

敦賀発電所1号機の制御棒動作不良の原因と対策について

当社、敦賀発電所1号機（沸騰水型軽水炉：定格出力35万7千）は、定格出力運転中の平成9年10月23日、制御棒駆動系の定期試験において、制御棒73体のうちの1体（22-23）が動作しないことが確認されたことから、点検調査のため、10月25日6時00分に原子炉を手動停止しました。なお、この事象による環境への放射能の影響はありませんでした。

その後、原子炉圧力容器のふたを開放し、当該制御棒について水中カメラにより観察した結果、制御棒ブレード4枚のうち1枚に3ヶ所の膨らみ状変形があり燃料集合体チャンネルボックスと干渉していました。また、そのブレード表面に線状、点状模様が認められました。

制御棒と干渉していた燃料集合体2体については、チャンネルボックス表面に制御棒との接触痕等が認められましたが、燃料漏えい検査の結果、燃料の健全性に問題はありませんでした。

さらに、炉内に装荷していた他の類似制御棒（タイプ2）8体については、うち1体（30-15）で微小な線状模様が確認されました。なお、使用済制御棒10体（ABB社製）についても変形や割れ等は認められませんでした。

（平成9年10月24日、11月7日、18日、12月3日記者発表済）

【原因調査結果】

（1）発電所での調査結果

1. 当該制御棒（22-23）の外観点検の結果、変形が生じていたブレード表面の上部に計35箇所の横割れ、縦割れが認められました。
2. また、類似制御棒1体（30-15）のブレード表面に24箇所の微小な割れが確認されました。

（2）当該制御棒の変形・割れ部の詳細調査結果

干渉していた制御棒（22-23）の膨らみ状の変形部や割れ部について、照射後試験施設において、詳細調査を実施した結果は以下のとおりです。

1. 制御棒上部（ハフニウム+ボロンカーバイド領域）の外側端部の横割れ部
制御棒上端部から約960mmのブレードの横割れは、端部の溶接部近傍から曲げ加工（かしめ）部に発生しており、外表面から内面にかけて貫通していました。また、破面は粒界割れの様相を呈していました。

2. 制御棒上部（ハフニウム+ボロンカーバイド領域）の縦割れ部
縦割れは外表面から内面にかけて貫通しており、破面は粒界割れの様相を呈していました。また、ブレード内のハフニウムは、ボロンカーバイド側で水素を含んで体積膨張し、ブレード壁を押し拡げていました。

3. 膨らみ状変形部
膨らみ状変形部を調査した結果、中性子吸収材充てん孔の間（リガメント部）が破断しており、その破面は、延性割れの様相を呈していました。また、3箇所の変形部のうち最大に膨れていた箇所については、制御棒内側で開口しており、その破面も延性割れの様相を呈していました。

さらに、開口していない2ヶ所の変形部のブレード内部を観察した結果、吸収材充てん孔入口部に、炉水とボロンカーバイド（B4C）の反応により生成されたほう酸と中性子照射により発生したリチウムの化合物が固着しており、コミュニケーションスリット及び充てん孔が閉塞されていることが確認されました。

（3） 制御棒ブレードの製造状況調査

製造過程において、ブレード外側端部の曲げ加工（かしめ）や、吸収材充てん後の端部溶接により生じたブレードの曲がりを矯正加工していることにより、ブレード上端および下端から約600～1000mmの位置の外側端部に加工ひずみ（残留応力）が発生する可能性があることが確認されました。

（4） 解析・評価

制御棒ブレード内に水が浸入した後、コミュニケーションスリット及び充てん孔入口が閉塞され、発生するガスの圧力を均等にすることが出来なくなった場合、ボロンカーバイドの中性子吸収によって発生するヘリウム、水とボロンカーバイドやリチウムとの反応によって生じる水素等によって充てん孔内圧が上昇し、リガメント部が破断し、これによりブレードの膨れや開口が発生する可能性があることが判明しました。

【推定原因】

制御棒の動作不良の原因は、制御棒で膨らみ状変形が発生し、燃料集合体チャンネルボックスと干渉したためであり、膨らみ状変形が発生した原因は以下のように推定されました。

（1） 割れの発生

制御棒製造時にブレード上下端部付近に局部的に加工ひずみや残留応力が生じたため、運転中に中性子照射量の比較的多いブレード上部に照射誘起型の応力腐食割れ（IAS

CC)が最初に発生しました。

(2) 二次的な割れの発生

最初の割れの発生により、制御棒ブレード内に炉水が浸入、ハフニウムが、水とボロンカーバイドとの反応により発生した水素を含んで体積膨張したことにより、ブレード壁が押し拡げられたことから、中性子照射の影響によりブレード外表面から二次的な割れ（IASCC）が発生しました。

(3) 膨らみ状の変形の発生

プラント停止時に、割れより炉水がブレード内に大量に浸入し、その後、原子炉起動に伴う温度上昇により、ボロンカーバイド領域において、水とボロンカーバイドの反応によりほう酸が生成され、ほう酸とリチウムの化合物が充てん孔入口部で固着し、これが充てん孔を閉塞しました。このため、充てん孔内で発生したヘリウムや水素等により、充てん孔内圧が上昇し、リガメント部が破断し、膨らみ状の変形及びその変形に開口が発生しました。

【対策】

膨らみ状変形が発生した制御棒及び同型の制御棒計9体については、今回と同様な不具合が生ずる恐れのない新品の制御棒（タイプ1）に取り替えるとともに、今後、新型の制御棒を導入する場合には、定期検査時に計画的に健全性を確認する等、品質保証活動を強化することとしました。

なお、燃料集合体は膨れ部が干渉していた制御棒廻りの4体を取替えます。

また、東海第二発電所については、今回の事象に鑑み、同型の制御棒を現在実施中の定期検査において、同様に取り替えます。

以上

(通産省のINES*による暫定評価)

基準1	基準2	基準3	評価レベル
—	—	1	1

* INES : 国際原子力事象評価尺度

【用語解説】

・制御棒駆動系

原子炉の起動・停止等を行うため制御棒を水圧にて駆動する装置で、敦賀発電所1号機では73体設置されている。

・延性破面

材料に大きな力が作用した場合、大きな変形を伴って破壊する事象で、材料が延性破壊

を起したときに見られる破面。

- ・ボロンカーバイド（B₄C）

炭化ホウ素とも呼ばれる中性子吸収材で、粉末をステンレス鋼に開けた横孔につめて制御棒として用いられている。

- ・粒界割れ

金属結晶の粒界に沿った割れ。

- ・照射誘起型の応力腐食割れ（IASCC）

原子炉内構造物にはオーステナイト系ステンレス鋼が多く使用されているが、ステンレス鋼に耐食性を与えているCr（クロム）が結晶粒界で欠乏する鋭敏化が中性子照射下で生じ、応力腐食割れ感受性が增大する、とされているのが照射誘起型の応力腐食割れ（IASCC）である。

- ・制御棒リガメント部

制御棒ブレードに横向きに開けられている中性子吸収材充てん孔と充てん孔を隔てる壁の部分を用いる。

- ・コミュニケーションスリット

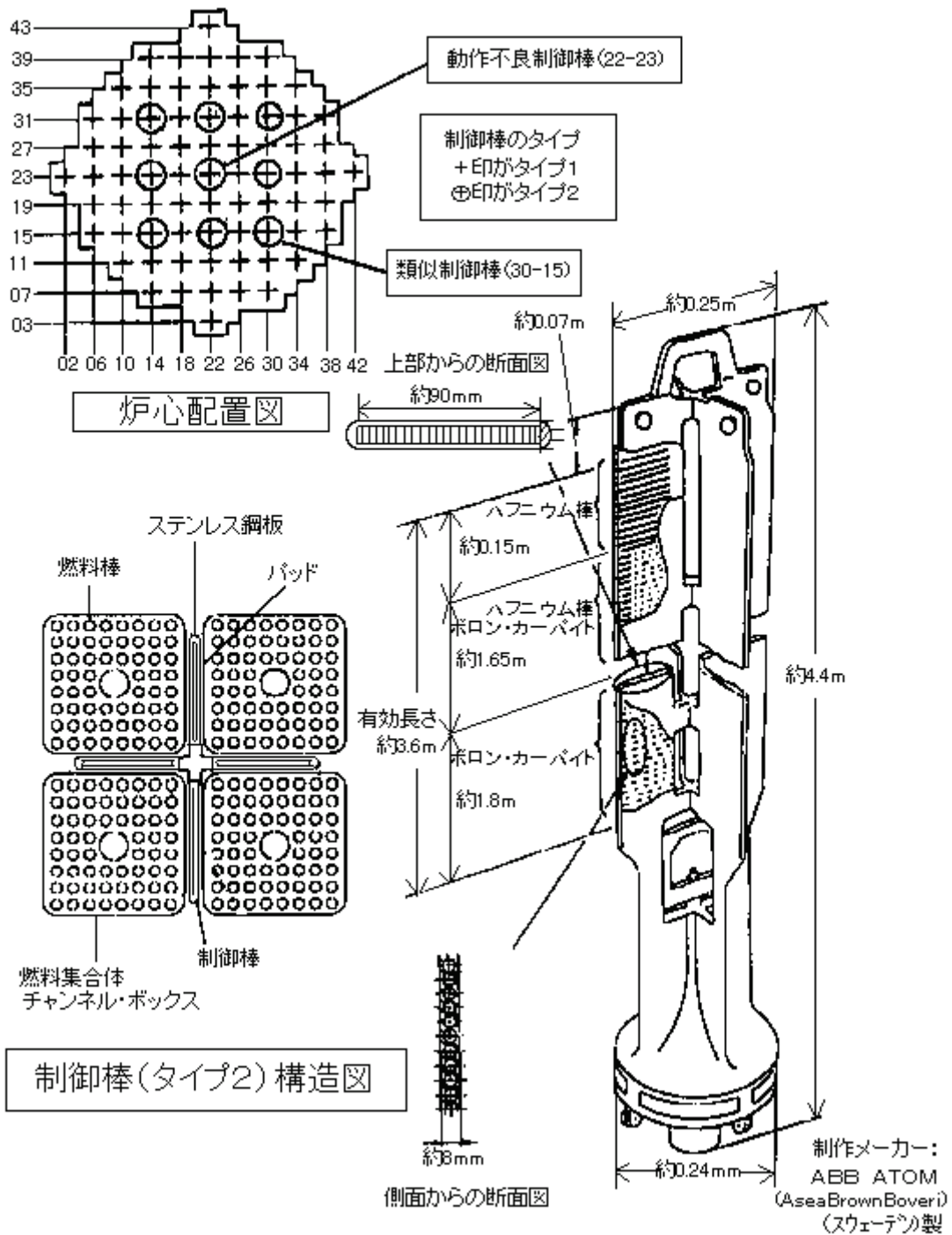
中性子照射により制御棒内に発生するガスの圧力を均等にするためのブレード上下をつなげている管状の部分。

図-1 制御棒の概略図（タイプ2）

図-2 制御棒外観状況図

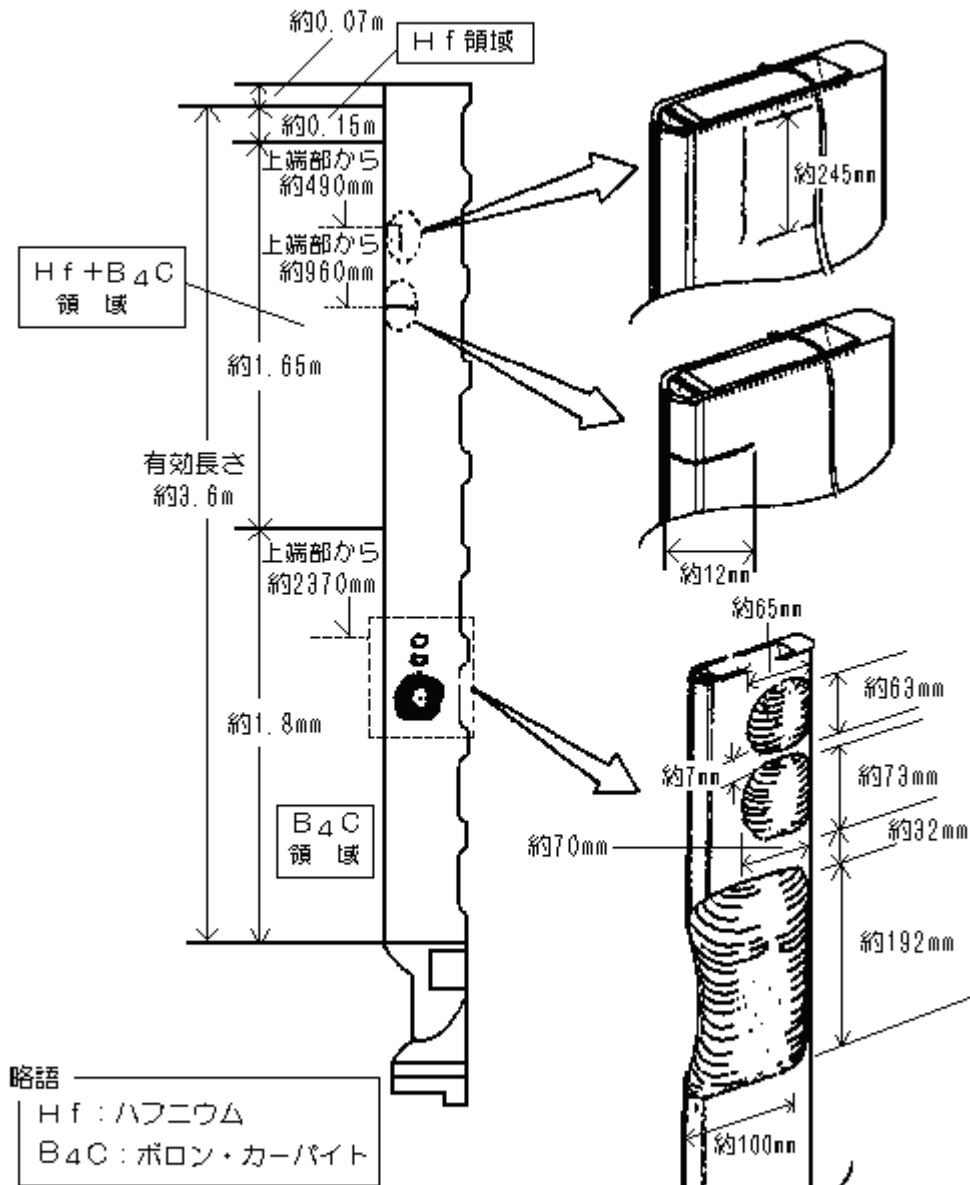
図-3 制御棒22-23膨れ発生推定フロー図

図-4 制御棒の概略図（タイプ1）



制御棒外観状況図

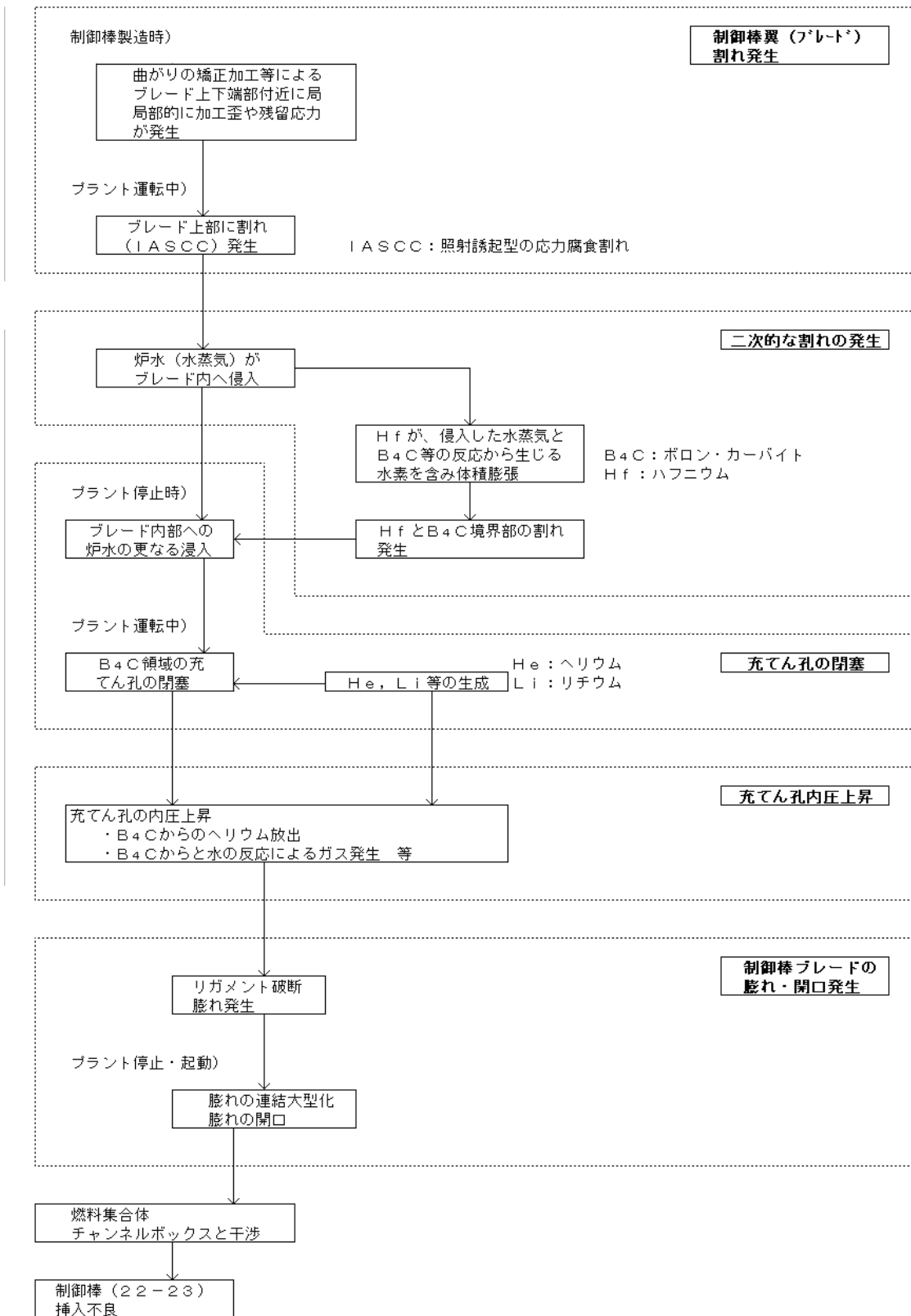
(制御棒22-23の代表的な割れ・変形のみ)



略語
 Hf : ハフニウム
 B₄C : ボロン・カーバイド

箇所		詳細点検結果			製造工程過程の表面仕上げや取扱時に発生した模様
	前回発表時の線状・点状模様	割れ			
		割れ	二次的割れ	計	
22-23	143	1	34	35	108

制御棒 22-23 膨れ発生推定フロー図



制御棒の概略図 (タイプ1)

