

高速増殖炉研究開発センター
(高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設)
非常用ディーゼル発電機C号機シリンダライナーの
ひび割れについて

平成 23 年 6 月 3 日

独立行政法人日本原子力研究開発機構

目次

1. 件名	1
2. 事象発生の日時	1
3. 事象発生の場所	1
4. 事象発生の原子炉施設名	1
5. 事象発生時の運転状況	1
6. 事象発生の状況	
(1) 発生状況	1
(2) 事象確認時のプラント状況	2
(3) 主な時系列	2
7. 環境への影響	3
8. ディーゼル発電機C号機について	3
9. 現場における調査	
(1) 事象発生時の聞き取り調査	3
(2) No. 2、8 シリンダの調査	4
(3) 現地における調査のまとめ	6
10. 工場における調査	
(1) No. 2、8 シリンダ主要部品の調査	7
(2) No. 2、8 シリンダライナーの詳細調査	8
(3) その他シリンダライナーの詳細調査	12
(4) Pb 混入期間の特定調査	13
(5) 工場における調査結果のまとめ	16
11. No. 8 シリンダ分解時の作業不備に係る調査	
(1) 図面調査	17
(2) 聞き取り調査	17
(3) 作業要領書の内容調査	17
(4) 作業不備による油圧値の検証	17
(5) 作業不備の原因調査	18
(6) 作業不備に係る調査のまとめ	19
12. 事象発生の推定メカニズム	19
13. 事象発生メカニズムの確認・検証	
(1) No. 8 シリンダライナーのひび割れの油圧値の検証	20
(2) 作業不備により加圧された油圧値の検証	20
(3) No. 8 シリンダライナーの通常運転時における健全性の検証	20
(4) No. 8 シリンダライナーのひび割れの応力解析	21

(5) 作業不備とシリンダライナーの引張強さ低下の両者の関連性に対する検証	21
14. 推定原因	22
15. 再発防止対策	
(1) C号機シリンダライナーに係る対策	22
(2) A、B号機シリンダライナーに係る対策	22
(3) ディーゼル発電機分解点検の作業要領書に係る対策	23
(4) 調達管理の改善	23
16. A、B号機の健全性確認手法に係る検証	23
17. 水平展開	25
用語集	26
添付資料一覧	30

1. 件名

高速増殖炉研究開発センター（高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設）
非常用ディーゼル発電機C号機シリンダライナーのひび割れについて

2. 事象発生の日時

平成22年12月28日（火）14時30分（法令報告事象と判断した時）

3. 事象発生の場所

独立行政法人日本原子力研究開発機構
敦賀本部 高速増殖炉研究開発センター
高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設
ディーゼル建物 1階 D-203室（ディーゼル発電機室(C)）
(添付資料-1)

4. 事象発生の原子炉施設名

その他原子炉の附属施設
非常用電源設備
ディーゼル発電機

5. 事象発生時の運転状況

建設中（低温停止中）

6. 事象発生の状況

(1) 発生状況

高速増殖原型炉もんじゅ（以下「もんじゅ」という。）は、設備点検（1次系・2次系等）を実施しており、非常用ディーゼル発電機（以下「ディーゼル発電機」という。）は、平成22年10月2日から11月14日の間に同発電機A号機の点検を行い、引き続き、平成22年11月17日に同発電機C号機を待機除外とし、11月18日より同発電機C号機の点検を開始し、12月25日には点検が終了して運転試験を行える状態になった。12月27日に点検作業後の無負荷運転試験^{*1}を実施した。このときには特に異常は認められなかった。

12月28日には、負荷運転試験^{*2}のため、ディーゼル発電機C号機を9時45分頃から10分間のターニングを行なった後、燃焼室内の異物除去を目的としたエアランニング^{*3}を約1分間行い10時31分に起動した。

10時52分頃、同発電機（このときの発電機負荷25%（約1MW））から異音と排ガスの漏えいを確認するとともに、10時55分頃、No. 8 シリンダのシリンダライナーにひび割れを確認した。

このため、10時56分に当該ディーゼル発電機を停止した。

No. 8シリンダのシリンダライナーに発生したひび割れの形状、数、寸法測定等の調査を行った結果、外部から見える範囲で、No. 8シリンダライナーに7本のひび割れが見つかった。

ディーゼル発電機A、B号機は自動待機中^{*4}であり、他の設備に影響はなく、環境への影響もなかった。なお、ディーゼル発電機C号機トラブル以降に、ディーゼル発電機A号機は平成23年1月14日、ディーゼル発電機B号機は平成23年1月18日に定期試験による運転状態確認を実施し、異常のないことを確認した。

(添付資料-2)

- *1: ディーゼル機関の10分間のターニング(クランクシャフトの回転)、10分間の270rpm運転(最低回転数)、ステップ状に514rpm(定格回転数)まで回転速度を上昇させ、機関を停止する。
- *2: ディーゼル機関の10分間のターニング(クランクシャフトの回転)、発電機負荷をステップ状に100%(約4MW)まで上昇させ、機関の状態を確認し、停止する。
- *3: シリンダ内に約1分間圧縮空気を吹き込み、シリンダ内の異物をブローする作業であり、運転試験実施前に行う。
- *4: 低温停止及び燃料交換におけるディーゼル発電機の保安規定での運転上の制限は、ディーゼル発電機が2台動作可能であることである。C号機が所定の機能を有していないと判断したときは、ディーゼル発電機A及びB号機が待機状態にあったので運転上の制限からの逸脱にはあたらない。

(2) 事象確認時のプラント状況

- ① 原子炉は停止中
- ② 1次主冷却系のプラント状況
 - ・ A、Cループナトリウムドレン中
 - ・ Bループポニーモーター運転中(約200℃)
- ③ 2次主冷却系のプラント状況
 - ・ A、Cループナトリウムドレン中
 - ・ Bループポニーモーター運転中(約200℃)
- ④ メンテナンス冷却系のプラント状況
 - ・ 1次メンテナンス冷却系運転中
 - ・ 2次メンテナンス冷却系待機中

(3) 主な時系列

- 11月17日 ディーゼル発電機C号機待機除外
- 11月18日 ディーゼル発電機C号機点検開始
- 12月27日 ディーゼル発電機C号機無負荷運転試験実施

12月28日

- 10:31 ディーゼル発電機C号機負荷運転試験のため起動
- 10:52 頃 異音と排ガスの漏えいを確認
- 10:55 頃 No. 8シリンダのシリンダライナーにひび割れを確認
- 10:56 ディーゼル発電機C号機停止
- 11:00 頃 No. 8シリンダのシリンダライナーにひび割れを7箇所確認
- 14:30 頃 本事象を法令報告事象(研究開発段階炉規則第43条の14第3号(原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していない。))と判断

7. 環境への影響

本事象の発生に伴う外部への放射性物質による影響、ナトリウムの漏えいはなかった。

(添付資料-3)

8. ディーゼル発電機C号機について

もんじゅにおけるディーゼル発電機設備は、外部電源が喪失した場合に、プラントを安全に停止するために必要な補機及び工学的安全施設作動のための電源を供給することを目的とし、それぞれの非常用母線と対応して、多重性を考慮し、各々独立した3台の発電機が設置されている。

ディーゼル発電機の点検は、内燃機関部及び補機設備の点検を周期的に実施しており、内燃機関部の機関12気筒のシリンダライナーについては、2気筒毎を周期的に分解点検を実施している。

今回、C号機の分解点検対象は、No. 2及びNo. 8シリンダライナーであり、点検後の25%負荷運転試験時に、ひび割れが確認されたシリンダライナー(No. 8)の点検については、外観点検、寸法検査(磨耗量の確認)を行った結果、異常な磨耗はなかったことから、復旧し、試運転を実施している。

また、シリンダライナーの交換実績について確認した結果、A、B、C号機ともシリンダライナーの異常な磨耗は確認されておらず、交換した実績がないことを確認した。

(添付資料-4)

9. 現場における調査

(1) 事象発生時の聞き取り調査

事象発生時に試運転に立ち会った運転員、保修員等による聞き取り調査結果は、以下のとおり。

- 10:31 ディーゼル発電機C号機を負荷運転試験のため起動
- 10:52 頃 シリンダ部からの異音の確認とともに、排ガスの漏えいを No. 8シリンダライナー部から確認した。

10：56 そのため、ディーゼル発電機C号機を停止した。

11：00頃 その後、No.8 シリンダライナーのひび割れ部から水のにじみ及びひび割れ7箇所を確認した。

(添付資料-5)

(2) No.2、8 シリンダの調査

今回、C号機の分解点検対象のシリンダライナーは、No.2とNo.8であったが、No.8 シリンダライナーのみ異常が確認されたことから、原因の絞込みを行うため要因分析図に従い、No.2とNo.8 シリンダ部について、下記の調査を行った。

(添付資料-6)

① No.8 シリンダシリンダライナーのひび割れ状況の確認

No.8 シリンダライナーを分解確認した結果、縦方向のひび割れが13箇所確認され、そのうち貫通しているひび割れが6箇所確認された。

また、シリンダライナー内面に周方向のひび割れが全周に確認された。

なお、No.8 シリンダライナー取外し作業時において、シリンダライナーつば部がシリンダライナー本体部から外れ、つば部裏面から見た場合6分割の状況となった。

一方、No.2 シリンダライナーについては、ひび割れ等の異常は確認されなかった。

(添付資料-7)

② シリンダライナー部の分解作業中の落下・転倒等に係る確認

(a) シリンダライナー部の外観確認

No.2、8 シリンダライナー部を分解し、外観点検を行った結果、強い接触痕がないことを確認し、過大な衝撃や点検作業中の落下・転倒がないことを確認した。

(添付資料-8)

③ シリンダライナー部の組立不良に係る確認

(a) シリンダライナーつば下部の確認

No.2、8 シリンダライナーつば下部に、異物の噛み込みのないことを目視にて確認した。また、ジャケット側の当り面にも異物の噛み込みのないことを目視にて確認した。

(添付資料-9)

(b) シリンダジャケット取付部の確認

No.2、8 シリンダジャケットの内外面に、打痕等のないことを目視で確認するとともに、シート部は非破壊検査(PT検査)を実施し、異常のないことを確認した。

(添付資料-10)

(c) シリンダヘッドの締付け力（片締め・過大）の確認

No. 2、8 シリンダヘッドの締付け力（規定油圧値：73.5MPa 負荷時、ボルトの緩みの有無）を確認した。この結果、No. 2 については、規定油圧値でボルトの緩みが確認できた。一方、No. 8 については、規定油圧値よりも低い 47.0～49.5MPa でボルトの緩みが確認された。これは、No. 8 シリンダライナーにひび割れが発生して、形状が変化したために、締付け時の油圧値よりも低下したものと推定される。

（添付資料-11）

(d) 締付け用油圧ポンプ油圧計の校正確認

設備点検時に使用された締付け用油圧ポンプ油圧計については、メーカーに送り確認した結果、精度内にあることを確認した。

（添付資料-12）

(e) 締付けボルトの確認

No. 2、8 の締付けボルトの目視点検を行い、ネジ部の欠け・歪みがないことを確認した。

（添付資料-13）

(f) シリンダライナー内部（燃焼室）の確認

No. 2、8 のシリンダライナー内部（燃焼室）に異物のないことを確認した。

（添付資料-14）

④ ピストン部の組立不良に係る確認

(a) ピストンリング組み合わせ確認

No. 2、8 のピストン部を抜き出し、目視点検の結果、図面通りピストンリング（No. 1 リング 1 本、No. 2～No. 4 リング 3 本、オイルリング 2 本）について正規に組み込まれていることを確認した。

（添付資料-15）

(b) ピストンクラウン（ヘッド）合いマークの確認

No. 2、8 のピストンクラウン（ヘッド）の合いマーク（刻印）及びピストンスカート下部の合いマーク（刻印）が、図面通り周方向に正規に組み込まれていることを目視確認した。

（添付資料-16）

(c) ピストン・連接棒の組立方向の確認

No. 2、8 のピストンスカート下部の合いマーク（刻印）と連接棒大端部の合いマーク（刻印）が、図面通り周方向に正規に組み込まれていることを目視確認した。

（添付資料-16）

⑤ 燃料噴射量過多に係る確認

(a) 燃料噴射量の状態確認

燃料噴射弁の単体テストの結果、噴霧圧力は規定値以内で、噴霧状態も後ダレ等もなく良好であった。

(添付資料-17)

⑥ 潤滑油不足に係る確認

(a) 潤滑油不足によるピストン及びライナー部のカジリの有無

No. 2、8 のピストンを抜き出し、目視にてピストンリングの組み込み確認を行った結果、図面通りで組み込み順序及び組み込み方向に異常はなかった。また、ライナー摺動面は焼付、縦傷、カジリなどもなく良好であった。

(添付資料-8、15)

⑦ 冷却不足に係る確認

(a) 冷却水不足によるピストン及びライナー部のカジリの有無

冷却水不足については、冷却水配管への異物の混入による流路の閉塞が考えられるため、冷却水配管の分解点検を行い、シリンダジャケット部出入口配管内部、シリンダヘッド部出入口配管内部に異物や閉塞の跡のないことを確認した。併せて、シリンダライナー部の摺動面の目視による確認を行い、焼付、縦傷、カジリなどもなく良好であった。

(添付資料-8、18)

(b) 空気冷却器給気管内冷却水浸入の有無

空気冷却器内部について、給気管内への冷却水の浸入が考えられるため、吸気管内の内部点検を行い、水の浸入痕がないことを確認した。

(添付資料-19)

⑧ 運転状態に係る確認

(a) 急激な負荷変動に係る確認

負荷試験時の操作確認として、燃料加減軸の状況を確認した結果、急激な負荷変動を与えていないことを確認した。(急激な負荷変動とは、瞬時(3秒)において0~2500kWの負荷変動範囲を超えるものを言う。)

(添付資料-20)

(b) 運転時の振動確認

過去の点検における試運転時の振動測定結果から、振動管理値を満足しており、シリンダライナーに損傷を与えるような振動ではないことを確認した。

(添付資料-21)

(3) 現地における調査のまとめ

- ① No. 8 シリンダライナーには、不具合時に確認されている外表面からのひび割れが13箇所確認され、そのうち貫通しているひび割れが6箇所確認された。それらのひび割れは全て縦方向のひび割れであった。

- ② 上記ひび割れ以外に、シリンダライナー内面に周方向のひび割れが全周に確認された。なお、周方向のひび割れについては、No. 8 シリンダライナー取外し作業時において、シリンダライナーつば部がシリンダライナー本体部から外れたことから、貫通の一手手前の状況であった。
- ③ 現地における調査では、今回の不具合事象の起因事象となる要因は確認されなかった。

10. 工場における調査

ディーゼル機関のメーカ工場（以下「工場」という。）に持ち込んだNo. 2、8シリンダの主要部品について、原因の絞込みを行なうため要因分析図に従い、調査を行った。

（添付資料-6）

(1) No. 2、8 シリンダ主要部品の調査

No. 8 シリンダライナーについては、既にひび割れ等が発生しており、現地で取外す際には損傷している状態であったため、外観検査、寸法検査、非破壊検査は実施せず、下記に示す主要部品について、外観検査、寸法検査、非破壊試験、耐圧試験を実施した。調査の結果、No. 8 シリンダヘッドの爆面の一部に浸透探傷試験及び磁粉探傷試験で指示模様が確認され、同シリンダヘッドの爆面の寸法が公差を外れていることが確認された。

その他の部品については、異常は確認されなかった。

○：良 ×：否 —：損傷のため実施せず ()内は、No. 2 シリンダ結果を示す

	No.	部品名称	外観検査	寸法検査	非破壊試験	耐圧試験
					PT：浸透探傷試験 MT：磁粉探傷試験	
No. 8 (No. 2) シリンダ	1	シリンダライナー	—(○)	—(○)	—(○)	—
	2	シリンダジャケット	○(○)	○(○)	○(○) PT	—
	3	シリンダカバパッキン	○(○)	○(○)	—	—
	4	タイロッド(テンションボルト)	○(○)	○(○)	○(○) MT	—
	5	タイロッドナット	○(○)	○(○)	○(○) PT	—
	6	ピストン	○(○)	○(○)	○(○) PT	—
	7	ピストンリング	○(○)	○(○)	○(○) PT	—
	8	ピストンピン	○(○)	○(○)	○(○) PT	—
	9	接続棒	○(○)	○(○)	○(○) MT	—
	10	シリンダヘッド	○(○)	×(○)	× PT、MT(注) (○)PT	○(○)
	11	吸気弁	○(○)	○(○)	○(○) PT	—
	12	排気弁	○(○)	○(○)	○(○) PT	—
	13	排気弁座(ケース)	○(○)	○(○)	○(○) PT	—
	14	始動弁	○(○)	○(○)	—	—
	15	シリンダ安全弁	○(○)	—	—	—

注) No. 8 シリンダヘッドについては、PT 検査で指示模様が確認されたため MT 検査を追加

異常が確認された No. 8 シリンダヘッドの調査結果を以下に示す。

① シリンダヘッドの外観点検

No. 8 シリンダヘッドの爆面は全体的に錆の発生が確認されたが、これは不具合発生時に機関冷却水が、シリンダライナーの周方向ひび割れ部を通過して燃焼室内に浸入したものと考えられる。その他、異常な傷がないことを目視にて確認した。

No. 2 シリンダヘッドは爆面に錆及び異常な傷がないことを目視にて確認した。

(添付資料-22)

② シリンダヘッドの耐圧試験による確認

No. 2、8 シリンダヘッドに諸弁（排気弁、吸気弁、始動弁、安全弁、インジェクターコック）を組み込んだ状態で水圧試験（0.98MPa）を行い、圧力計が試験圧を保持していることから漏えいがないことを確認した。

(添付資料-23)

③ シリンダヘッドの浸透探傷試験による確認

No. 2、8 シリンダヘッドを浸透探傷試験にて確認した結果、No. 2 については爆面に異常は見られなかったが、No. 8 については爆面の一部（当該部取付パッキン内面幅と同位置で2箇所）に指示模様が確認された。

No. 2 については、浸透探傷試験による指示模様はなく良好であった。

(添付資料-24、27)

④ シリンダヘッドの磁粉探傷試験による確認

No. 8 シリンダヘッドを磁粉探傷試験にて確認した結果、爆面の一部（当該部取付パッキン内面幅と同位置で4箇所）に指示模様が確認された。

(添付資料-25、27)

⑤ シリンダヘッドの寸法の確認

No. 2、8 シリンダヘッド爆面（パッキンはまり込み部直径）の寸法を確認した結果、No. 2 については寸法が公差内であることを計測器（マイクロメータ）にて確認したが、No. 8 については、変形により、寸法が公差を外れていることが確認された。

(添付資料-26、27)

⑥ No. 2、8 シリンダの主要部品の調査のまとめ

・No. 8 シリンダヘッドの爆面の一部に浸透探傷試験及び磁粉探傷試験で指示模様が確認され、同シリンダヘッドの爆面の寸法が公差を外れていることが確認された。

・このことから、No. 8 シリンダヘッドに過大な圧力が付加された可能性のあることが確認された。

(2) No. 2、8 シリンダライナーの詳細調査

本項以降の調査事項内に用いられる、「つば部」、「つば下R部」、「ライナー

本体」、「縦方向のひび割れ」、「周方向のひび割れ」等の語句の定義と該当箇所を添付資料に示す。

(添付資料-28)

① 外観観察

- ・No. 8 シリンダライナーのひび割れ状況については、縦方向のひび割れ及び周方向のひび割れを確認した。
- ・縦方向のひび割れについては、13 本観察され、このうちつば部下側からつば部上面に、縦方向の貫通ひび割れが 6 本観察され、残りの 7 本のひび割れは、未貫通の状況であった。
- ・縦方向のひび割れについては、周方向にひび割れした上側のみ発生しており、周方向のひび割れの下にはひび割れは認められないため、周方向のひび割れが先に発生したことが確認された。
- ・縦方向の未貫通のひび割れについては、下側が口を開いており、シリンダライナー上面に達する前にひびが停止していることから、下側から上側にかけて進展していることが確認された。

(添付資料-29)

- ・周方向のひび割れの起点部は、最終破断部の対称位置にあることが多いため、最終破断部の対称位置付近の外観観察を実施し、外周側より肉厚に直角な方向で内周側に進展している箇所を起点部と推察した。
- ・起点部以外の周方向のひび割れについては、やや斜め方向に外側から内面に進展していることが確認された。
- ・最終破断部については、他の破面と異なり、腐食されていない破面（発錆がない）が存在していることから、この部分が最終破断部であると推測した。

(添付資料-30)

② 破面観察

破面観察は SEM（走査電子顕微鏡）により、周方向のひび割れの起点部及び最終破断部と、縦方向のひび割れ 1 箇所（未貫通部：強制開口した破面）について実施した。

(a) 縦方向のひび割れ 1 箇所（未貫通）

写真は、ひび割れ①を強制開口したものであり、強制開口破面である n 部を含め、k、l、m 部のいずれの破面にもディンプル及びパーライト層間割れが観察され、過大応力が作用した急速破壊であることが確認された。

(添付資料-31)

(b) 周方向のひび割れの起点部

写真 b、c 部（つば下 R 部の最表面で液体パッキンの付着していた部分）について、いずれにも片状黒鉛鋳鉄材の急速破壊時に現れるディンプルもしくはパーライトの層間割れが観察されていることから、この部分が過大応力の作用

した急速破壊であることが確認された。

また、写真 g 部は、より内側の錆た破面であるが、ディンプルが観察されていることから、この部分についても過大応力が作用した急速破壊であることが確認された。

(添付資料-32)

(c) 周方向のひび割れの最終破断部

最終破断部である写真 i、j 部についてもディンプルが観察され、過大応力が作用した急速破壊であることが確認された。

(添付資料-33)

③ 破断部組織観察

当該シリンダライナーからの試験片採取位置を写真に示す。周方向のひび割れの起点部近傍である試験片採取位置 H 部断面より採取し、金属組織観察を実施した。この部分の断面を写真 M1 及び M2 に示す。写真 M2 はつば下 R 部を拡大したものであるが、この部分の曲率半径は約 3.8mm である。また、つば下 R 部には形状的な異常や傷等の欠陥は特に観察されていない。

写真 M3 は、周方向のひび割れ部の拡大であるが、いずれも R 側（写真右側）が口を開いていることから、つば下部の周方向のひび割れが、外側のつば下 R 部から内周面側にかけて進展したことが確認された。

(添付資料-34)

④ 破面表面分析

周方向のひび割れの外側部（つば下 R 部付近）に、液体パッキン^{*5}の付着が確認されていることから、周方向のひび割れは組立前に発生し、液体パッキンが付着していた箇所からひび割れが進展していったものと推測した。

*5: 液体パッキンは、空気に触れると約 1~2 時間で硬化し始めるものである。液体パッキンは、シリンダライナーの分解後に拭き取り、組立時に新たに塗布する。そのため、組立時に、周方向のひび割れがない限り浸透することはない。

⑤ 組織観察

No. 2 シリンダライナーについては、組織拡大観察の結果、基地組織及び黒鉛に特に異常は見られなかったが、No. 8 シリンダライナーの黒鉛にはヒゲ状、麦穂状、メッシュ状の異常な形態が確認された。この異常な黒鉛形態は、ウィドマンステッテン黒鉛と呼ばれるものである。

(添付資料-35)

⑥ ウィドマンステッテン黒鉛

ウィドマンステッテン黒鉛とは、これらの黒鉛組織は、凝固時の冷却速度の遅い肉厚铸件において、微量の鉛（以下「Pb」という。）が混入した場合に発生する組織形態であり、黒鉛にヒゲ状、麦穂状、メッシュ状の黒鉛の異常組織形態（ウィドマンステッテン黒鉛）によって、引張強さの低下が生じるものである[1]、[2]。

また、ウィドマンステッテン黒鉛は Pb 単独では発生せず、接種剤^{*6}に含まれるカルシウム（以下「Ca」という。）の影響や製品の肉厚（冷却時間）の大きいことで発生する[2]。

参考文献

[1] 鑄造欠陥とその対策、(社)日本鑄造工学会、2007

[2] 中江、金、管野：鑄物 66 (7)、P495-500、1994-07、(社)日本鑄造工学会

*6：シリンダライナー（鑄鉄）を製造する際に、機械的性質及び切削性向上を目的として接種剤を鑄鉄溶湯に添加している。接種剤には Ca が含まれているため、シリンダライナーには Ca が約 10ppm～20ppm 程度の低濃度若しくは検出限界以下で存在することになる。

⑦ 引張試験、硬さ測定

No. 2 シリンダライナーは、上部、中部、下部の引張強さが平均 289N/mm² (268～313N/mm²) であり、メーカー管理値 (245 N/mm² 以上) を満足していたが、No. 8 シリンダライナーについては、上部、中部、下部の引張強さが平均 150 N/mm² (140～158N/mm²) とメーカー管理値に対して低い値となっている。

硬さについては、ブリネル硬さ（以下「HB」という。）を測定し、平均 HB226 (HB225～228) であり、メーカー管理値 (HB190～250) を満足している。

(添付資料-36)

⑧ 化学成分分析

ウィドマンステッテン黒鉛形態に影響を与える Pb、Ca について追加調査した結果、No. 2 シリンダライナーについては Pb が 0.001% (10ppm)、Ca が検出限界以下であるのに対し、No. 8 シリンダライナーについては Pb が 0.004% (40ppm)、Ca が 0.001% (10ppm) 含有していることが分かった。

(添付資料-37)

なお、ライナー下部より採取した試験片についてミルシートにある化学成分項目の分析を実施した。この結果、メーカーの管理する成分については、管理値を満足している。

(添付資料-38)

⑨ No. 2、8 シリンダライナーの詳細調査のまとめ

- ・縦方向のひび割れについては、周方向にひび割れした上側のみ発生しており、周方向のひび割れの下にはひび割れは認められないため、周方向のひび割れが先に発生したことが確認された。
- ・縦方向の未貫通のひび割れについては、下側が口を開いており、シリンダライナー上面に達する前にひびが停止していることから下側から上側にかけて進展していることが確認された。

- ・周方向のひび割れは、破断部組織観察結果及びひび割れの外側部（つば下R部付近）に液体パッキンが付着していたことにより、ひび割れの外側部（つば下R部付近）から進行したことを確認した。
- ・縦方向のひび割れ及び周方向のひび割れとも破面観察結果から、いずれにも片状黒鉛鑄鉄材の急速破壊時に現れるディンプル若しくはパーライトの層間割れが観察されたため、過大応力が作用した急速破壊であることが確認された。
- ・組織観察の結果、No. 8 シリンダライナーについて、黒鉛の異常組織形態（ウイドマンステッテン黒鉛）が確認された。
- ・ウイドマンステッテン黒鉛が確認された No. 8 シリンダライナーの引張強さは、メーカー管理値を下回っていた。また、Pb が検出された。

(3) その他シリンダライナーの詳細調査

No. 8 シリンダライナーの組織観察において異常な黒鉛組織が確認されたため、No. 2 及び No. 8 を除く残り 10 個のシリンダライナーのスンプ試験による組織観察を行い、異常な黒鉛組織が確認されたシリンダライナー及び健全であったシリンダライナーの一部について引張試験及び化学成分分析を実施した。

① 組織観察

10 本のシリンダライナーのうち、No. 5、7、9、10 の黒鉛にヒゲ状、麦穂状、メッシュ状の異常な形態が確認された。その他の No. 1、3、4、6、11、12 シリンダライナーについては、基地組織及び黒鉛形状に特に異常は見られなかった。

（添付資料-39）

② 引張試験、硬さ測定

10 本のシリンダライナーのうち、ウイドマンステッテン黒鉛が確認された No. 5、7、9、10 シリンダライナーについての引張試験を実施した。引張試験の結果、メーカー管理値を下回っていることを確認した。

また、正常な黒鉛組織である No. 4、11、12 シリンダライナーについても引張試験を実施し、メーカー管理値を十分上回っていることを確認した。

（添付資料-40）

③ 化学成分分析

10 本のシリンダライナーのウイドマンステッテン黒鉛形態に影響を与える Pb、Ca について化学成分分析を実施した。化学分析の結果、Pb 成分が確認されたシリンダライナーは、No. 3、5、7、9、10 であり、他は検出限界以下であった。Ca については No. 12 が検出され、他は検出限界以下であった。

（添付資料-41）

④ シリンダライナーの Pb 含有量と引張強さの関係について

シリンダライナーPb 含有量と引張強さとの関係を整理した。その結果、Pb の含有量が 20ppm 以下の場合には、引張強さの低下は認められないことが確認された。

(添付資料-42)

⑤ シリンダライナーのミルシートと実体強度の違いについて

No. 8 シリンダライナーのミルシートと実体の引張試験の引張強さに違いが見られた。シリンダライナー鑄造時のミルシート用試験片（以下、「試験片」という。）は、シリンダライナーそのものから採取（実体）しているものではなく、試験片用として別に鑄込み（別体）をしている。この試験片の厚さ（約φ30mm）とシリンダライナーの実体の厚さ（最大 約 78mm）では厚さが異なり、肉厚の薄い試験片は実体に比べて冷却速度が速いため、ウイドマンステッテン黒鉛への成長が抑えられ、別体と実体とで引張強さに差異が生じたものと推察される。

上記推察については、文献に冷却速度の遅いものにウイドマンステッテン黒鉛が発生する旨が記述されている[1]、[2]。

なお、試験片の採取は JIS G 5501（1976）で別鑄込みでも良い規定とされており、別体とすることに問題はない。

(添付資料-43)

参考文献

[1] 鑄造欠陥とその対策、(社) 日本鑄造工学会、2007

[2] 中江、金、管野：鑄物 66 (7)、P495-500、1994-07、(社) 日本鑄造工学会

⑥ その他シリンダライナーの詳細調査のまとめ

- ・ 組織観察の結果、No. 5、7、9、10 シリンダライナー4本について、黒鉛の異常組織形態（ウイドマンステッテン黒鉛）が確認された。
- ・ ウイドマンステッテン黒鉛が確認された4本のシリンダライナーの引張強さは、全てメーカー管理値を下回っていた。また、4本全てにPbが検出された。
- ・ シリンダライナーの引張強さ低下の原因は、「製造時のPb混入」であり、製造時の試験により引張強さの低下を検出できなかった原因は、「引張試験時の試験片と実体とで肉厚が異なり、冷却速度の相違から黒鉛の異常組織の成長が異なっていた。」ことによるものである。

また、製造時においてPbを特定できなかったのは、「成分分析によってPbを分析対象としていなかった。」ためである。

(4) Pb 混入期間の特定調査

No. 8 シリンダライナーの引張強さの低下は、組織観察の結果、ウイドマ

ンステッテン黒鉛（ヒゲ状、麦穂状、メッシュ状の異常な形態）の発生によるもので、極微量の Pb の混入で発生し、引張強さの低下などの悪影響を及ぼすものであることが分かった。

このため、引張強さの低下に起因する Pb の混入について、工場での製造方法、原料の調達に係る調査を行った。当該シリンダライナーの製造会社は、約 10 年前に大型シリンダライナー（原子力発電所への納入を含む。）の製造から撤退しており、記録がほとんど残っていないことから、主に当時の担当者からの聞き取り調査（一部記録確認）を実施した。

① シリンダライナー製造方法の調査

シリンダライナーの製造は、遠心鑄造により製造されるが、その原材料は a) リターン材（シリンダライナー製造ラインで機械加工した時に発生する削粉）75%と、b) 購入する銑鉄 5%、及び c) 外部から納入される鋼屑 20%である。このうち、a) のシリンダライナーで機械加工した時に発生する削粉については、工場内での再利用材料であり、b) の銑鉄については、鑄物用銑鉄（JIS G 2202）として購入しているため、Pb 混入の可能性はない。したがって、Pb 混入の可能性があるのは c) の外部から納入される鋼屑に絞られる。

（添付資料-44）

② Pb が混入した材料及びルートの特定

シリンダライナー製造会社に鋼屑を納入した取引会社及び取扱い鋼種を確認したところ、6 社との取引が確認され、また、D 製作所を除く 5 社は Pb を含有した鋼種を取り扱っていないことが確認された。

D 製作所については、鉛快削鋼の取扱が確認されたことから、Pb が混入した鋼屑の発生元は D 製作所であり、シリンダライナー製造会社には、A 社を経由して納入されたことが確認された。

（添付資料-44、45）

③ Pb の混入期間の特定

Pb の混入した鋼屑を納入した A 社のシリンダライナー製造会社との取引期間は、1985 年 5 月～1989 年 5 月であることが確認され、また、A 社と取引があった D 製作所における鉛快削鋼の取扱期間は、当時の状況から、1987 年 2 月～1989 年 4 月であることが確認された。

また、製造ラインからの Pb の除去を目的として、鋼屑収集用ピットからの鉛快削鋼の除去及び製造ラインの清掃作業を 1989 年 5 月末に実施していることを確認した。

そのため、シリンダライナーの製造時に Pb が混入した期間は、1987 年 2 月～1989 年 5 月であることが確認された。

（添付資料-44、45、46）

④ Pb の混入期間中のシリンダライナーの不具合事象の確認

Pb 混入期間中のシリンダライナー製造会社におけるシリンダライナーの不具合事例は、1989年3月～1990年2月にもんじゅを除く3件の不具合事例が確認された。

その当時の調査結果は、Pb の混入による黒鉛組織の異常と引張強さの低下が認められているが、当時の知見として、ウィドマンステッテン黒鉛がよく知られていなかったため、黒鉛組織の異常メカニズム及び引張強さの低下に係る原因究明には至っていない状況であった。

また、Pb 混入がシリンダライナーの製品品質異常の原因であるとシリンダライナー製造会社及びディーゼル機関製造会社が判断し、Pb 混入の対象となる製造ロットの特定を両社で行った。

Pb 混入の原因である鉛快削鋼には、硫黄（以下「S」という。）成分も高いことから、製品ミルシートのS分量の高いものを対象として抽出したが、もんじゅのディーゼル発電機のシリンダライナーについては、ミルシートのS分量が多いものではないと判断していた。

これら状況を踏まえ、実態として現在のもんじゅで交換用に用いられるシリンダライナーは、製造時に実体から引張試験用を採取しPb 混入の対応が図られているが、今後、調達管理の改善として「請負契約に係る一般仕様書」に「ディーゼル発電機に用いるシリンダライナー製造時の引張試験片は、実体から採取すること」を追記する。

⑤ シリンダライナー製造会社の鋼屑の品質管理

シリンダライナー製造会社の鋼屑の品質管理については、社内規格「鋼くず」により管理されている。この社内規格の改訂履歴からも、当該社内規格の制定時（1970年）から、化学成分に「Pb、Zn等鑄鉄に有害な特殊元素」の項目が設けられており、Pbに関する有害性の認識はあったが、これを防ぐための具体的手段は確認できなかった。

また、当時のPb混入に係る調査時に、棒状のものが確認され化学成分分析を行い、Pbを含有していることが確認されたことを受け、1989年6月28日に当該社内規格を改訂し、鋼屑の発生場所と鋼種の明確化及び化学成分分析の検査方法の明確化を行なっている。

（添付資料-47）

⑥ Pb 混入に係る調査結果のまとめ

(a) Pb が混入した材料及びルートは、D製作所からA社を経由し、鉛快削鋼が鋼屑として、シリンダライナー製造会社に納入されたことが確認された。

(b) シリンダライナーの製造時にPbが混入した期間は、1987年2月～1989年5月であることが確認された。

(c) Pb が混入した期間に、シリンダライナー製造会社の製品で黒鉛の組織異常が観察された不具合は 3 件であることが確認された。

(d) もんじゅのディーゼル発電機 A、B、C 号機のシリンダライナーの製造が、1988 年 3 月～1988 年 8 月に鋳込みがされていることから、シリンダライナーに Pb が混入している可能性があることが確認された。

(添付資料-45)

(5) 工場における調査結果のまとめ

- ① No. 8 シリンダヘッドの爆面の一部に浸透探傷試験及び磁粉探傷試験による指示模様が確認されたことから、シリンダヘッドに過大な荷重が負荷されたことが確認された。
- ② 破面観察の結果から、ライナーつば部に発生した周方向及び縦方向のひび割れについては、縦方向のひび割れが周方向のひび割れを超えて進展していないことから、周方向のひび割れが先に発生したもので、縦方向のひび割れはそれ以降に発生したひび割れであることが確認された。
- ③ また、周方向のひび割れは、つば下 R 部の外表面側から発生し、縦方向のひび割れは、つば下部外表面の下側から発生していることが確認された。
- ④ No. 8 シリンダライナーの引張強さについて、メーカ管理値に対して低い値が確認され、その原因はシリンダライナー製造会社の製造時に原材料へ Pb が混入したことにより、鋳造過程でウイドマンステッテン黒鉛が発生したことによることを確認した。
- ⑤ もんじゅのディーゼル発電機 A、B、C 号機のシリンダライナーの製造が、1988 年 3 月～1988 年 8 月に鋳込みがされていることから、Pb が混入している可能性があることが確認された。

以上から、No. 8 シリンダヘッドの爆面の一部に浸透探傷試験及び磁粉探傷試験による指示模様が確認されたことから、シリンダヘッドに過大な荷重が負荷されたことが確認された。

No. 8 シリンダライナーの引張強さの低下が確認されたが、これまでに月 1 回のサーベランス運転で、ディーゼル発電機の健全性は確認されていることから、シリンダヘッドへの過大圧を本事象の原因と考えた。

(添付資料-6)

11. No. 8 シリンダ分解時の作業不備に係る調査

要因分析図に基づくこれまでの調査結果から、作業要領書にシリンダライナー取外し時の油圧管理にかかる記載がないこと、シリンダヘッドの爆面の一部に非破壊検査による指示模様が確認されており、シリンダヘッドに過大な荷重が負荷された可能性があることから、以下の調査を実施した。

(1) 図面調査

No. 8シリンダヘッドに過大圧がかかった場合に、No. 8シリンダライナーが今回の不具合事象のように、ひび割れを起こす可能性があるかを図面により確認した。

シリンダライナーは、シリンダヘッドとシリンダジャケットにつば部で挟まれる状態でテンションボルトとナットにより組み込まれている。分解時には、テンションボルトにジャッキボルトを装着し、油圧によりテンションボルトを引っ張り上げることによりナットを緩め、シリンダヘッド等の取外しを行なう。

分解時にテンションボルトを引っ張る油圧操作で、規定油圧を超え過大な圧力をかけた場合には、シリンダライナーの最小破断応力を超え、つば下R部からひび割れを起こす可能性があることが確認された。

(添付資料-48)

(2) 聞き取り調査

今回のNo. 8シリンダ分解時に係る作業に従事した、作業員（作業監督（正）、作業班長等）から聞き取り調査を行った。

聞き取り調査の結果、分解時に係る一連の手順や工具の取扱方法は、取扱説明書に定められていたが、作業要領書には、同様な内容が定められていなかったため、分解時に油圧ポンプに油圧計を取り付けず、管理値以上の圧力が付加された可能性が高いことを確認した。

(添付資料-49)

(3) 作業要領書の内容調査

作業要領書には、分解及び点検を行うための「作業手順/作業管理チェックシート」があり、様式は、「作業番号」、「作業項目」、「作業手順」、「注意事項」、「管理区分」、「確認日・確認者」、「記録様式」となっている。

今回のNo. 8シリンダヘッド分解時においては、「作業手順」に「分解、取り外しを行なう」との記載内容で、分解時に係る具体的な手順や工具の取扱方法は記載されていなかった。

(添付資料-50)

(4) 作業不備による油圧値の検証

聞き取り調査を踏まえ、作業時の不適切な操作に基づく検証試験を、テンションボルト用ナットの緩み時点（規定油圧：73.5MPa）からポンプ停止時点までの加圧が継続された100秒後の油圧値の確認を、1/6、1/5、1/4ストローク/2秒の3パターンのポンプ操作方法により確認した。

検証試験の結果、シリンダヘッドには、89.0MPa～110.0MPa程度の圧力が加えられたとする試験結果が得られた。

また、設備的には油圧ポンプ保護用の安全弁は 210MPa に設定されており、不適切な操作が行われた場合 210MPa まで加圧される可能性があることが確認された。

(添付資料-51)

(5) 作業不備の原因調査

上記のとおり作業が適正に行われていなかったことが、聞き取り調査より確認できたことから、本事象の原因を特定するため、当時の現場作業の時系列及び要因分析調査を行った。調査結果は、以下のとおり。

① 時系列、要因分析調査及び事象の整理

時系列及び要因分析調査の結果を踏まえ、以下の原因が確認された。

(a) 作業要領書の記載不足

油圧管理が適正にできていなかったことは、作業要領書中のシリンダヘッド分解手順に、油圧ポンプに油圧計を取り付ける等、詳細な記載がなかったため、油圧計の取扱いが現場の作業班長に委ねられる状況にあったことによる。

また、作業班長は油圧ポンプへの油圧計の取付け方を知らなかった状況にあり、油圧計が油圧ポンプに装着できない旨を作業監督（正）に伝え、作業監督（正）はテンションボルト用ナットが緩んだら、直ぐに油圧ポンプの加圧を停止すれば問題ないと考え、油圧計未装着状態でもシリンダヘッド分解作業ができると判断し、油圧計未装着状態で作業を実施することを指示した。

(添付資料-52、53)

(b) 作業体制の不備

油圧管理が適正に行うことができていなかったことは、本来、今回の作業をマネジメントすべき作業班長（作業要領書の本作業の管理区分は、作業班長が立会確認、作業監督（正）が記録確認）が、テンションボルト用ナットの緩め作業に従事しており、作業班長は油圧ポンプの操作者の動きが確認できず、また、明確な油圧ポンプの加圧／停止指示を行わず、この結果、ポンプ操作者はポンプの停止指示がなかったと判断したことから加圧を継続し、シリンダライナーに過大圧が付加されたことによる（作業員の配置不備による作業実施）。

(添付資料-52、53)

(c) 油圧ジャッキの取扱いの周知不足

作業前に油圧ジャッキの取扱いの周知を行なっていなかったために、油圧ジャッキボルトの通常のセット位置の確認をせず作業を行い、結果としてテンションボルト用ナットの緩め作業に手間取り、作業員間の油圧ポン

プ停止の明確な合図がなく、その間も加圧が継続されたことによる。

(添付資料-52、53)

(d) その他関連事項

上記の時系列及び要因分析調査から、つば下R部における初期のひび割れは、シリンダライナーの取り外し後の外観点検で確認されていなかったことを点検記録から確認した。この外観点検は、シリンダライナー全体について有意な欠陥の有無を目視により確認するものであり、つば下R部に着目したものではない。

このことから、つば下R部における初期のひび割れは、外観目視では確認できないひび割れであったものと推察される。

上記状況を踏まえ、今後においては、つば下R部に着目した点検項目を設け、浸透探傷試験を実施するものとする。

(添付資料-52、53)

(6) 作業不備に係る調査のまとめ

上記調査及び検証結果から、作業不備の原因の要因分析を行い、今回の作業不備に係る原因は、「作業要領書の記載不足」、「作業体制の不備」、「油圧ジャッキの取扱いの周知不足」であることが確認された。

なお、原因に関するその他関連事項として、つば下R部における初期のひび割れは、聞き取り調査から外観点検では確認できないひび割れであった可能性が確認された。

12. 事象発生の推定メカニズム

工場調査結果、シリンダ分解時の聞き取り調査結果より、以下の原因・メカニズムを推定した。

- ① シリンダライナーの取り外し作業について、作業要領書に油圧ジャッキ、油圧計の取扱いが明確でなかったため、油圧管理を適切に行うことができなかった。
- ② このため、実際の作業では、油圧計を取り付けずに作業を行い、作業員間の油圧に係る合図に気がつかずに圧力をかけ続けたことから、シリンダライナー一部に過大な応力がかかり、No.8 シリンダライナーの最小破断応力を超えたため、つば下R部に初期の周方向のひび割れが発生した。
- ③ その後、組立作業時の締付けにより発生する応力や25%負荷運転試験時の熱及び圧力により発生する応力により、シリンダライナーの周方向全体に割れが進展するとともに、つばリング部についても、締付け等から発生する大きな応力が加わり、縦方向の割れが発生したことにより、シリンダライナーの破損に至った。

(添付資料-54)

13. 事象発生メカニズムの確認・検証

(1) No. 8 シリンダライナーのひび割れの油圧値の検証

引張強さの低下が確認された No. 8 シリンダライナーの取り外し時の油圧により発生するつば下部の応力は、解析結果より、規定油圧上限値（78.4MPa）において、114.2N/mm²であり最小破断応力 140.0 N/mm² 以下となることから、油圧計を監視しながらの通常作業では、ひび割れが発生しないことを確認した。

また、今回のひび割れ事象は油圧計を装着せずに、シリンダライナーの取り外し作業を行なっているが、解析結果から、最小破断応力 140.0 N/mm² を超える油圧値は、98.0MPa 以上であることが確認された。

なお、No. 2 シリンダライナーの最小破断応力 268.2 N/mm² を超える油圧値は、173.7MPa であることが確認された。

（添付資料-55）

(2) 作業不備により加圧された油圧値の検証

「11. (4) 作業不備による油圧値の検証」結果から、シリンダヘッドには、89.0MPa～110.0MPa 程度の圧力が加えられたとする検証結果が得られた。

また、応力解析では油圧値 98.0MPa 以上で、No. 8 シリンダライナーつば下部の初期の周方向のひび割れが発生するとの結果が得られており、上記の試験結果から、作業者間の油圧ポンプの停止に係る連絡合図が遅れたことによる加圧操作により、シリンダライナーを損傷させる可能性があることが確認された。

上記の検証は、聞き取り調査結果に基づき行なっているため、不確定要素は排除できない。また、設備的には油圧ポンプ保護用の安全弁は 210MPa に設定されており、不適切な操作が行われた場合 210MPa まで加圧される可能性があり、この場合、正常な引張強さを有したシリンダライナーであっても、ひび割れが発生する。

（添付資料-51、55）

(3) No. 8 シリンダライナーの通常運転時における健全性の検証

引張強さの低下が確認された No. 8 シリンダライナーが、ひび割れ前の状態において、100%負荷運転時における健全性を検証するために、応力解析を実施した。

応力解析に際し、シリンダライナーには、分解・組立時に油圧操作により応力が発生するが、メーカー取扱説明書において、油圧操作の規定圧力が、73.5MPa～78.4MPa と規定されていることから、油圧の上限である 78.4MPa の条件で 100%負荷運転時の応力解析を実施し、参考として、下限である 73.5MPa の条件下での応力解析も実施した。

その結果、100%負荷運転時において、引張強さの低下が確認された No. 8 シリンダライナーつば下部の発生応力は、125.9 N/mm² であり最小破断応力 140.0

N/mm²以下となることから、100%負荷運転時においては、ひび割れは発生しないことを確認した。

なお、No.2 シリンダライナーについては、100%負荷運転時において、つば下部の発生応力は、125.9 N/mm²であり最小破断応力 268.0 N/mm²以下となることから、同様にひび割れが発生しないことを確認した。

(添付資料-56)

(4) No.8 シリンダライナーのひび割れの応力解析

No.8 シリンダライナーひび割れの解析を行い、以下の内容を確認した。

No.8 シリンダライナー部に過大な応力がかかった場合（油圧値 98.0MPa 以上）、最小破断応力を超えたために、つば下R部に初期の周方向のひび割れが発生することを確認した。

周方向のひび割れが進展した場合に、つば部のリング部について締付け荷重が外面下部に加わり、縦方向のひび割れの要因となる円周方向の応力が発生することを確認した。

(添付資料-57)

(5) 作業不備とシリンダライナーの引張強さ低下の関連性に対する検証

今回のシリンダライナーのひび割れについて、作業不備と Pb 混入によるシリンダライナーの引張強さ低下との関連性を、以下のとおり整理した。

- ①A、B、C号機のシリンダライナーは、平成2年の据付から現在まで、供用期間中の点検において異常は確認されておらず、問題なく使用してきている。今回のシリンダライナーのひび割れは、破面観察の結果、疲労破面は観察されず、急速破壊破面であることが確認されていることから、油圧管理が適正にできずに圧力を掛けすぎたことによる作業不備に絞られる。
- ②また、正常なシリンダライナーであっても、今回のように油圧管理が適正にできずに圧力を掛けすぎると、シリンダライナーの最小破断応力を超えひび割れが発生する可能性があることが確認されている。
- ③最も引張強さが低下したシリンダライナーについて、適正な油圧管理による作業が行われていたとすると、運転期間中を通じてつば下R部に発生する応力は、シリンダライナーの最小破断応力以下であり、ひび割れは発生しないことが応力解析結果から確認されている。
- ④ウイドマンステッテン黒鉛は、製造時における Pb 混入と鑄込み後の冷却速度が遅いことにより発生することが文献から知られていることから、供用期間中に発生するものではない。

上記結果を踏まえると、今回のシリンダライナーのひび割れは、油圧管理が適正にできずに圧力をかけ過ぎた作業不備が原因であり、作業不備とシリンダ

ライナーの引張強さ低下の両者に対する関連性はない。

なお、今回の調査において、ディーゼル発電機A、B号機のシリンダライナー製造時に Pb が混入した可能性があることから、超音波速度測定によりシリンダライナーの引張強さの低下が確認されているものは、新品に交換する対策を講ずる。

14. 推定原因

- ① シリンダライナーの取り外し作業について、作業要領書に油圧ジャッキ、油圧計の取り扱いが明確でなかったため、油圧管理を適切に行うことができなかった。
- ② このため、実際の作業では、油圧計を取り付けずに作業を行い、作業者間の油圧に係る合図が遅れ圧力をかけ続けたことから、シリンダライナー部に過大な応力がかかり、No.8 シリンダライナーの最小破断応力を超えたため、つば下R部に初期の周方向のひび割れが発生した。
- ③ その後、組立時の締付けにより発生する応力や25%負荷運転試験時の熱及び圧力により発生する応力により、シリンダライナーの周方向全体に割れが進展するとともに、つばリング部についても、締付け等から発生する大きな応力が加わり、縦方向の割れが発生したことにより、シリンダライナーの破損に至った。
- ④ また、調査の過程で一部のシリンダライナーの引張強さの低下が確認された原因は、シリンダライナー製造会社の製造時に、原材料へPbが混入したことにより、鑄造過程でウィドマンステッテン黒鉛が発生したことであることを確認した。
- ⑤ なお、今回のシリンダライナーのひび割れは、今回のように油圧計を取り付けずに作業を行い圧力を掛けすぎた場合、材料強度の低下には関係なく発生することから互いの関連性はない。

(添付資料-58)

15. 再発防止対策

(1) C号機シリンダライナーに係る対策

ひび割れの発生したNo.8シリンダライナーの他、12個全てを健全性が確認されている新品と交換するものとする。

(2) A、B号機シリンダライナーに係る対策

A、B号機のシリンダライナーについても製造時にPbが混入した可能性があることから、超音波速度測定を行い、引張強さの低下が確認されたものは、新品と交換するものとする。

(3) ディーゼル発電機分解点検の作業要領書に係る対策

- ① シリンダヘッド分解時の手順や工具の取扱方法を明記するとともに、ナット緩め時の圧力を記録することも追加する。
- ② シリンダヘッド分解時の作業体制（作業指揮者、ナット緩め作業員、ポンプ操作者）を明確に区分し、記録することを明記する。
- ③ 油圧ジャッキの取扱い方法を作業前段階で、作業員全員に周知徹底する旨を明記する。
- ④ 今回の作業不備に係る原因のその他関連事項の再発防止対策として、つば下R部の浸透探傷試験の実施を明記する。

（添付資料-59）

(4) 調達管理の改善

製造時の Pb 混入による引張強さが低下したシリンダライナーが納入されないように、「材料の成分分析の調査方法」及び「材料の機械的強度の試験方法」を「請負契約に係る一般仕様書」に明記し、受注者から提出される契約仕様書への調達要求事項を明確にするとともに、契約仕様書の審査時に上記調達要求事項に係る記載内容及び方法が適切であるかを確認することによって対策を講ずる。

16. A、B号機の健全性確認手法に係る検証

工場における調査結果の通り、A、B号機のシリンダライナーについても Pb が混入し引張強さが低下している可能性があることから、その健全性を確認する手法として、C号機のシリンダライナーを用いて超音波速度の測定を行い、その有効性について検証を行った。

(1) 超音波速度の測定

一般的に超音波速度とヤング率との関係は、ヤング率の大きいものほど、超音波速度は高く測定される。また、超音波速度と引張強さの間にも相関があることが知られている。

一方、今回の工場調査において、ウィドマンステッテン黒鉛が確認されたシリンダライナー5個と正常な黒鉛組織であるシリンダライナー4個の応力-ひずみ線図を採取し、引張強さが小さいものほど、ヤング率が小さいことが確認されている。

このことから、引張強さとの相関がある超音波速度の測定により、シリンダライナーの健全性が確認できる可能性がある。そのため、C号機のシリンダライナー12個と予備品のシリンダライナー23個の超音波速度の測定を実施し、シリンダライナーの健全性評価が可能であるか検証を行なった。

測定結果としては、引張強さが低い No. 5、7、8、9、10 シリンダライナーの超音波速度は 4699m/s～4896m/s であった。一方、健全であったシリン

ダライナー (No. 1、2、3、4、6、11、12) は 4978m/s～5119m/s であった。また、製造時に健全性が確認されている予備品のシリンダライナー23個の超音波速度は 4983m/s～5027m/s の幅にあり、引張強さが低いシリンダライナーと有意な差があることが確認された。

(添付資料-60、-61)

(2) シリンダライナーの引張強さと超音波速度の関係について

上記調査結果を踏まえ、シリンダライナーの実測による引張強さと超音波速度の関係を整理した。その結果、引張強さが大きいほど超音波速度が速い関係が一次関数として整理でき [3]、超音波速度を測定することにより、引張強さを推定することが可能であることを確認できた。

ウイドマンステッテン黒鉛が確認されたシリンダライナーの引張強さについては、下部に比べて中部が相対的に低い値であり、No. 5、7、8、9、10のそれぞれの中部と下部の引張強さの最大差は、 23N/mm^2 (No. 5) であった。シリンダライナー下部における超音波速度の測定による引張強さの関係を保守的に評価するため、中部と下部の引張強さの最大差 23N/mm^2 を近似式に考慮するとともに、超音波速度の測定精度 25m/s の考慮を行い、メーカー管理値 (245N/mm^2 以上) の超音波速度は、 4960m/s 以上であることが確認された。

シリンダライナーの健全性については、引張強さの低下の原因であるウイドマンステッテン黒鉛の発生の有無を判定することが必要となることから、それを判定する超音波速度の基準値については、上記検討結果により 4960m/s 以上と考えることができる。

(添付資料-62)

参考文献

- [3] 吉浦、高橋、下部、佐藤、清水：平成7年度 研究報告 大分県産業科学技術センター 超音波探傷法による鋳鉄材料の評価技術に関する研究

(3) A、B号機の健全性確認手法に係る検証のまとめ

シリンダライナーについては、超音波速度を測定することにより引張強さの状況を推定することが可能であることが確認されたことから、引張強さの低下の原因となるウイドマンステッテン黒鉛の発生の有無を、超音波速度の測定により確認できることを検証することができた。

このことから、シリンダライナーにウイドマンステッテン黒鉛が発生しているかの有無を判定する上では、超音波速度が 4960m/s 以上であることにより確認可能である。

そのため、ディーゼル発電機A号機及びB号機のシリンダライナーについては、シリンダライナーの超音波速度 (ウイドマンステッテン黒鉛発生の有無が識別できる。) を測定し、ウイドマンステッテン黒鉛が発生しているものについては、新品と交換するものとする。

17. 水平展開

今回の不具合事象は、重要性の高い機器の分解点検作業において、分解点検時の手順が作業要領書に明記されていなかったことに起因していることから、「設備に過大な力が負荷される恐れのある作業」については、その手順が作業要領書に明記されているかを調査し、明記されていない場合は作業要領書の改訂を行なう。

また、ウイドマンステッテン黒鉛が発生する材料は、炭素が片状黒鉛の形で存在する片状黒鉛鑄鉄であることが知られている。この片状黒鉛鑄鉄については、安全上重要な機器の構造部材として使用されていないことが確認されており、安全上重要な機器の機能部材に対して一般的に機械的強度を要求されるものに使用されておらず、今回のシリンダライナーのような特殊な部材への使用に限られている。

しかしながら、今回のディーゼル発電機C号機のシリンダライナーひび割れを踏まえ、念のため、安全上重要な機器の機能部材に関して片状黒鉛鑄鉄を用いているものは、「機械的強度を要求しているか」、「ひび割れが発生した場合に、機器の安全機能に影響があるか」の調査を行い、該当する部品はウイドマンステッテン黒鉛発生の有無について調査を実施する。

(添付資料-63)

用語集

ア行

用語	説明
ウィドマンステッテン黒鉛 (Widmanstätten graphite)	片状黒鉛鑄鉄の黒鉛が、ヒゲ状、麦穂状、メッシュ状の形状をしているもの
遠心鑄造	金型を回転させながら熔融金属を注入し、遠心力を利用して凝固させる鑄造法 遠心力による加圧凝固で製造された製品には、組織が緻密で有害欠陥が少ないという優れた特徴がある
オイルリング	油かきリングとも言い、ピストンの溝にはめ込んで、シリンダ内の不必要な潤滑油をかき落とす部品
応力 - ひずみ線図	鋼を引張試験機にかけて引張った時の荷重(応力)とひずみの関係を線図に表したもの
音速 (超音波速度)	物質の音波を伝える速さ しばしば物質の基本的な特性として示される 音速は物質の弾性率と密度との関係により変化する

カ行

用語	説明
カジリ	異物の混入や潤滑不足などで、擦れ合う部位が固着して動かなくなる状態
吸気弁	燃焼用空気の供給のためにシリンダヘッドに取り付ける部品
クランクシャフト	往復運動を回転運動にする機構部分で、連接棒の大端部が接続される部品

サ行

用語	説明
実体強度	製品の実体もしくは余長部から材料試験の試験片を作り、確認された材料の強度
始動弁	始動用の空気の供給のためにシリンダヘッドに取り付ける部品
磁粉探傷試験 (Magnetic Particle Inspection)	磁性体の粉末(磁粉)を被検査物に付着させた上磁化させると、傷等の欠陥が存在する場合は、磁極化して磁粉が集中することにより、指示模様として観察する方法、略称 MT
締付け用油圧ポンプ (油圧ジャッキ)	テンションボルトを締付けるための油圧工具

サ行 (つづき)

用語	説明
シリンダ	内燃機関で、ピストンが往復運動をする円筒形の内面を形成する部分
シリンダカバパッキン	シリンダヘッドとシリンダライナの間のガス漏れを防ぐための部品
シリンダジャケット	シリンダライナの外側に冷却水の通路を形成している部品
シリンダヘッド	シリンダの上部を覆って、燃焼室を形成している部品
シリンダヘッドの爆面	シリンダヘッドの部位で燃焼室側の面
シリンダライナー	機関本体にはめ込んで、シリンダ体を構成する円筒形の部品
シリンダライナーつば下	シリンダライナーつば部の下側のことで、シリンダジャケットが接続される部分
シリンダライナーつば部	シリンダライナーの上側で「刀のつば」の形状をした部位で、その上側にシリンダヘッドが接続される部分
浸透探傷試験 (PT:Penetrant Testing)	現像剤により毛細管現象を利用して浸透指示模様として観察する方法、略称 PT
接種	片状黒鉛鋳鉄を鋳造する際の、機械的性質及び切削性向上を目的とした溶湯処理のことで、溶湯に少量の合金を添加することで行われる
接種剤	接種のために添加する合金のこと

タ行

用語	説明
超音波	人の可聴周波数範囲 (20Hz～20kHz) 以外の音波の総称 指向性が高く物理的な利用が可能
ディンプル	延性破壊の破断面に見られる粒状の凹凸
テンションボルト テンションボルトナット	シリンダヘッド、シリンダライナー及びシリンダジャケットを機関本体に締付けているボルト、ナット

ナ行

用語	説明
鉛快削鋼	鋼に硫黄と鉛などを添加して、切削の際の切粉が細くなるようにして被削性を良くした鋼
燃料加減軸	内燃機関の燃料を制御するために、调速装置(ガバナ)の作動力を伝達するリンク機構部分
燃料噴射弁	燃料を供給するためにシリンダヘッドに取り付ける部品

ハ行

用語	説明
排気弁	燃焼ガスを排出するためにシリンダヘッドに取り付ける部品
パーライト	鉄鋼材料にあらわれる顕微鏡組織の名 オーステナイトが薄板状のフェライトとセメンタイト相との層状の共析晶に変態したもの
引張試験	引張試験機を用いて試験片(テストピース)を引っ張り、降伏点、耐力、引張り強さ、伸び、絞りなどを測定する試験
ピストン	内燃機関で、燃焼ガス圧力を受けてシリンダ内を往復する部品で、ピストンヘッドとピストンスカートから構成される
ピストンスカート	ピストンの下側部分で、ピストンヘッドと接合される部品
ピストンピン	ピストンと連接棒の小端部を接続している部品
ピストンヘッド (クラウン)	ピストンの上側部分で、燃焼ガス圧力を直接受ける部品
ピストンリング	ピストンに装着されたコンプレッションリング(圧力リング)及びオイルリング(油かきリング)の総称
片状黒鉛鋳鉄	鋳鉄中に分散する黒鉛の形が三日月状であることから、片状黒鉛鋳鉄と呼ばれている。 別名「ねずみ鋳鉄」とも呼ばれ、JIS 記号では「FC」である。

マ行

用語	説明
ミルシート	鋼材の材質を証明する添付書類のこと 内容は鋼材の機械的性質や化学成分などで、規格値と製造実績値が記載される

ヤ行

用語	説明
ヤング率	引張力(圧縮力)に対する変形のしにくさを表す物性値であり、弾性変化内での応力とひずみの間の比例定数 縦弾性係数

ラ行

用語	説明
連接棒	内燃機関で、回転運動にするためにピストンの往復運動をクランク軸に伝達する部品 小端部にピストン、大端部にクランク軸が接続される

H

用語	説明
HB硬さ (Brinell Hardness)	ブリネル硬さ 工業材料の硬さを表す尺度の一つで、鋼球圧子を用い試験面にくぼみを付けたとき、用いた試験荷重を球状の永久くぼみの表面積(mm ²)で除した値

S

用語	説明
SEM (Scanning Electron Microscope)	走査電子顕微鏡 絞った細い電子線(電子ビーム)で対象を走査し、電子線を当てた対象物の座標から放出される二次電子、反射電子、X線等を検出することで対象の観察をおこなう
スンプ(SUMP) (Suzuki's Universal Microstructure Printing Method)	非破壊検査法の一つで、試験片採取が不可能な装置・機器および大型部品の表面欠陥や表面組織などを観察する方法で、観察面を研磨・エッチングしたあと、アセチルセルローズ膜に転写し、その転写膜を光学顕微鏡や電子顕微鏡で観察をおこなう

添付資料一覧

- 添付資料-1 事象発生場所
- 添付資料-2 負荷運転記録
- 添付資料-3 周辺モニターチャート
- 添付資料-4 点検実績表及び C-DG 点検記録
(締付け、外観目視、寸法検査記録(現地：設備点検時))
- 添付資料-5 高速増殖原型炉もんじゅ C-DG No. 8 シリンダライナーひび割れ事象聞き取り調査結果
- 添付資料-6 C-DG No. 8 シリンダライナーひび割れ事象要因分析図
- 添付資料-7 C-DG No. 8 シリンダライナー(取付状態)での観察結果
- 添付資料-8 外観目視検査記録：シリンダライナー(現地調査)
- 添付資料-9 異物混入状況の確認検査記録：シリンダライナー・ジャケット(現地調査)
- 添付資料-10 外観目視、浸透探傷検査記録：シリンダライナー・シリンダジャケット(現地調査)
- 添付資料-11 シリンダライナー締付け確認結果(現地調査)
- 添付資料-12 油圧計校正結果(現地調査)
- 添付資料-13 シリンダライナー締付けボルト点検結果(現地調査)
- 添付資料-14 燃焼室内部確認結果(現地調査)
- 添付資料-15 ピストリング組み合わせの確認結果(現地調査)
- 添付資料-16 ピストクラウン(ヘッド)・ピストン・連結棒合いマーク確認結果(現地調査)
- 添付資料-17 燃料弁点検記録(現地調査)
- 添付資料-18 冷却水配管内部確認結果(現地調査)
- 添付資料-19 給気管内内部点検記録(現地調査)
- 添付資料-20 燃料加減軸の動作状況確認結果(現地調査)
- 添付資料-21 非常用ディーゼル発電機設備 C号機 振動測定記録

- 添付資料-22 No. 8 シリンダヘッド 外観検査記録(工場調査)
- 添付資料-23 No. 8 シリンダヘッド 耐圧漏えい検査記録(工場調査)
- 添付資料-24 No. 8 シリンダヘッド 浸透探傷検査記録(工場調査)
- 添付資料-25 No. 8 シリンダヘッド 磁粉探傷検査記録(工場調査)
- 添付資料-26 No. 8 シリンダヘッド 寸法検査記録(工場調査)
- 添付資料-27 No. 8 シリンダヘッド 寸法不具合及び指示模様関係図
- 添付資料-28 調査事項に使用する語句の定義と該当箇所
- 添付資料-29 縦方向のひび割れの状況について(外観観察)
- 添付資料-30 周方向のひび割れの起点部及び最終破断部について(外観観察：工場調査)

- 添付資料-31 縦方向のひび割れ（未貫通部：観察のため強制開口）に係る破面観察（SEM）状況（工場調査）
- 添付資料-32 周方向のひび割れの起点部に係る破面観察（SEM）状況（工場調査）
- 添付資料-33 周方向のひび割れの最終破断部に係る破面観察（SEM）状況（工場調査）
- 添付資料-34 破断部の組織観察状況（工場調査）
- 添付資料-35 No. 2 及び No. 8 シリンダライナー引張強さ、金属組織、Pb 含有量の関係説明図
- 添付資料-36 No. 2 及び No. 8 シリンダライナー引張試験結果
- 添付資料-37 No. 2 及び No. 8 シリンダライナー成分分析結果
- 添付資料-38 No. 8 シリンダライナー化学成分分析結果（工場調査）
- 添付資料-39 シリンダライナー10 個の超音波速度、金属組織、Pb 含有量の関係説明図
- 添付資料-40 シリンダライナー10 個のうちウィドマンステッテン黒鉛が確認されたシリンダライナーの引張試験結果
- 添付資料-41 シリンダライナー10 個の化学分析結果
- 添付資料-42 シリンダライナーの Pb 含有量と引張強さの関係図
- 添付資料-43 ミルシートと実体強度の違いの説明図及び JIS G 5501 (1976) 抜粋
- 添付資料-44 シリンダライナー製造工程
- 添付資料-45 製造ラインにおける Pb 混入期間特定年表
- 添付資料-46 シリンダライナー製造会社内での品質異常報告（1989 年 4 月）を受けての調査資料
- 添付資料-47 鋼屑規格（シリンダライナー製造会社社内規格）
- 添付資料-48 No. 8 シリンダ部分解時の作業不備に係る図面調査結果
- 添付資料-49 No. 8 シリンダ分解時の聞き取り調査結果
- 添付資料-50 作業要領書の内容調査結果
- 添付資料-51 シリンダヘッドの過大圧値（油圧値）の検証試験結果
- 添付資料-52 非常用ディーゼル発電機 C 号機 No. 8 シリンダひび割れ時系列
- 添付資料-53 要因分析
- 添付資料-54 事象発生メカニズム説明図
- 添付資料-55 No. 2 及び No. 8 シリンダライナーつば下部の油圧を増加させた場合の応力結果
- 添付資料-56 No. 2 及び No. 8 シリンダライナー100%負荷運転時の応力の時系列変化
- 添付資料-57 No. 8 シリンダライナーひび割れ事象の解析によるメカニズムの検証結果
- 添付資料-58 推定原因のまとめ説明図

- 添付資料-59 再発防止対策整理表
- 添付資料-60 超音波速度測定原理及び超音波速度と弾性率（ヤング率）の関係について
- 添付資料-61 シリンダライナーの超音波速度測定結果
- 添付資料-62 シリンダライナーの超音波速度と引張強さの関係図
- 添付資料-63 水平展開対象の調査フロー

- 参考資料- I 外観観察写真及び走査電子顕微鏡 (SEM) 写真