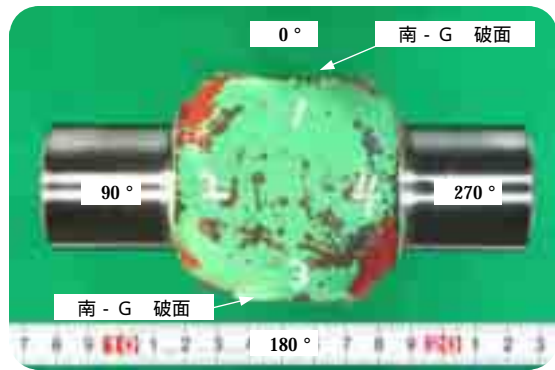
南側車輪側 (南 - S) クロスピン外観状況



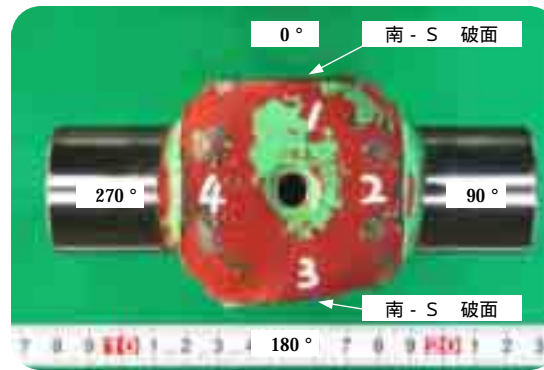
南 - G 破面 (天側 (0° 側) より見る)



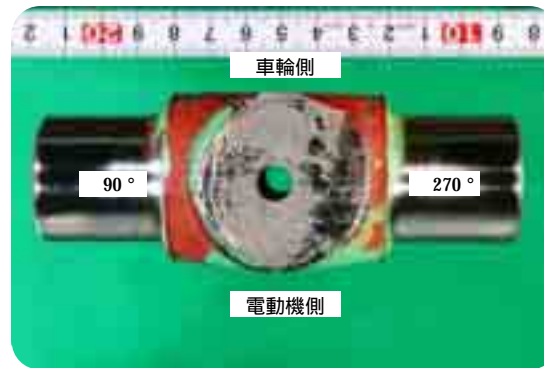
南 - G 破面 (拡大)



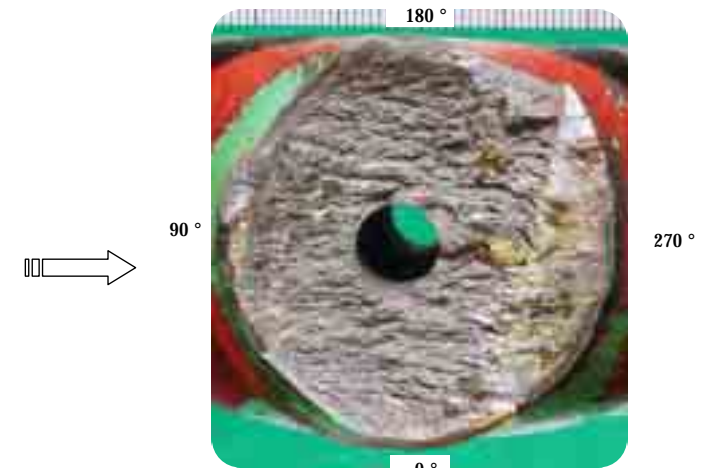
(車輪側より見る)



(電動機側より見る)

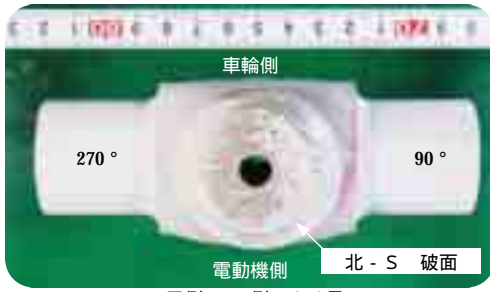


南 - G 破面 (地側 (180° 側) より見る)

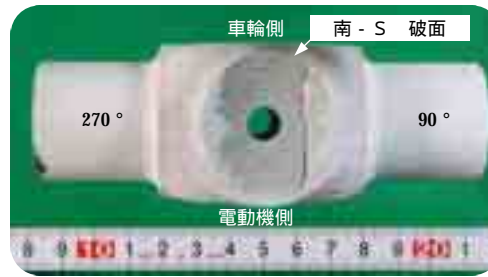


南 - G 破面 (拡大)

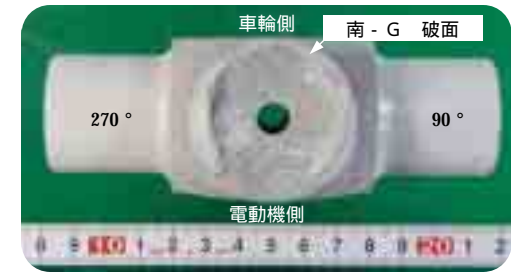
南側電動機側 (南 - G) クロスピン外観状況



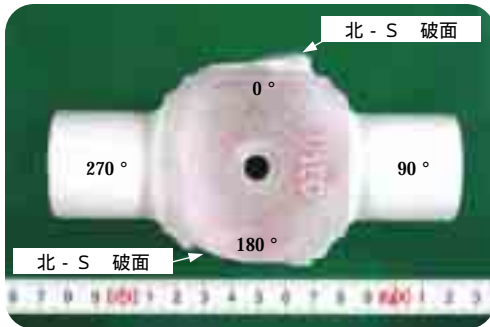
A. 天側 (0°側) より見る



A. 天側 (0°側) より見る



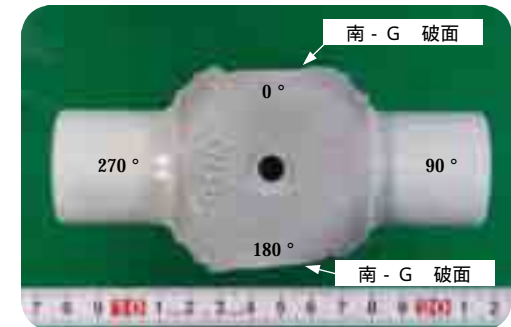
A. 天側 (0°側) より見る



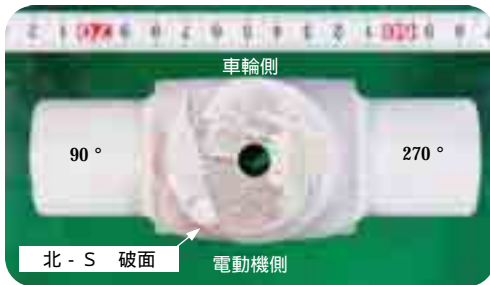
B. 電動機側より見る



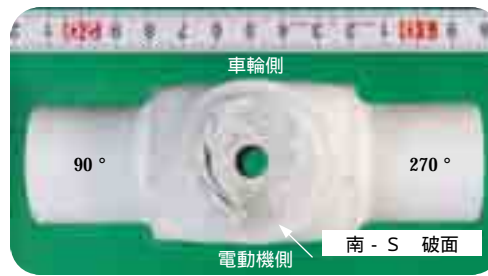
B. 電動機側より見る



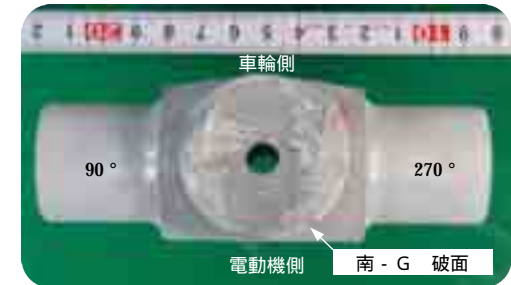
B. 電動機側より見る



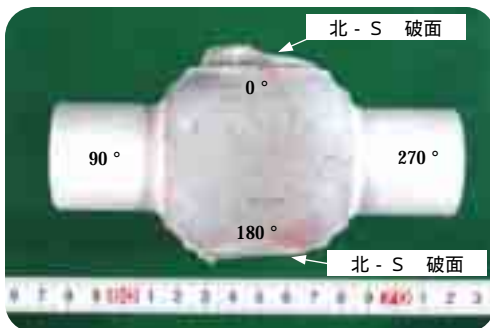
C. 地側 (180°側) より見る



C. 地側 (180°側) より見る

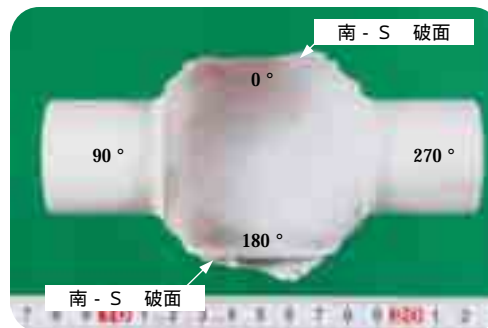


C. 地側 (180°側) より見る



D. 車輪側より見る

北側車輪側 (北 - S) クロスピン



D. 車輪側より見る

南側車輪側 (南 - S) クロスピン



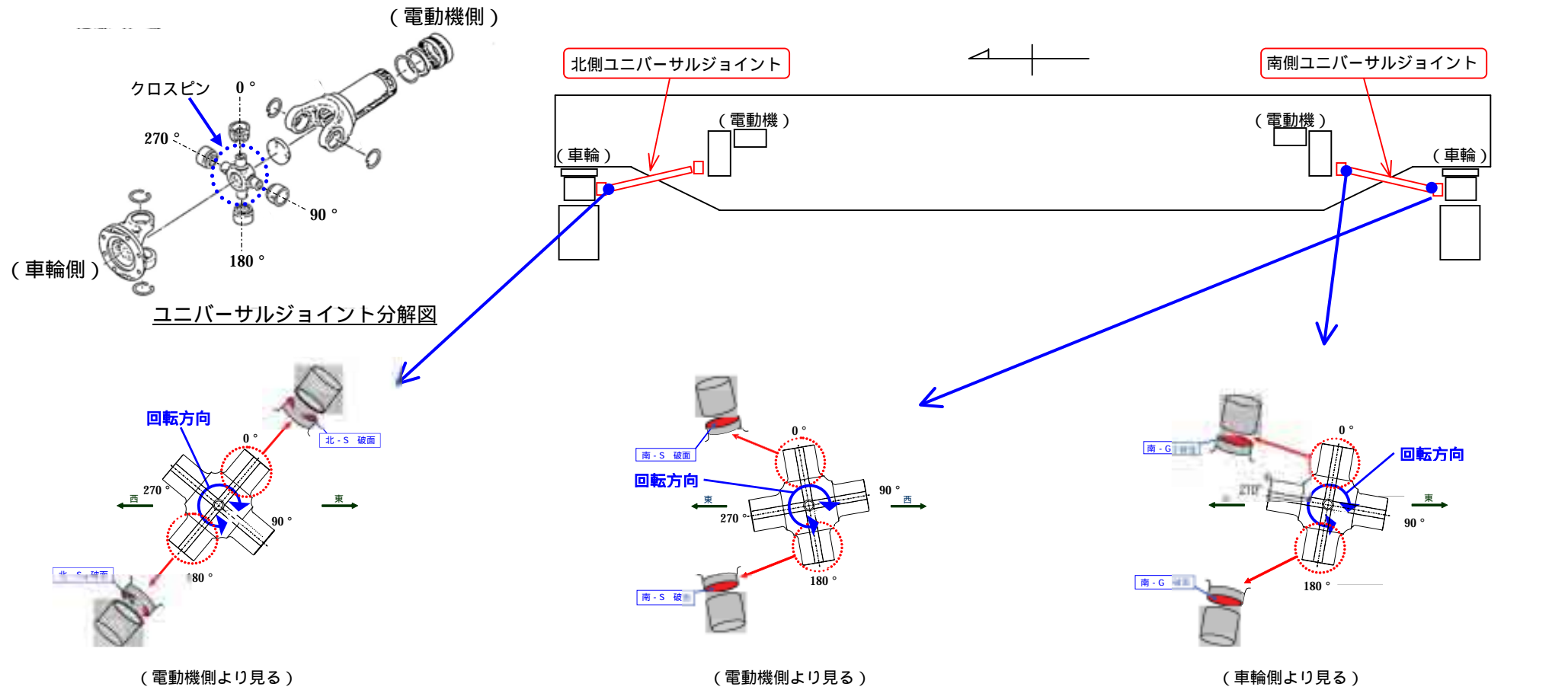
D. 車輪側より見る

南側電動機側 (南 - G) クロスピン

クロスピン浸透探傷検査状況

ユニバーサルジョイント破損要因分析

| 事象 | 要因 1 | 要因 2 | 調査項目 | 検討結果 | 評価 | | | |
|------------------------|-------|--------------|---------------------------------|--|--|---|--------|--------|
| ユニバーサルジョイント クロスピン破損 | 使用環境面 | 軸/ベアリング間の摩耗 | 本文6.1 (1) (2) 天井クレーンの点検 使用状況 | 定期点検にて異常は認められておらず、地震当日もクレーンを使用しており、異常は確認されていない。 | × | - | | |
| | | | 本文6.1 (3) a 金属調査 (外観観察) | 外観観察の結果、有意な磨耗は認められなかった。 | × | 添付資料-4 | | |
| | | | 腐食 | 本文6.1 (1) (2) 天井クレーンの点検 使用状況 | 定期点検にて異常は認められておらず、地震当日もクレーンを使用しており、異常は確認されていない。 | × | - | |
| | | | | 本文6.1 (3) a 金属調査 (外観観察) | 外観観察の結果、腐食は認められなかった。 | × | 添付資料-4 | |
| | | ベアリング部への異物混入 | 本文6.1 (1) (2) 天井クレーンの点検 使用状況 | 定期点検にて異常は認められておらず、地震当日もクレーンを使用しており、異常は確認されていない。 | × | - | | |
| | | | 本文6.1 (3) a 金属調査 (外観観察) | 外観観察の結果、異物の噛み込み痕は確認されなかった。 | × | 添付資料-4 | | |
| | | 繰り返し荷重 (疲労) | 本文6.1 (1) (2) 天井クレーンの点検 使用状況 | 定期点検にて異常は認められておらず、地震当日もクレーンを使用しており、異常は確認されていない。 | × | - | | |
| | | | 本文6.1 (3) b 金属調査 (破面観察) | 破面観察の結果から疲労が原因と思われる破面は認められなかった。 | × | 添付資料-6 | | |
| | | 設計面 | 構造 | 設計選定ミス | 本文6.2 (1) 設計確認 | クレーンの走行性能から決定される電動機の最大トルクに対し、軸径が設計強度に対して十分な強度を有していることを確認した。 | × | 添付資料-7 |
| | | | 材料 | 材料内在欠陥 | 本文6.2 (2) a 金属調査 (断面マクロ観察) | クロスピン断面マクロ観察の結果では、クロススの内部及び表面に割れ等の欠陥は認められなかった。 | × | 添付資料-8 |
| | | | | 材質の相違 | 本文6.2 (2) b 金属調査 (化学成分分析) | クロスピンの化学成分分析の結果、材料の化学分析はSCM 420HのJIS上の規格値を満足していることが確認された。 | × | 添付資料-9 |
| | | | | 強度不足 | 本文6.2 (2) c 金属調査 (引張試験) | クロスピン材母層より採取した試験片での引張試験結果では、引張強さは概ね1000N / mmであり、十分な強度を有していた。 | × | 添付資料-9 |
| | 加工 | | 形状加工不良 (加工傷等) | 本文6.2 (1) 設計確認 | 出荷時には外観点検を実施していることから、加工不良による強度不足は考えにくい。 | × | - | |
| | | | | 本文6.2 (2) d 金属調査 (外観観察) | 外観観察の結果、破断部は破断面同士が接触したことによると考えられる潰れが多いが、一部潰れていない破面には加工不良と思われる有意なキズは認められなかった。 | × | 添付資料-4 | |
| | | | 焼き入れ加工不良 | 本文6.2 (2) e 金属調査 (硬さ測定) | クロスピンの硬さ測定の結果、材料表面には浸炭処理による硬化領域が見られ、表面硬さ(550HV以上)および有効浸炭深さ(約1.0mm)に、異常のないことが確認された。 | × | 添付資料-9 | |
| | 組立 | | 組立不良 | 本文6.2 (3) 天井クレーンの点検 使用状況 | 定期点検にて異常は認められておらず、地震当日もクレーンを使用しており、異常は確認されていない。 | × | - | |
| | 地震荷重 | 走行方向地震荷重 | 本文6.3 (1) 金属調査 (外観 破面観察) | 破面観察の結果、大きな荷重による強制的な延性破断の様相を示すディンプル模様等が確認された。また、破壊の進行方向がユニバーサルジョイントのトルク方向と一致することが確認された。(走行レールの摺動痕あり) | | 添付資料-6 | | |
| | | | 本文6.3 (2) 地震荷重評価 | 地震時の車輪からの摩擦トルクにより、強度上損傷する可能性があることを確認した。 | | 添付資料-7 添付資料-10 | | |
| | | 横行方向地震荷重 | 本文6.3 (2) 地震荷重評価 | ユニバーサルジョイントに生じる応力は小さい。 | × | - | | |
| | | 上下方向地震荷重 | 本文6.3 (2) 地震荷重評価 | ユニバーサルジョイントに生じる応力は小さい。 | × | - | | |



北側車輪側 (北 - S) クロスピン

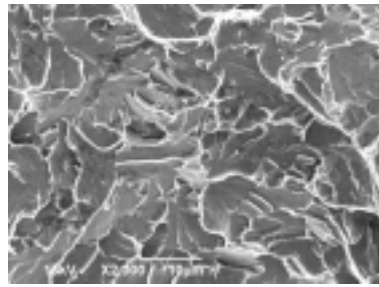
南側車輪側 (南 - S) クロスピン

南側電動機側 (南 - G) クロスピン

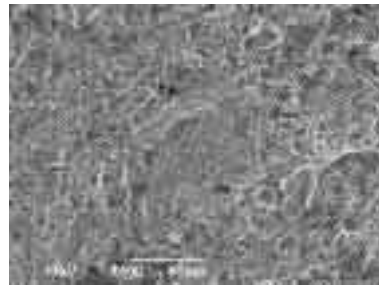
ユニバーサルジョイント・クロスピン破損箇所



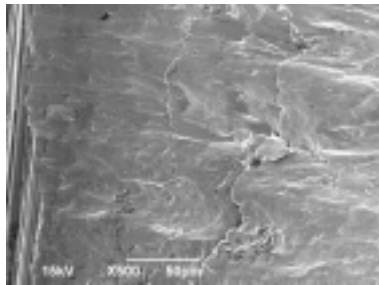
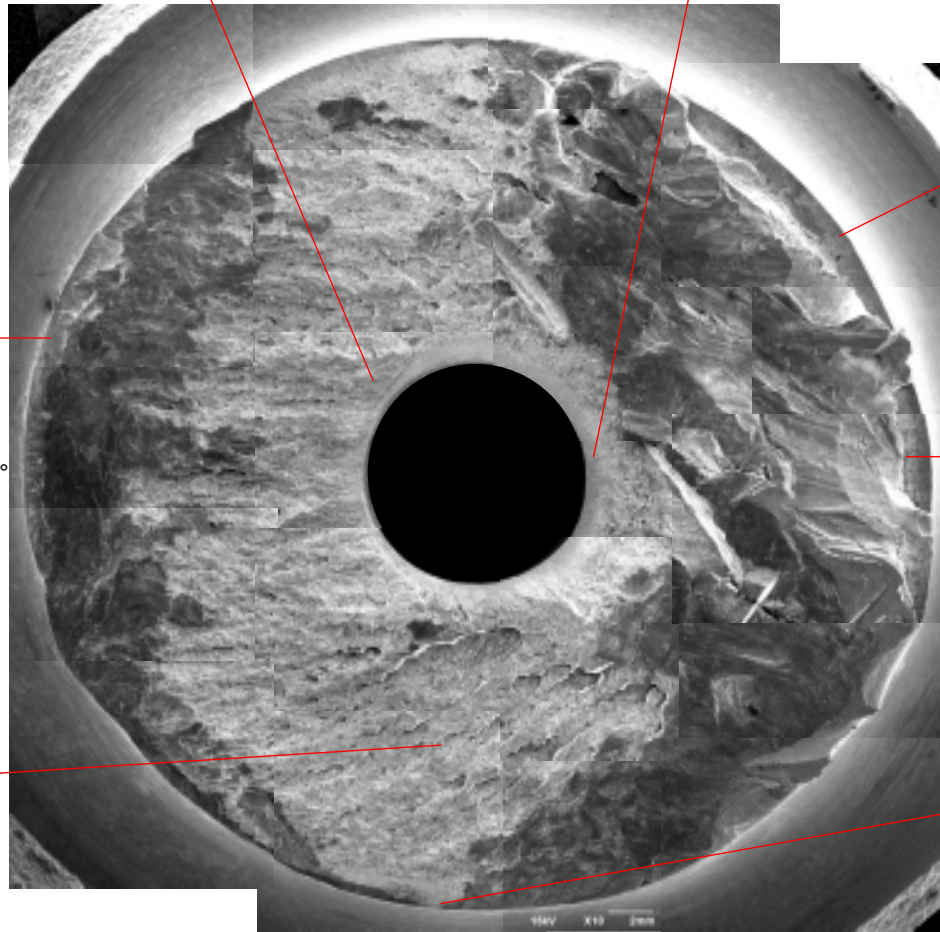
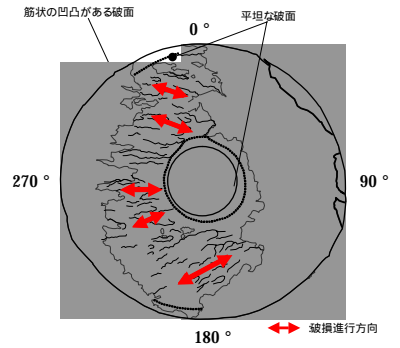
北 - S 破面の外観様相



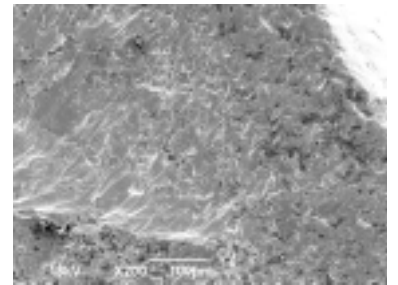
擬へき開破面



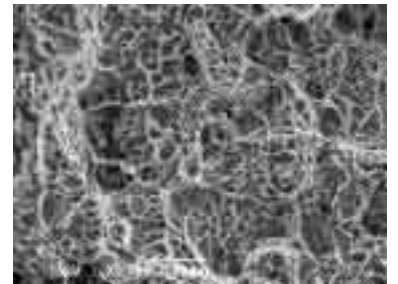
粒界状の様相



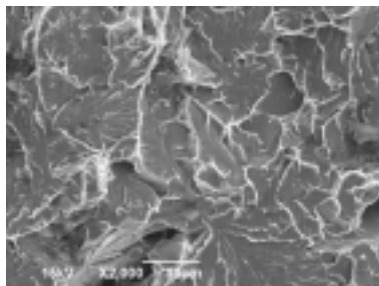
潰れた様相



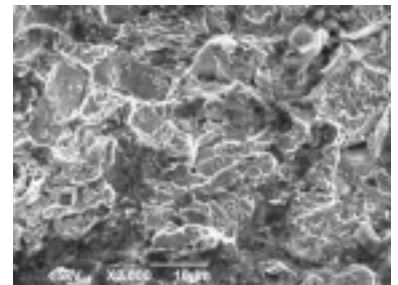
潰れた様相



ディンプル模様

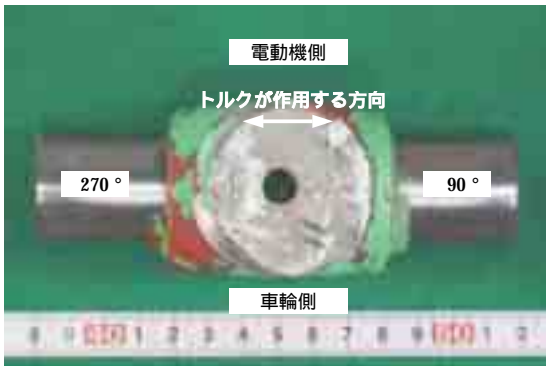


擬へき開破面

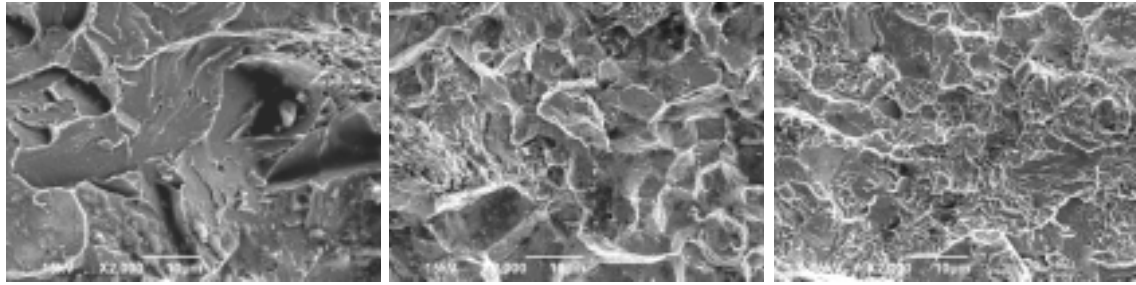


粒界状の様相

北側車輪側クロスピン天側 (北 - S) 破面観察



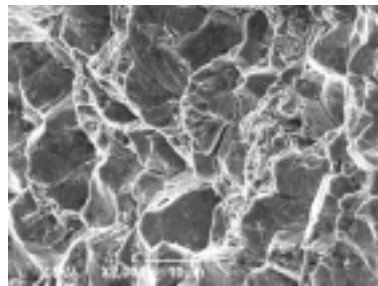
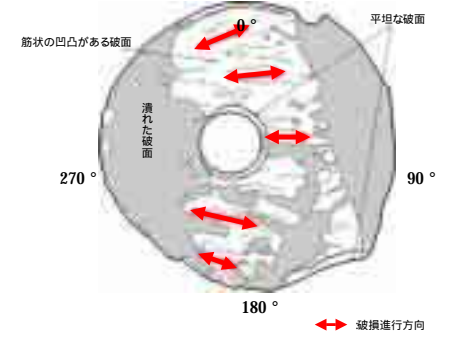
北 - S 破面の外観様相



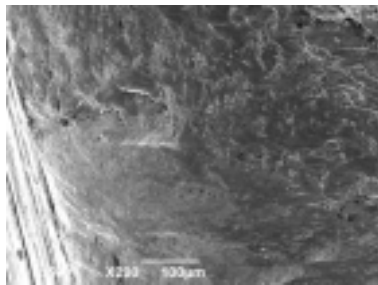
擬へき開破面

粒界状の様相

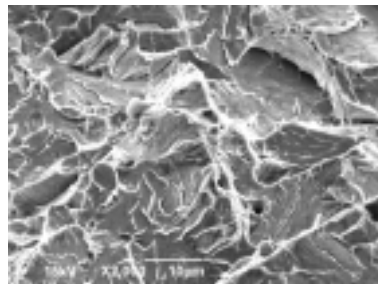
粒界状の様相



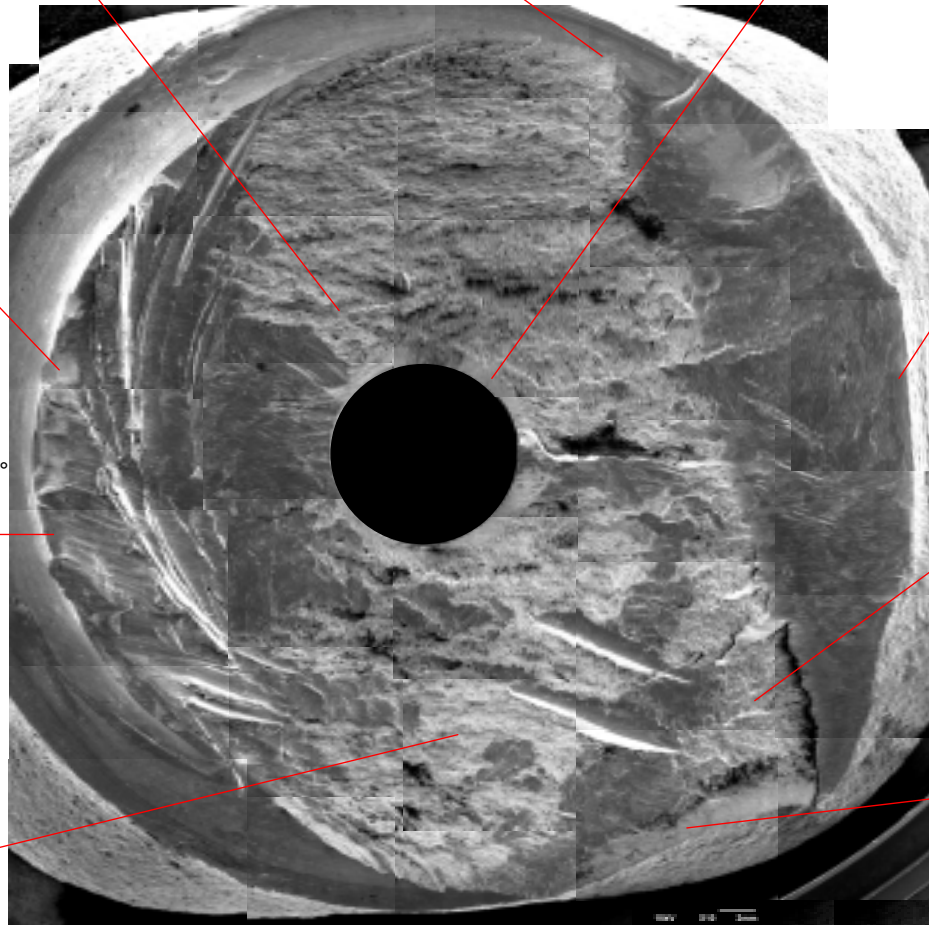
粒界状の様相



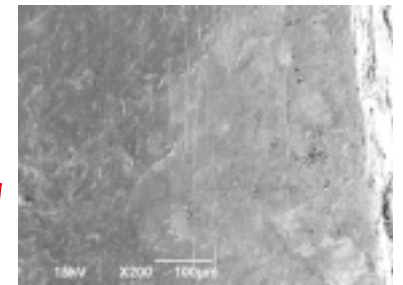
潰れた様相



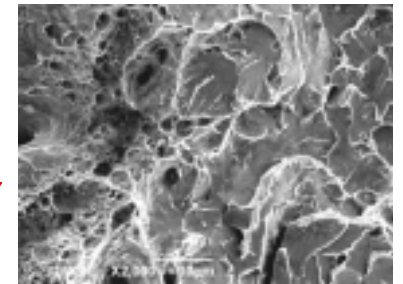
擬へき開破面



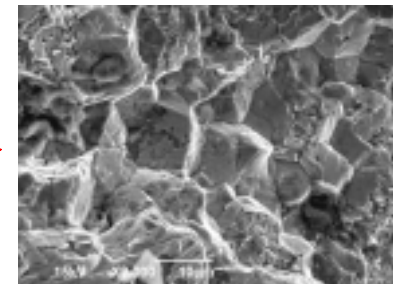
180°



潰れた様相

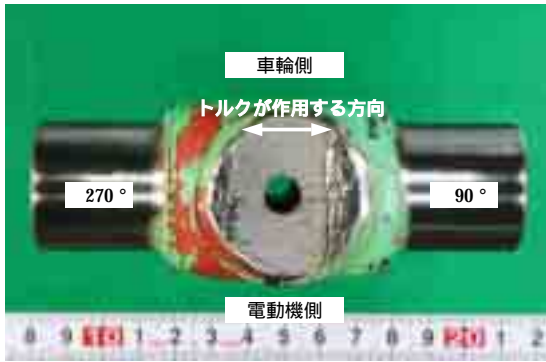


ディンプル模様 / 擬へき開破面

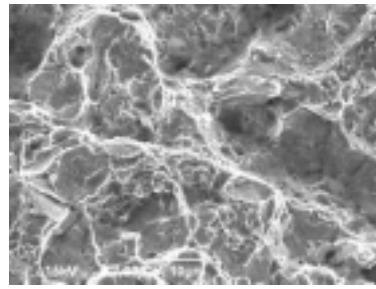


粒界状の様相

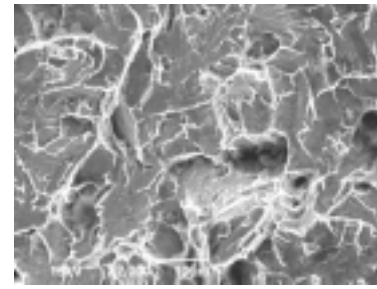
北側車輪側クロスピン地側 (北 - S) 破面観察



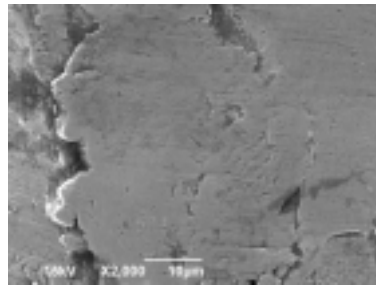
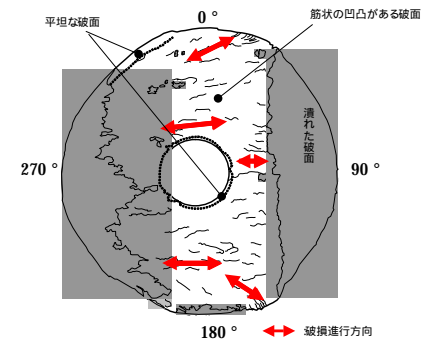
南 - S 破面の外観様相



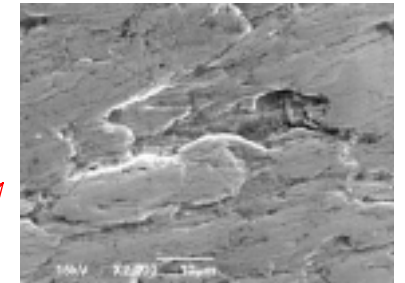
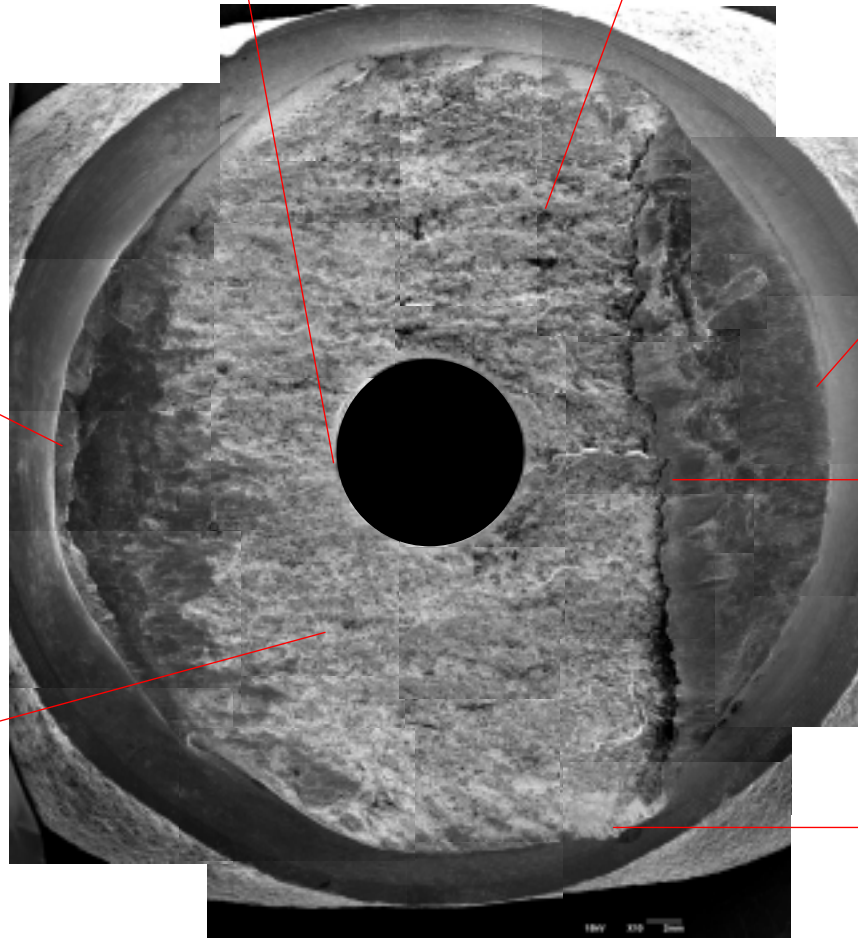
粒界状の様相



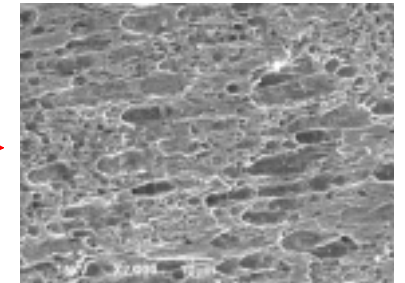
擬へき開破面



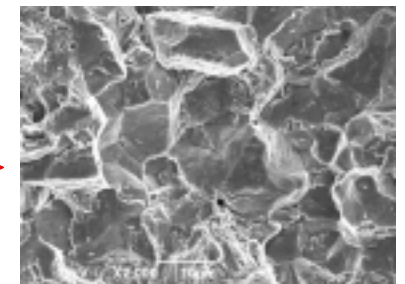
潰れた様相



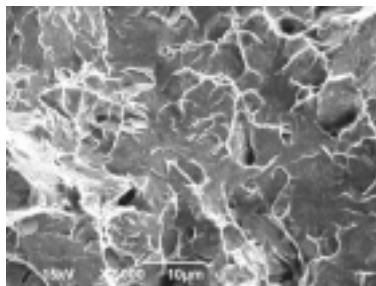
潰れた様相



ディンプル模様

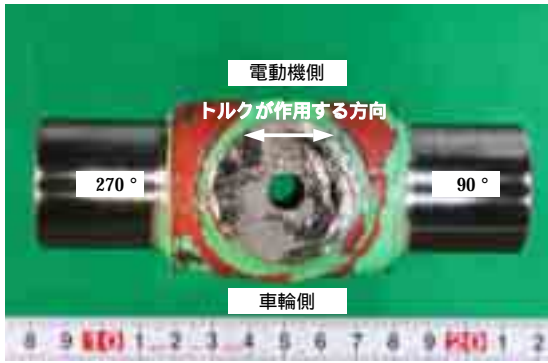


粒界状の様相

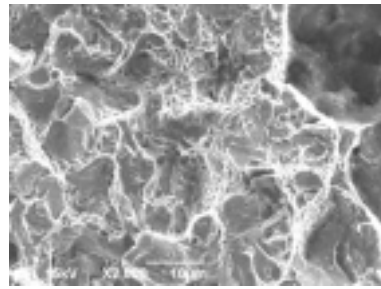


擬へき開破面

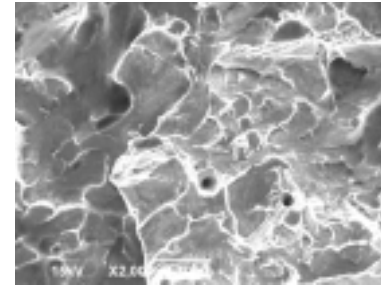
南側車輪側クロスピン天側 (南 - S) 破面観察



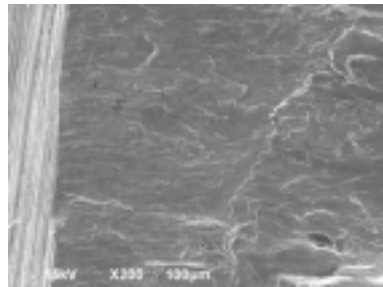
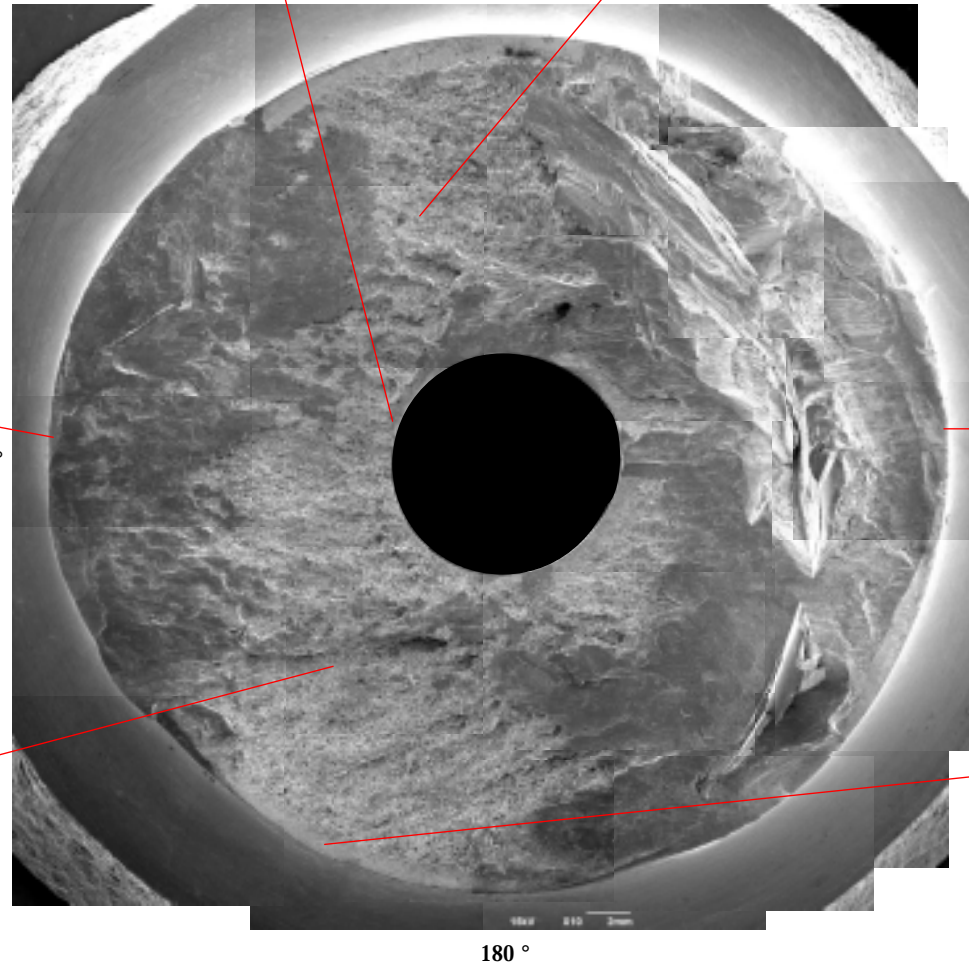
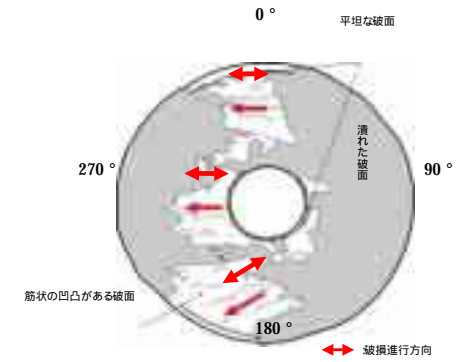
南 - S 破面の外観様相



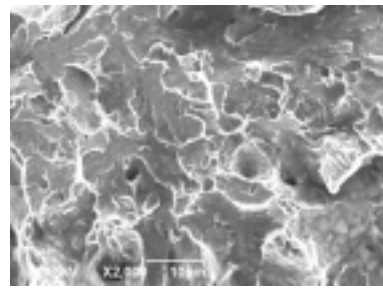
粒界状の様相



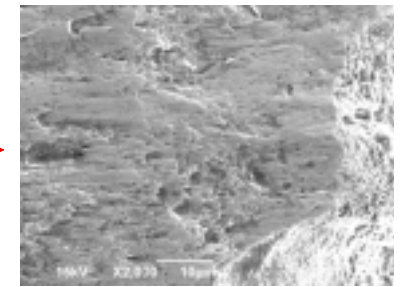
擬へき開破面



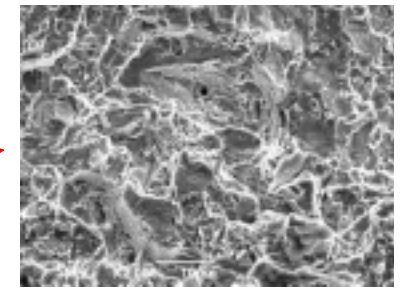
潰れた様相



擬へき開破面

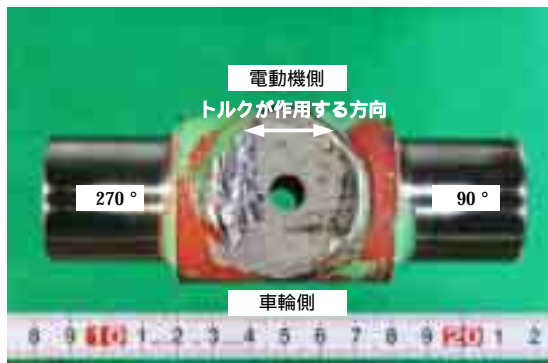


潰れた様相

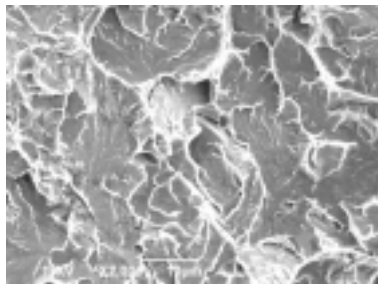


粒界状の様相

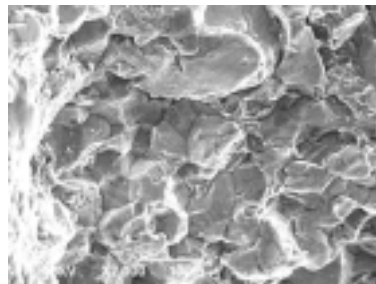
南側車輪側クロスピン地側 (南 - S) 破面観察



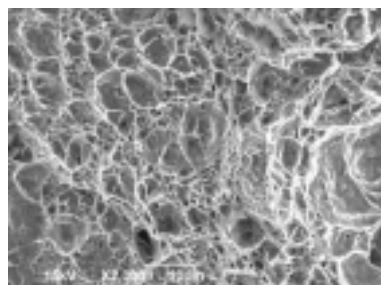
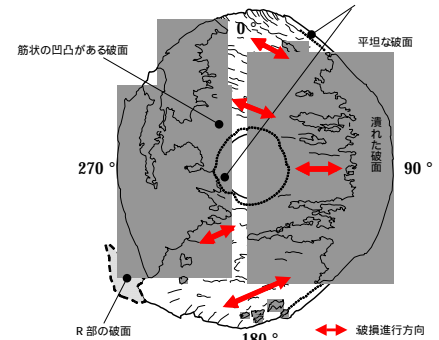
南 - G 破面の外観様相



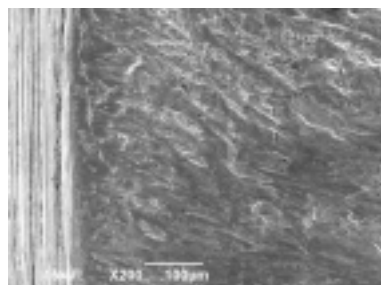
擬へき開破面



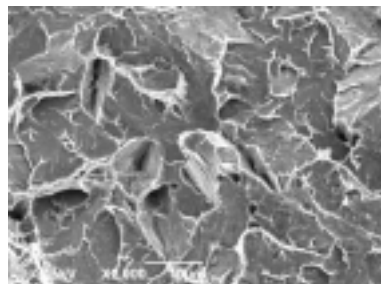
粒界状の様相



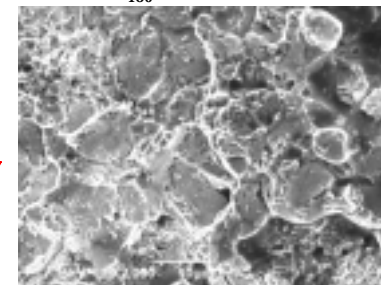
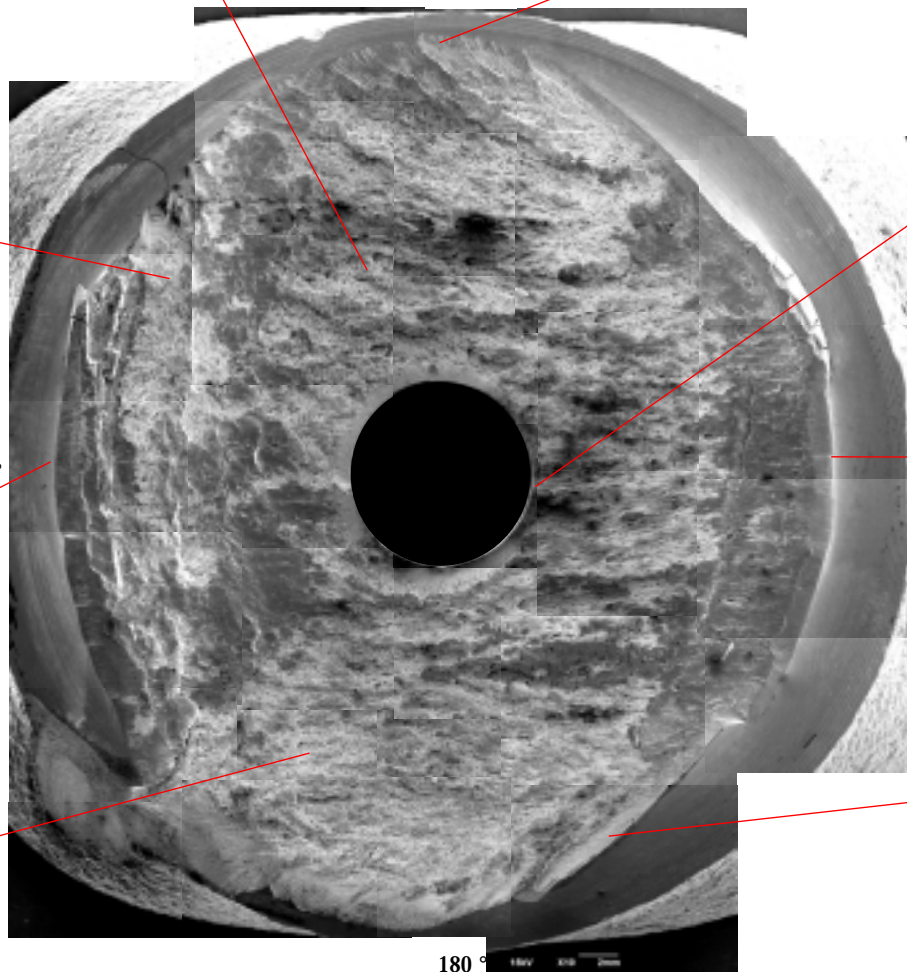
ディンプル模様



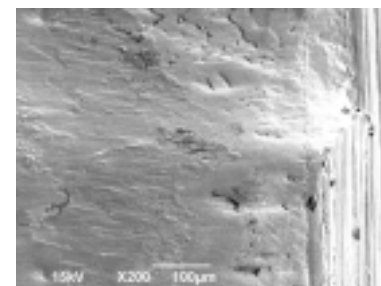
潰れた様相



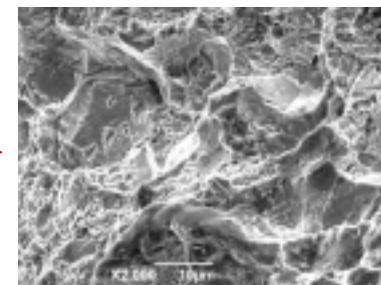
擬へき開破面



粒界状の様相

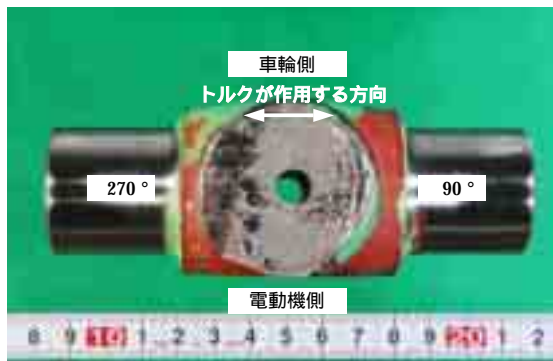


潰れた様相

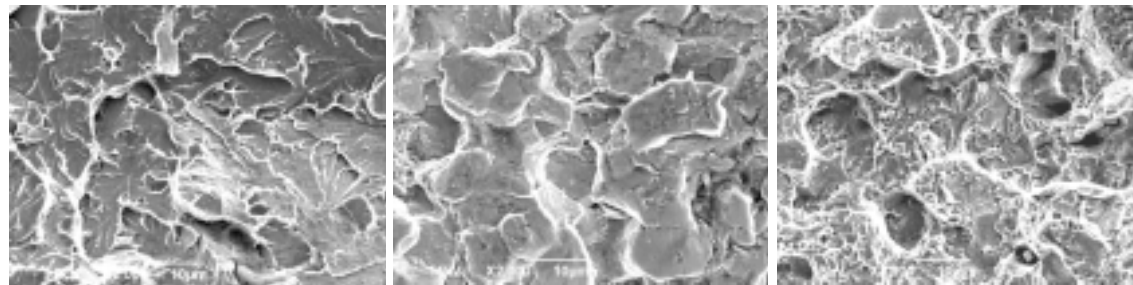


粒界状の様相

南側電時側クロスピン天側 (南 - G) 破面観察



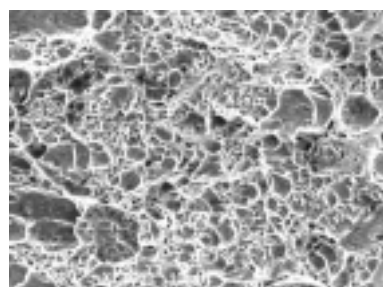
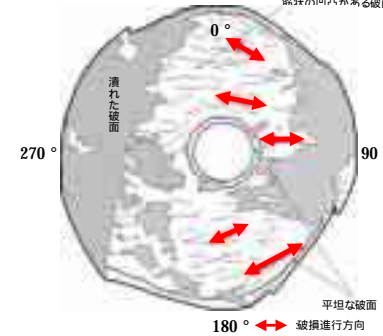
南 - G 破面の外観様相



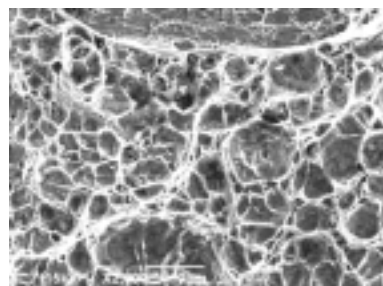
擬へき開破面

粒界状の様相

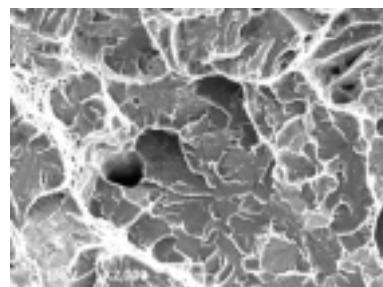
粒界状の様相



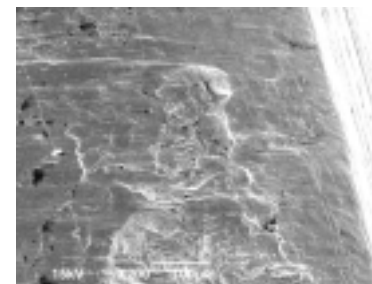
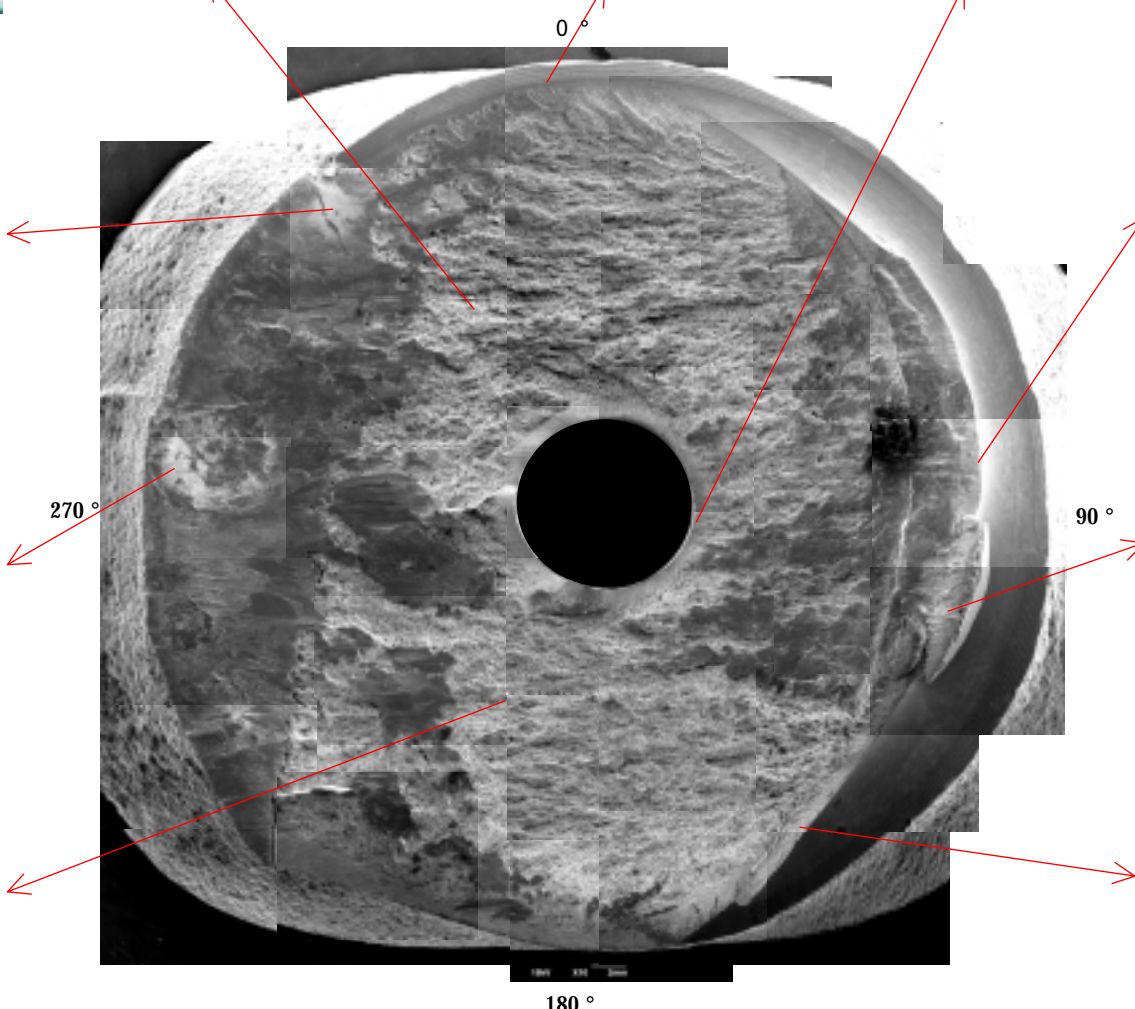
ディンプル模様



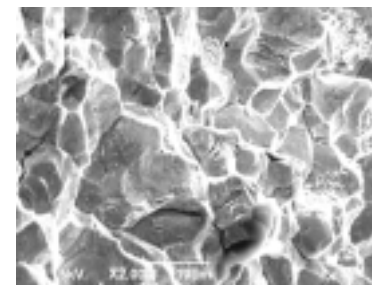
ディンプル模様



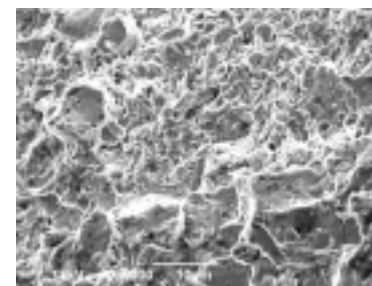
擬へき開破面



潰れた様相



粒界状の様相



粒界状の様相

南側電動機側クロスピン地側 (南 - G) 破面観察

ユニバーサルジョイントの破断強度評価（常用時）

ユニバーサルジョイントのクロスピンに加わる常用時のトルクは電動機のトルクによって決まる。

電動機最大トルク T_m 5084 N・m

応力集中係数 1.52¹

$$\text{断面係数 } Z = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_o^4 - d_i^4}{d_o} = 5.417 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

(d_o : ピン外径 38.13mm d_i : ピン内径 10mm)

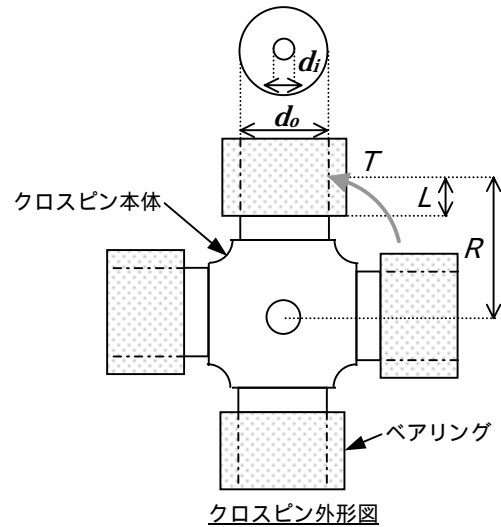
荷重作用半径 R 0.05750 m

モーメントアーム L 0.02050 m

$$\text{クロスピンに加わる応力 } \sigma_s \text{ は、} \sigma_s = \frac{L}{R} \cdot \frac{T}{2 \cdot Z} \cdot \alpha$$

より $\sigma_s = 254 \text{ N/mm}^2$ となる。

クロスピン材質である「SCM420H」の引張強さ(σ_{cs})はJISより930 N/mm²以上となっており、 $\sigma_s < \sigma_{cs}$ であることから、常用時にユニバーサルジョイント（クロスピン）に引張強さ以上の応力は加わらず、強度上の問題はない。



クロスピン外形図

ユニバーサルジョイントと破断強度評価（片側回転拘束時）

走行車輪にブレーキが掛けられクレーン本体が停止している状態で地震動が作用した場合、ユニバーサルジョイントは電動機側のブレーキにより回転が拘束されている一方で、クレーン走行方向（東西方向）の地震動により、走行車輪に回転方向のトルクが作用する。

この際にユニバーサルジョイントに加わるトルクは、クレーン本体の自重 m (31000 kg) により車輪をレールに押し付ける力及び車輪とレールの摩擦によって決まる。

走行車輪 1 隅（車輪 2 個）当たりの押し付け力 W (自重の 4 分の 1)

$$W = m \div 4 \times 9.807 \text{ (重力加速度)} = 760100 \text{ N}$$

車輪部摩擦係数 μ 0.30²

走行車輪半径 R_w 0.40 m

走行車輪ギア基準ピッチ半径 R_g 0.40 m

車輪ピニオン基準ピッチ半径 r 0.085 m

ユニバーサルジョイントに加わるトルク T は

$$T = 2 \cdot \mu \cdot \frac{W}{2} \cdot R_w \cdot \frac{r}{R_g} \cdot \frac{r}{R_g}$$

より $T = 19390 \text{ N} \cdot \text{m}$ となる。

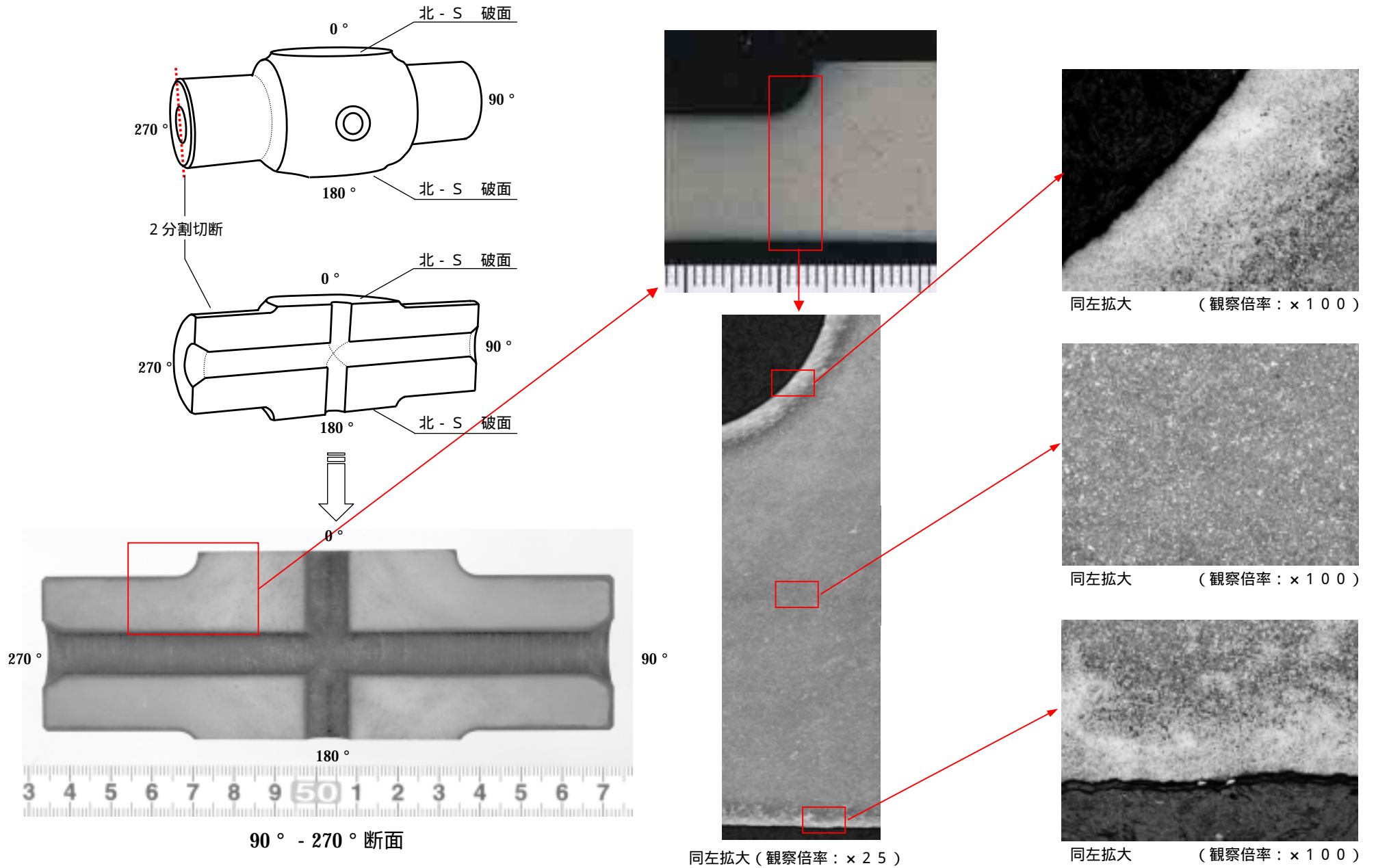
常用時の破断強度評価と同様にクロスピンに加わる応力 σ_s を求めると $\sigma_s = 970 \text{ N/mm}^2$ となる。

> σ_{cs} であることから、地震動により車輪へ加わると想定されるせん断応力が、クロスピンが持つせん断強度を上回るため、クロスピンは破損する。

以上

1 出典：西田正孝著「応力集中」p644-645 1988年11月7日 増補版第6刷 森北出版p645 「応力集中率の表」より読み取り

2 出典：工事認可申請書 原子炉建屋クレーンの耐震性についての計算書
(のない値はメーカー仕様値より)

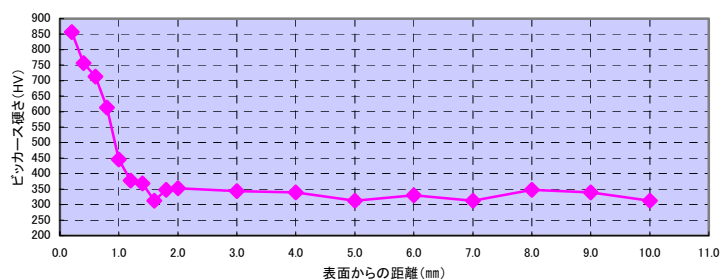
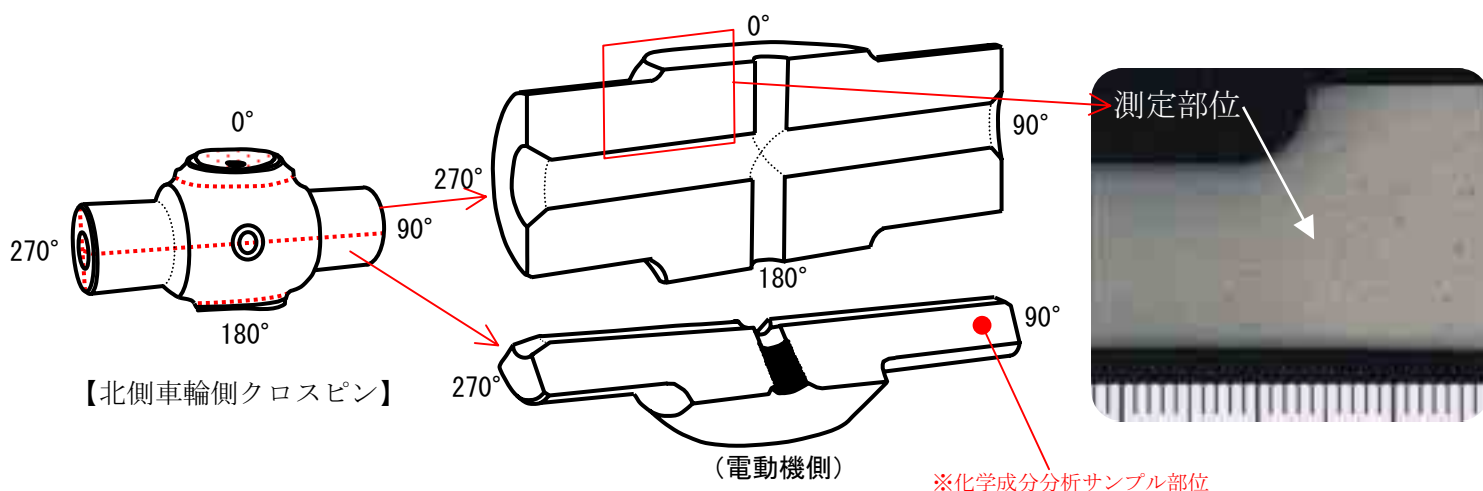


断面マクロ組織観察結果 (北-Sクロスピンのみ実施)

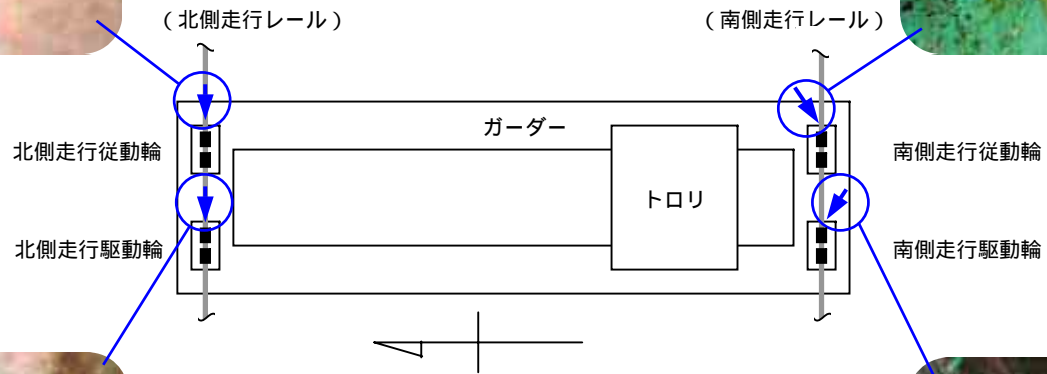
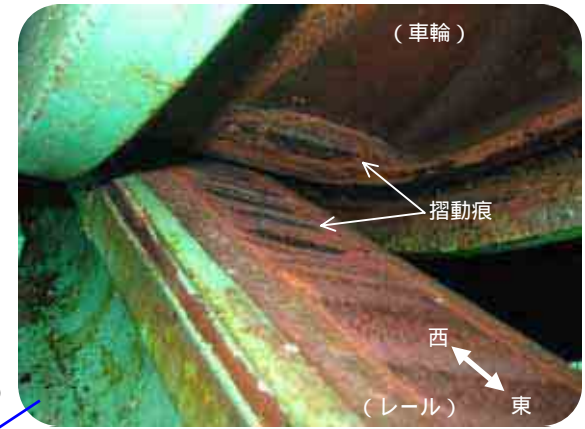
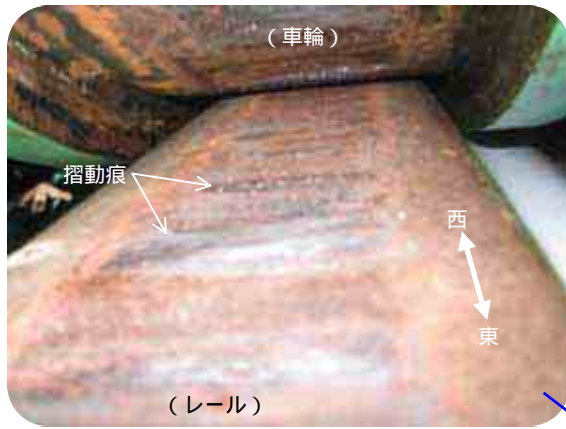
金属調査 (引張試験・化学成分分析・硬さ測定)

| 引張試験 材質：SCM420H | | | |
|-----------------|---|-------|------|
| 規格 試料 | 引張強さ | 伸び | 絞り |
| | N/mm ² | % | % |
| | ≥930 | ≥14 | ≥40 |
| 試料 1 | 1027 | 15.50 | 61.9 |
| 試料 2 | 978 | 15.60 | 64.0 |
| 備考 | 試験片形状：JIS Z2201 14A号 参照規格：JIS G4105 SCM420 | | |

| 化学成分分析 材質：SCM420H (※サンプル部位は下図参照) | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|---------------|---------------|--------|--------|-------|---------------|---------------|
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Mo |
| 規格 | 0.17～ 0.23 | 0.15～ 0.35 | 0.55～ 0.95 | ≤0.030 | ≤0.030 | ≤0.25 | 0.85～ 1.25 | 0.15～ 0.35 |
| 試料 | 0.21 | 0.17 | 0.87 | 0.022 | 0.018 | 0.021 | 1.19 | 0.26 |
| 備考 | 分析方法：C、S・・・高周波燃焼—赤外線吸収法 Si・・・二酸化けい素重量法 その他元素・・・ICP発光分析法 参照規格：JIS G4052 SCM420H 単位 wt% | | | | | | | |



硬さ測定結果 (北側車輪側 (北-S) クロスピンのみ実施)



クレーンは地震動により
走行方向(東西方向)に移動

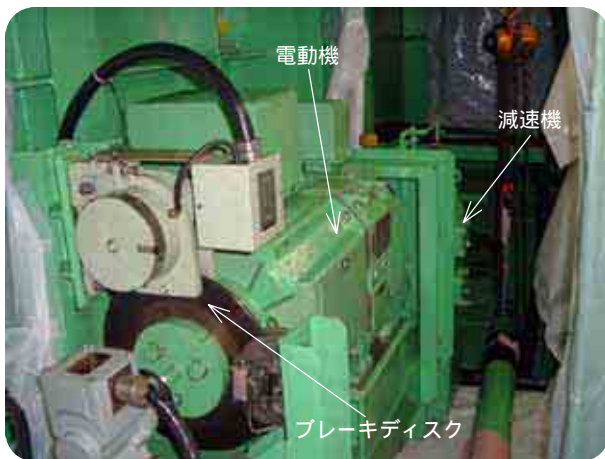
走行車輪・レール摺動痕



北側減速機外観



南側減速機外観



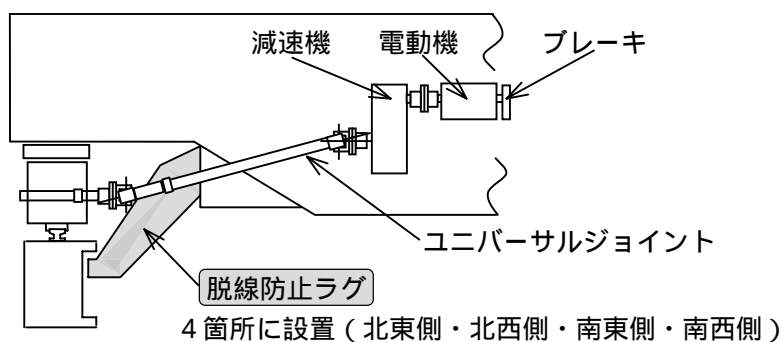
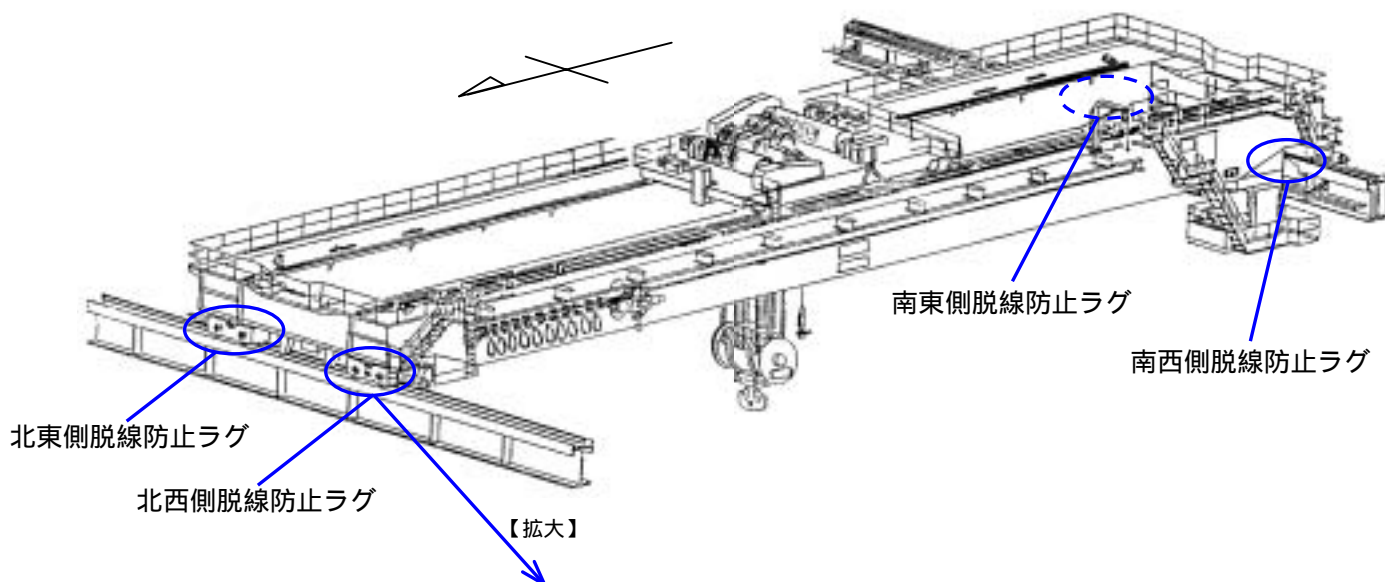
南側電動機・ブレーキ外観



点検窓内部

- ・減速機のハンドターニングを実施した結果、スムーズに回転し、異常は確認されなかった。
- ・減速機の点検窓を開放し、歯車の外観点検を実施した結果、歯車に損傷等の異常は確認されなかった。

減速機・電動機・ブレーキ外観状況



【脱線防止ラグ外観図】



北東側脱線防止ラグ



北西側脱線防止ラグ



南東側脱線防止ラグ

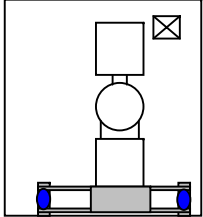
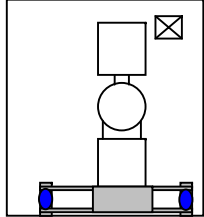
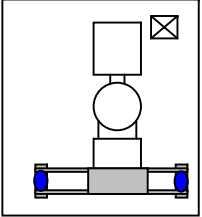
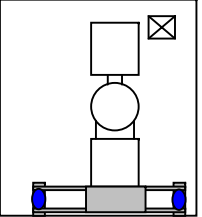
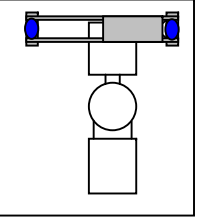
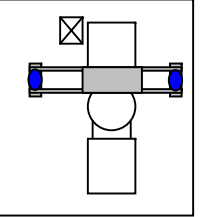
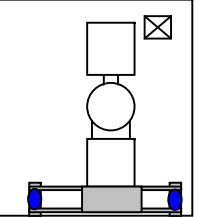


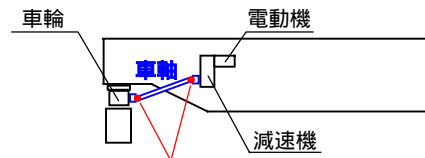
南西側脱線防止ラグ



脱線防止ラグ外観状況

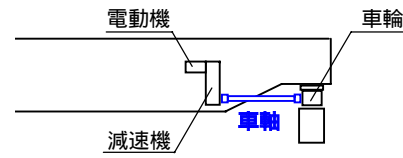
ユニバーサルジョイント・クロスピン点検結果

| 点検項目 \ 号機 | 1号機 | 2号機 | 3号機 | 4号機 | 5号機 | 6号機 | 7号機 |
|--|--|--|---|--|--|--|--|
| 外観目視点検 | 異常なし | 異常なし | 異常なし | - | - | <ul style="list-style-type: none"> 全4箇所のクロスピンのうち、北側車輪側、南側車輪側、南側電動機側の3箇所での破損を確認。 北側電動機側は異常なし。 | - |
| 浸透探傷検査 (PT) | 異常なし | 異常なし | 異常なし | - | - | 破損せずに残ったピンの破損部位相当部にPTを実施し、異常のないことを確認。 | - |
| 【参考】 地震発生時におけるクレーンの停止位置 使用済燃料プール 原子炉ウェル DSプール 大物搬入口 原子炉建屋クレーン | 通常の格納位置 (DSプールの壁側)  | 通常の格納位置 (DSプールの壁側)  | DSプール側の壁から約5m離れた位置 クレーンの点検中  | 通常の格納位置 (DSプールの壁側)  | 使用済燃料プール脇の大物搬入口の上 地下1階の機材を地上1階のトラックへ積み上げ中  | 原子炉ウェルの上オペフロにおける資機材の片付け作業中  | 通常の格納位置 (DSプールの壁側)  |



ユニバーサルジョイント

ユニバーサルジョイントを有する構造の概略図
(1~3・6号機)



ユニバーサルジョイントを有さない構造の概略図
(4・5・7号機)

- : ユニバーサルジョイントを有さない