

令和2年6月9日
北海道電力株式会社
関西電力株式会社
四国電力株式会社
九州電力株式会社
日本原子力発電株式会社

原子炉容器上部ふたサーマルスリーブの摩耗に関する
国内プラントに対する見解及び今後の取り組みについて

1. はじめに

原子炉容器上部ふたサーマルスリーブの摩耗事象については、Belleville2号機の事象以前から米国のプラントにおいて同様の事象が確認されており、PWR電力では当該部の摩耗に対する保全の検討を進めている。

国内プラントは米国プラントと比較して運転時間が短く、これまでも摩耗による落下等の不具合は経験していない。また、2018年には、比較的運転時間が長いプラントにおいて実機の目視確認を行い、定量的な摩耗データではないものの、直ちに落下に至るようなサーマルスリーブの降下は確認されなかった。

上記にて、国内においては直近でサーマルスリーブの摩耗により落下に至る可能性は十分小さいことが確認されたが、長期的な点検・保全計画を立てるため、より正確な摩耗傾向を把握すべく、今般、代表プラントを対象に定量的なサーマルスリーブの下降量（摩耗量）を測定した。本資料は、当摩耗事象に対し、国内代表プラントにおける点検結果を踏まえた見解及び今後の取り組みの方針についてまとめたものである。

2. サーマルスリーブ周辺の構造と摩耗メカニズム

サーマルスリーブは図1に示すように、原子炉容器上蓋の制御棒駆動装置（CRDM）管台の内側に設置されており、上蓋復旧時の駆動軸の案内、横流れからの駆動軸の保護、管台に対する熱遮蔽といった機能を備えている。サーマルスリーブとCRDM管台は固定されており、CRDM管台内面のテーパ部にサーマルスリーブのフランジ部が自重を預ける構造となっており、サーマルスリーブは外力により揺れ動くことが想定される。

サーマルスリーブの設置される頂部プレナム内では、図1に示すようにスプレイノズルから噴出する一次冷却材の流れ（頂部バイパス流）が原子炉容器上蓋の内面に沿って上昇し、頂部付近で合流した後には下降する流れが存在する。この流れが作用することでサーマルスリーブに流体励起振動が生じる。

サーマルスリーブが振動することで、サーマルスリーブのフランジ部とCRDM内面のテーパ面で摺動し、各々の面で摩耗が発生する。この摩耗が進展すると、図2に示す通り、サーマルスリーブのフランジ部とCRDM管台内面の両方が減肉してサーマルスリーブ全体が降下する。さらに摩耗が進展するとフランジ部が破断し、サーマルスリーブの落下に至る。

フランジ部の破断片はリング形状の異物となり、サーマルスリーブ内を通る駆動軸に絡み、制御棒の挿入不可となる事故に至る可能性がある。なお、CRDM 管台側については、サーマルスリーブとの取り合い部は他部位に比べ板厚に余裕があり、サーマルスリーブのフランジ部が切断するまで摩耗が進行しても構造健全性に問題のないことを確認している。

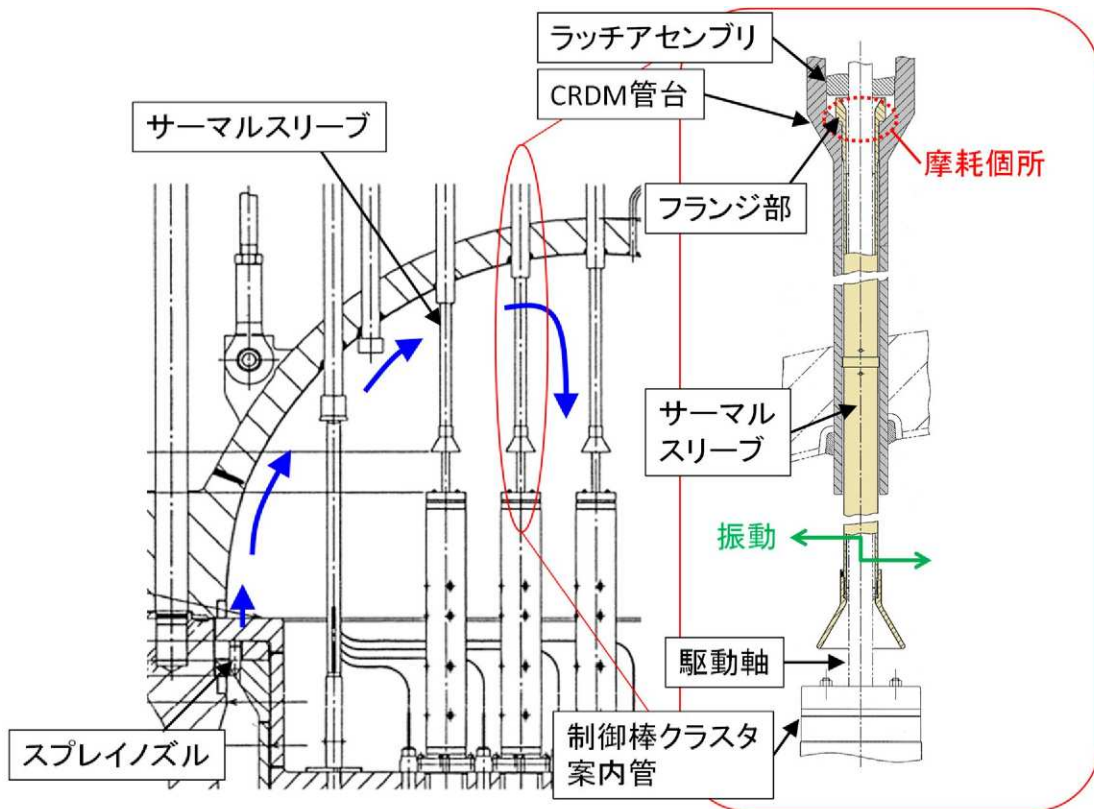


図 1 サーマルスリーブの構造と頂部プレナム内の流況

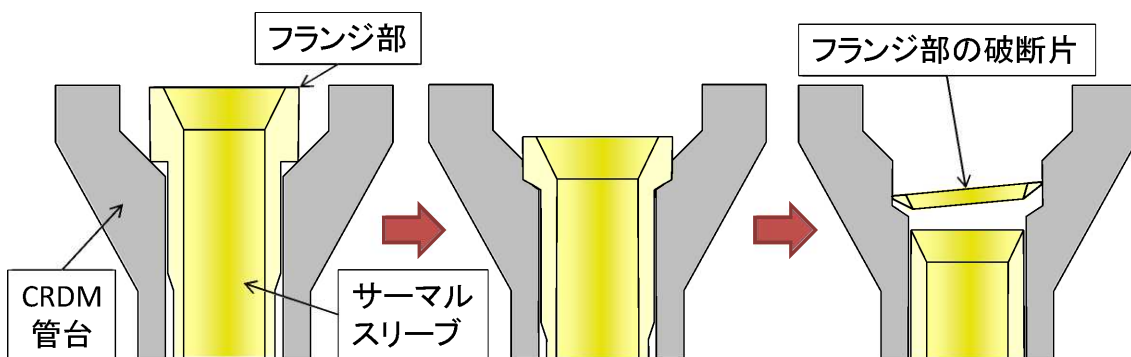


図 2 サーマルスリーブ摩耗の進展イメージ

3. 国内PWRプラントにおける摩耗傾向の評価と点検プラントの選定

プラントのタイプごと、サーマルスリーブの設置位置ごとの摩耗傾向を把握し、代表して点検するプラントを選定するため、頂部プレナム内の流況解析とサーマルスリーブの振動解析を実施して、摩耗のしやすさを示す指標としてフランジ部と CRDM 管台が接触する領域における摺動速さと接触荷重の積（以下、「ワークレート」という。）を評価した。一般に摩耗体積はワークレートに比例するため、ワークレートを評価することで、プラントの炉型、サーマルスリーブの設置位置による摩耗量の相対的な比較評価が可能である。

3.1 解析内容と結果

サーマルスリーブの摩耗事象は、主に頂部プレナム内の流れによる流体励起振動が原因であると考えられることから、初めにサーマルスリーブ周辺の流況を理解するための数値流体力学（CFD）解析を用いた流況解析を実施した（図 3 参照）。続いて CFD 解析の結果を基に、サーマルスリーブの振動解析を実施し、フランジ部と CRDM 接触部におけるワークレートを算出した。

解析は、頂部プレナム内の流速が速いと想定される、頂部バイパス流量比が比較的大きい炉型を対象に実施し、表 1 に示す標準型 4 ループ及び標準型 3 ループを対象に実施した。

解析により、頂部バイパス流量比の大きい標準型 4 ループでは、標準型 3 ループに比べて約一桁大きいワークレートが生じる結果が得られた。また、標準型 4 ループでは、原子炉容器上蓋の中央の位置にて最大のワークレートが生じる評価となり、フランスのプラントにおいて、原子炉容器上蓋の中央付近のサーマルスリーブで顕著な摩耗が生じている実績と類似の傾向が得られた。

表 1 炉型ごとの頂部バイパス流量比(標準型 4 ループに対する比) とワークレート解析値

炉型	プラント	頂部バイパス流量比※1	ワークレート解析 最大値比※2
標準型 4 ループ	大飯 3,4 号機 玄海 3,4 号機 敦賀 2 号機		1
標準型 3 ループ	高浜 3,4 号機 川内 1,2 号機 伊方 3 号機 泊 3 号機		0.09
標準型 2 ループ	泊 1,2 号機		—
初期型 3 ループ	美浜 3 号機 高浜 1,2 号機		—

※1 バイパス流量比が最も大きい標準型 4 ループを 1 として規格化

※2 ワークレート解析値が最も大きい標準型 4 ループを 1 として規格化



(中央断面図)

(上視図)

図 3 標準型 4 ループ頂部プレナム内の流況解析結果

3.2 点検プラントの選定

サーマルスリーブ摩耗量の実機点検を実施する代表プラントは、3.1 項の摩耗ワークレートの解析結果及び上蓋の運転時間から選定する。表 2 に国内プラントの運転年数を示す。ワークレートと運転時間を考慮し、標準型 4 ループで、運転期間の比較的長いプラントを選定した。

表2 国内プラントの運転年数

炉型	プラント	VHR	運転年数 (EFPY ^{※1})
標準型 4ループ	大飯3号機	済	約6
	大飯4号機	済	約6
	玄海3号機	計画中	約16 ^{※2}
	玄海4号機	—	約14
	敦賀2号機	済	約3
標準型 3ループ	高浜3号機	済	約6
	高浜4号機	済	約6
	伊方3号機	済	約1
	川内1号機	済	約6
	川内2号機	済	約6
	泊3号機	—	約2
標準型 2ループ	泊1号機	済	約2
	泊2号機	済	約2
初期型 3ループ	美浜3号機	済	約10
	高浜1号機	済	約12
	高浜2号機	済	約12

※1 EFPYとは定格負荷相当運転年数であり、定格出力で連続運転したと仮定して計算した年数を示す。

※2 約4EFPY運転後に頂部バイパス流量比を現状の値に変更している。

3.3 実機点検

代表プラントにおいて2019年に実機点検を実施した。サーマルスリーブの摩耗は、図2に示すようにCRDM管台の内側で生じることから、摩耗を直接確認することは困難であるため、摩耗によるサーマルスリーブの降下量を測定することで、間接的に摩耗量を測定する。なお、サーマルスリーブが摩耗する際、サーマルスリーブのフランジ部だけでなくCRDM管台の内側も同様に摩耗し、両者の合計値がサーマルスリーブの降下量として計測される。サーマルスリーブとCRDM管台の材料はともにオーステナイト系ステンレス鋼であり、摩耗の傾向に有意な差は無く、およそ同程度ずつ摩耗が進行するものと想定する。

点検対象とするサーマルスリーブは原子炉容器上蓋の中心からの距離に応じた摩耗傾向を把握できるように、図4に示す21箇所とした。また、サーマルスリーブ降下量は図5に示すとおり、CRDM管台の下端位置とサーマルスリーブ口金下端の距離を計測し、原子炉容器上蓋製作時の初期値との差分から算出する。なお、原子炉容器上蓋製作時には当該寸法を計測しておらず、製造図面の公称寸法を初期値とするため、サーマルスリーブ下降量の評価値には、計測の誤差(±0.5mm)に加えて製造図面で定める公差による誤差(±2.5mm)

が含まれる。

点検の結果、最大のサーマルスリーブ降下は上蓋の中央位置で認められ、3.1項の解析と概ね同じ傾向が認められた。最大降下量は8.3mmで、評価誤差を最大限考慮すると11.3mmであった。また、摩耗の進行速度については、最大の下降量11.3mmと点検時の運転期間から、最大で約0.8mm/EFPYである。米国の点検実績^{※3}に基づく評価上の降下速度の上限である1mm/EFPY（0.04インチ/EFPY）に包含されており、米国と同程度の摩耗進展速度であることが確認できた。

※3 Westinghouse “Notification of Potential Existence of Defects Pursuant to 10 CFR Part 21 (LTR-NRC-18-34 May 23, 2018)”から参照

実機点検結果を踏まえた摩耗進展予測を図6に示す。サーマルスリーブの降下は、幾何学形状から時間あたりの摩耗体積が一定であれば線形で進行するため、実機点検結果と原点を結ぶ直線で評価した。また、サーマルスリーブの降下基準値は、摩耗によりフランジ部が減肉し、外力（国内PWR全プラントの包絡Ss地震動、および流動振動）により破断する最小板厚に基づき、約60mmに設定した。図6に示すとおり、今後短期的にサーマルスリーブ降下量が基準値の約60mmに達する可能性は小さいと評価するが、基準値はサーマルスリーブとCRDM管台が同じ比率で摩耗することを想定しているため、今後摩耗が進展し、より正確な評価が必要となるまでには、摩耗の比率を把握する。

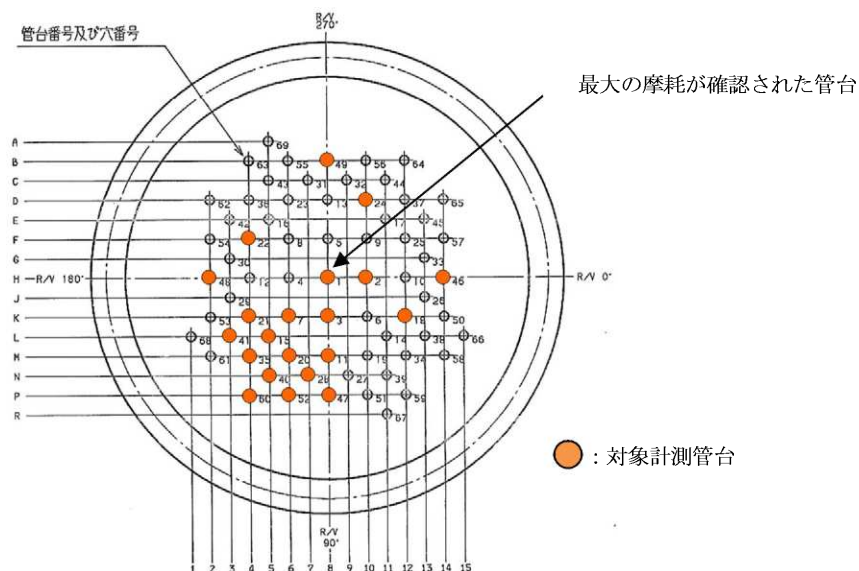


図4 サーマルスリーブ摩耗 点検対象位置

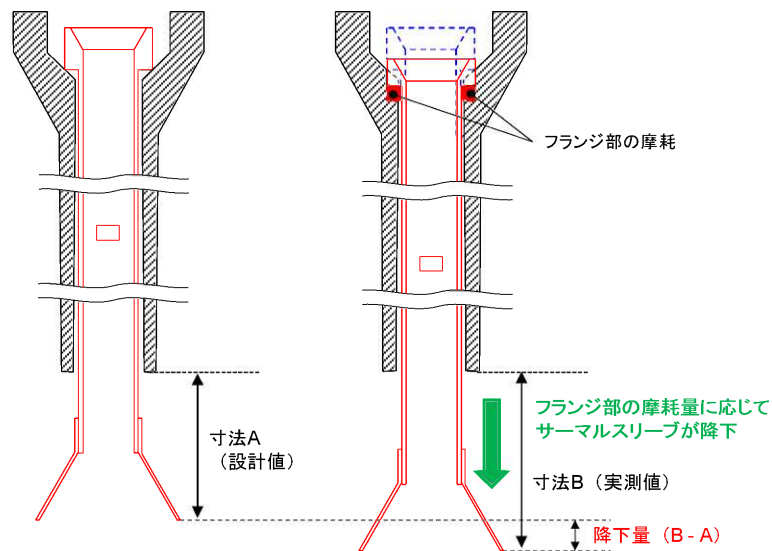


図5 サーマルスリーブ降下量の測定方法

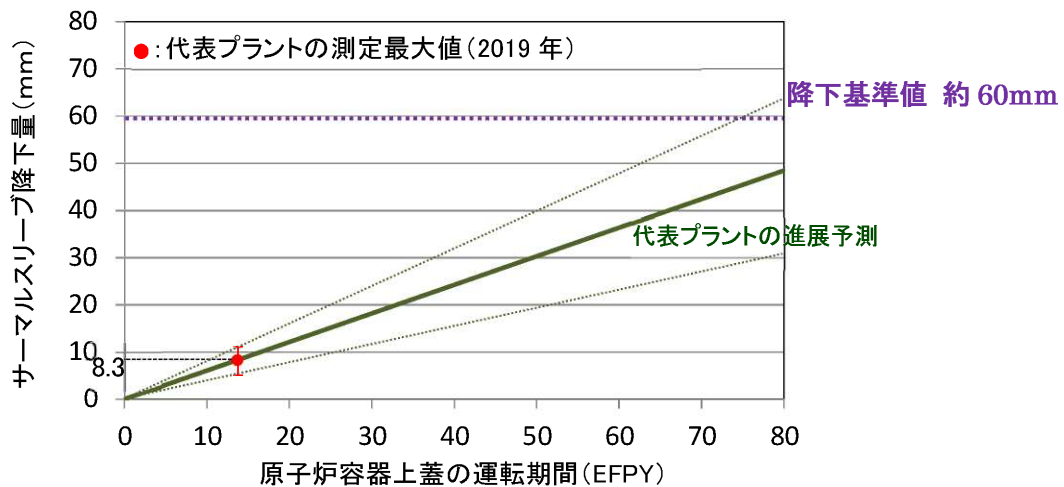


図6 サーマルスリーブ摩耗点検結果と摩耗進展予測

4. 国内におけるサーマルスリーブ摩耗に対する今後の取り組み

国内 PWR プラントにおいて、最もサーマルスリーブ摩耗が進展していると考えられるプラントを代表に、サーマルスリーブ摩耗点検を実施した結果、直ちにサーマルスリーブフランジ部の破断に至る摩耗進展は認められなかった。しかしながら、今後も継続してサーマルスリーブの降下量を測定し、摩耗進行傾向の精緻化を図るとともに、摩耗の管理を行っていく。

計測プラント以外の非代表プラントについては、代表プラントに比べて運転時間が短く、また解析結果により摩耗進展速度は同等または小さいと評価されるが、代表プラントによる健全性評価の保守性を確認することを目的に、炉型・運転時間と摩耗傾向との相関を確認するための実機点検を計画する。

以上