学術論文

PWR炉内構造物の中性子照射型応力腐食割れに対する保全対策の検討

－Maintenance method for Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking of PWR core internals－

関西電力株式会社 亀山 雅司 Masashi KAMEYAMA Member

Irradiation-assisted stress corrosion cracking or IASCC is a well-known result of age-related degradation of baffle former bolts which are an integral component of PWR core internals. However, methods for analyzing the causes and assessing IASCC have yet to be established and are being studied. The baffle former bolts are components of the baffle structure and in order to maintain the integrity of the baffle structure, an effective approach for maintaining the bolts must be provided.

This paper proposes an effective method of maintaining the functions of the baffle structure by improving the configuration and/or material of baffle former bolts. A relaxed configuration of the bolt neck reduces the stress and can approximately halve the damage caused by IASCC.

An improvement in the threshold value of materials' vulnerability to IASCC would not only extend the service life of all bolts but could also substantially retard IASCC of the bolts installed at upper and lower ends where flux is low. If the threshold fluence to IASCC could be made higher than approximately 5×10^{25}n/m^2 (E> 0.1MeV, 340℃), the bolts installed at lower and upper ends, which are conventionally replaced 30 years after plant start-up, would remain intact for 60 years after start-up. Hence, this approach is a very effective maintenance measure.

KeyWords : baffle former bolt, baffle structure, IASCC, neutron flux, maintenance.

1. はじめに

発電用原子炉の炉内構造物は燃料を内包しており、燃料から核反応に伴って放出される中性子に曝されるため、長期的に中性子照射型応力腐食割れ（照射誘起型SCC, Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking 以下IASCC）を起こすことが知られている。海外ではIASCCによる炉内構造物のバッフルフォーマボルト等の損傷事例がある。現在、IASCC発生条件を明らかにするための実験、評価方法の検討がされているが、温度、応力、中性子照射量などIASCC発生に及ぼす影響因子が多く、また、高中性子照射材料を用いた実験は容易でないため、十分なデータが蓄積されているとは言えない状況であり、実プラントのIASCCに関する評価は困難な状態にある。しかし、このような状況下でもボルト取替え等の保全が必要とされる可能性がある。

本稿では、現状知見範囲で有効と考えられるIASCCに対する保全対策方法の検討を行う。

◆連絡先：亀山 雅司
〒530－0005 大阪市北区中之島3-3-22
関西電力株式会社 原子力事業本部 機械技術グループ
E-mail：kameyama.masashi@c2.kepco.co.jp

2. IASCCの基本的な知見

既存のプラントで使用されている材料のSUS347とSUS316cwでは約1×10^{25}n/m^2（E＞0.1MeV, 340℃）

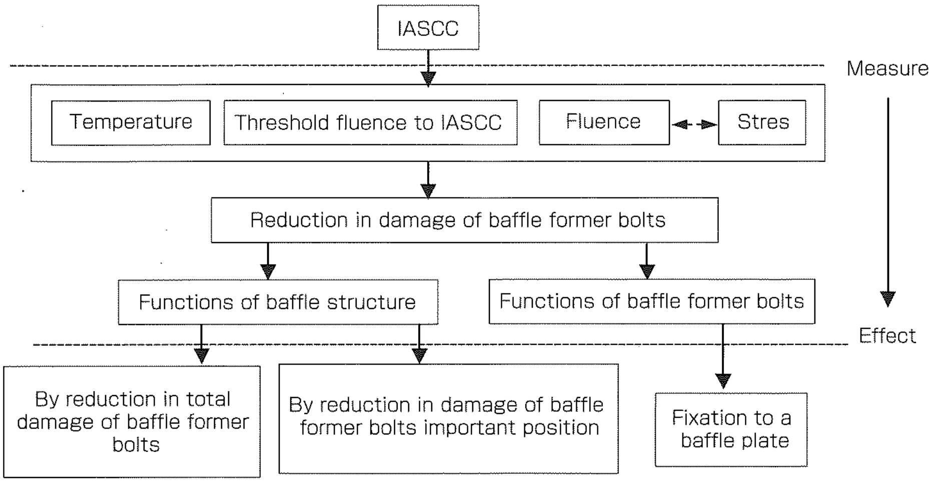

Fig.1 Effective approach of maintenance to IASCC

のしきい値を超えるとIASCC感受性が発生すると考えられている[1]。また、IASCCについてはSCCと同様、き裂発生に関して温度依存性がある[1][2]こと、応力が高いほどIASCCによるき裂の発生までの時間が短いとの報告[1]がある。

3. 検討対象部位

中性子照射量がしきい値を超え、IASCC発生の可能性がある部位は炉内構造物のバッフルフォーマボルト、バレルフォーマボルト、炉心そうである。このうち、中性子照射量が最も多いバッフルフォーマボルトの保全を必要とする可能性が高く、初期型の２ループプラントでは運転開始後約25万時間（約30年）が点検及び一部取替え等の保全の目処[3]と考えられている。

4. IASCCに有効な保全対策の検討

4-1）有効な保全対策の検討の方法

IASCCに有効な保全対策を考えるうえでは、バッフルフォーマボルト単体の損傷に対してだけでなく、バッフルフォーマボルトの損傷によってバッフル構造の健全性維持へ及ぼすことを考慮する必要がある。すなわち、Fig.1に示すように、個々のボルトの機能維持に加えてバッフルフォーマボルトを構成部品とするバッフル構造の機能に着目し、応力、温度等のIASCC発生の原因に対する対策の効果を検討すれば効果的な保全対策が可能と考えられる。

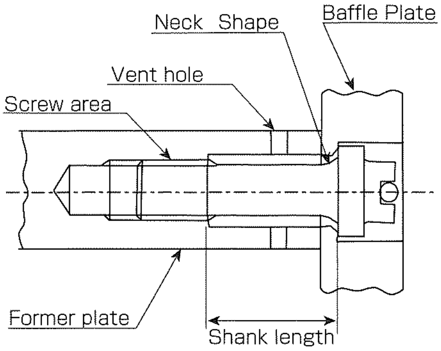

Fig.2 Structure of baffle former

4-2）応力に関する対策

バッフルフォーマボルトの構造はFig.2のようになっており、IASCCはボルト首下の応力の高い場所に発生する。そこで、ボルト首下の曲率を大きくしたり、ボルトのシャンク部（ボルト首からネジ部までの距離）を長くする対策が応力低減に有効である。初期型の２ループプラントではシャンク長25mmのものがあるが、取替えでは32mm程度への増長が可能である。曲率は1Rから2Rへの変更が可能である。その結果、最も高い応力の発生する中段位置のボルトでは首下ピーク弾性応力で約2300MPaから約1100MPaへ応力低減可能となる。

4-3）温度に関する対策

バッフル板と炉心そうの間には温度の比較的低い冷却材が流れているため、ベントホールを設けることが

Table 1 Chemical composition of the baffle former bolts

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Fe
G316cw1	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	10.00 ～14.00	16.00 ～18.00	2.00 ～3.00	－	残
SUS347	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.045	≦0.030	9.00 ～13.00	17.00 ～19.00	－	＞10×C%	残

できれば、バッフル板表面からの熱伝導やガンマ線による発熱を放熱できるため温度を下げることができる。初期型の２ループプラントの中段部のボルトでは約340℃であるが、ベントホールのある標準型の２ループプラントでは約300℃である。IASCC感受性発生までの活性化エネルギーを3.7×10^5J /molとし、アレニウスの式で評価すると、340℃で1×10^{25}n/m^2（E＞0.1MeV）の中性子しきい値が、300℃で1.3×10^{25}n/m^2（E＞0.1MeV）となる。ただし、ベントホールはボルトが取付けられている板に設けるため、炉内構造物全体の取替え時に有効な方法である。

4-4）IASCC発生しきい値に関する対策

バッフルフォーマボルトにはSUS347とG316cwが用いられているが、取替えにはG316cwが用いられる傾向にある。Table 1に標準的なG316cwとSUS347の成分を示す。

中性子照射後の各材料のSSRT試験によるIASCC感受性の確認結果によると、Fig. 3に示すようにSUS347とG316cwではほぼ同じ傾向を示す[1][4]が、ややSUS347のIASCC感受性が高い傾向にある。また、G316cwは粒界炭化物析出等によりIASCC感受性発生に対する中性子照射量のしきい値が上がる[5]可能性が報告されている。

4-5）中性子照射束の分布の考慮

中性子照射束はFig. 4に示すように、バッフル構造の縦方向に約10倍程度の分布の差があり、バッフルフォーマボルトが設置されている場所によってIASCC発生のしきい値に達する時間が異なる。初期型の２ループプラントではIASCC感受性発生までの時間で0.5年から５年程度の違いとなって現れる。この結果を、バッフル構造の機能維持の検討に考慮できる。

5. 対策の効果の検討

5-1）対策の効果の検討の基本条件

ボルト首下形状を改善して発生する応力を低減した場合の、２ループプラントのバッフルフォーマボルト

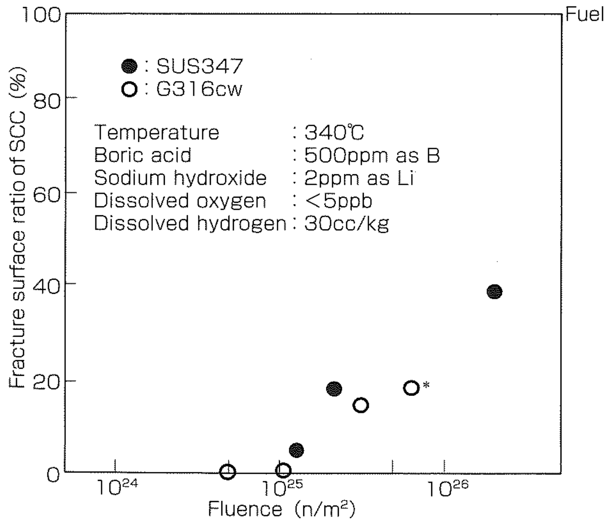

Fig.3 SSRT test data of neutronirradiated material

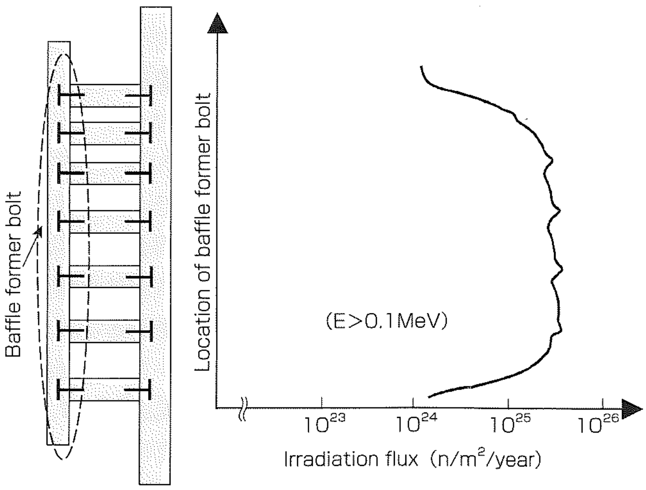

Fig.4 Distribution of irradiation flux

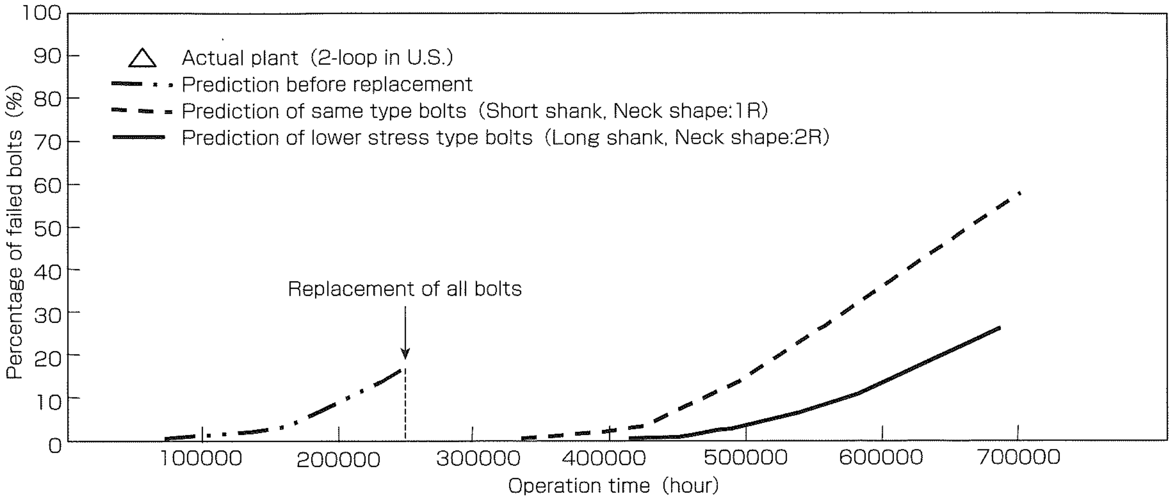

Fig.5 2-Loop estimation curve of failed baffle former bolt

の経年的な損傷割合の予測をFig. 5に示す。予測手法は炉内構造物の点検評価ガイドライン[3]に従っている。当評価手法はIASCCに対する応力、温度、中性子照射量の基本的な実験結果または定性的に推測した関連式を海外プラントの損傷実績で比例乗数により補正したものである。当手法は厳密に損傷原因に則ったものではないが、補正に用いた海外プラントの損傷実績の時点を大きく超えて外挿するものでない場合、実プラントの保全計画に適用することができると考えられる。

なお、ボルト取替えはプラント運転開始後25万時間（約30年）と仮定し、取替え後は、取替え時を起点として、プラント運転開始以降と同じ経年変化が起こるものと仮定して予測を行った。

5-2) バッフル構造の機能維持に対する保全対策の有効性の検討

(1) バッフルフォーマボルト全数の損傷緩和によるバッフル構造の保全の有効性の検討

Fig. 5に示すように、取替え前と同じ構造、材料のバッフルフォーマボルトを採用した場合でも、プラント運転開始後50万時間（約60年）でボルトの損傷割合は20%程度であり、炉内構造物は軸対象に近い構造なので、損傷ボルトは特定の位置に集中せず、周方向に平均的に発生する傾向があると考えられるため、バッフル構造の機能維持に対する問題は発生しないと考えられる。これに対し、発生する応力を改善したバッフルフォーマボルトは取替え前と同じ構造、材料を用いた場合の半分程度の損傷割合との予測結果になり、保全対策として有効である。

(2) バッフル構造の機能維持上重要な位置のバッフルフォーマボルトの保全によるバッフル構造の保全の有効性の検討

上下端部のバッフルフォーマボルトについては、中性子照射がおおよそ$0.2\times10^{25}n/m^2/year$（$E>0.1MeV$, 340℃）であるため、IASCCの感受性は従来と同じ材料でも5年程度はIASCC感受性が発生せず、損傷の可能性が低いことが期待できる。バッフルフォーマボルトが縦方向あたり2本残存すればバッフル構造の機能維持が可能[4]と考えられることから、上下端のバッフルフォーマボルトが損傷しにくいことは保全対策として有効である。すなわち、IASCC感受性のしきい値を改善するとボルト全体の寿命延長が可能なだけでなく、バッフル構造の機能維持に効果的な対策となる。

特に、材料の改善によりIASCC感受性発生のしきい値として約$5\times10^{25}n/m^2$（$E>0.1MeV$, 340℃）を達成できれば、上下端のボルトは取替え後、プラント運転開始後50万時間程度（約60年）までIASCCの感受性がなく、IASCCによるボルトの損傷がないため、保全対策として効果が大きい。

5-3) 個々のボルトの機能維持に対する保全対策の有効性の検討

バッフルフォーマボルトは建設当初、溶接による回り止めで固定されているが、取替え時はバッフル板が高中性子照射されており、溶接時のHeの発生により溶接が困難なので機械的な方法をとる必要がある。このとき、ボルト金属のばね力等を利用してボルトをバッフル板等に押し付けることによる回り止めと、ボルト穴の溝等にボルトの一部を機械的にかしめて回り止めを行う方法が考えられる。

中性子照射下では材料のスウェリングと照射クリープが発生し、発生している応力が低減する。Karl EHRIICHの照射クリープ評価式によると初期状態ではねに発生する応力としてほぼ弾性限界の350Mpaを仮定した場合、中性子照射量の多い場所では20万時間経過後、数Mpaにまで低下することが推定される。これにより、ばねによる押し付け力が低下する可能性があるため、機械的な変形による回り止めの方法が望ましいと考えられる。

5. まとめ

本稿では、IASCCに対して十分と言えない現状の知見範囲での有効な保全対策について検討した。検討の結果、個々のボルトの機能維持に加えてバッフル構造の機能維持に着目した検討が有効であり、具体的な検討結果は以下のとおりとなった。

1) ボルト首下の形状の曲率やシャンク長さの改善による応力の低減(2300MPa→1100MPa)により、取替え後のバッフルフォーマボルトのIASCC損傷発生を従来の1/2程度に低減できるため、バッフル構造の機能維持に有効である。
2) 上下端のバッフルフォーマボルトについては、中性子照射束がその他の取付位置のバッフルフォーマボルトの1/10程度であるため、材料のIASCC感受性発生のしきい値として約5×10^{25}n/m^2(E>0.1MeV, 340℃)を達成できれば、取替え後、プラント運転開始後50万時間程度(約60年)までIASCCの感受性が発生せず、バッフル構造の機能維持のための保全対策としての効果は大きい。
3) 取替えボルトの回り止めは、ばね力やかしめを用いることができるが、スウェリング、照射リラクゼーションの影響でばね力が数百分の1程度に低下する可能性があるため、機械的なかしめを用いることが、取替えボルトの個々のボルトの機能維持に対して有効である。

参考文献

[1] (財)発電設備技術検査協会“プラント長寿命化技術開発に関する事業報告書”、平成8年度報告書、128、131.
[2] 米澤利夫、藤本浩二、金崎宏、岩村俊彦、中田志津雄、安食和英、浦田茂、“中性子照射誘起偏析模擬材によるPWR用オーステナイト系ステンレス鋼の照射誘起粒界応力腐食割れ感受性に関する検討”、材料と環境、49(2000)、437.
[3] (財)火力原子力発電技術協会“PWR炉内構造物点検評価ガイドライン(バッフルフォーマボルト)”、平成12年、28-70.
[4] 米澤利夫、有岡孝司、金崎宏、藤本浩二、安食和英、松岡考典、浦田茂、水田仁、“PWR炉内構造物バッフルフォーマボルト材の粒界割れ機構に対する考察”、日本機械学会誌、42、3(2000)、212-217.
[5] 米澤利夫、岩村俊彦、藤本浩二、安食和英、“耐照射誘起応力腐食割れ感受性の改善を目的とした316冷間加工ステンレス鋼および高Crオーステナイト系ステンレス鋼の化学成分、加工、熱処理条件の最適化”、日本機械学会誌、64、5(2000)、413-422.

(平成16年6月15日)

図の訂正

33ページの　Fig.5-2 Loop estimation curve of failed baffle former bolt　のグラフでプロット点が抜けていましたので以下の様に訂正願います。

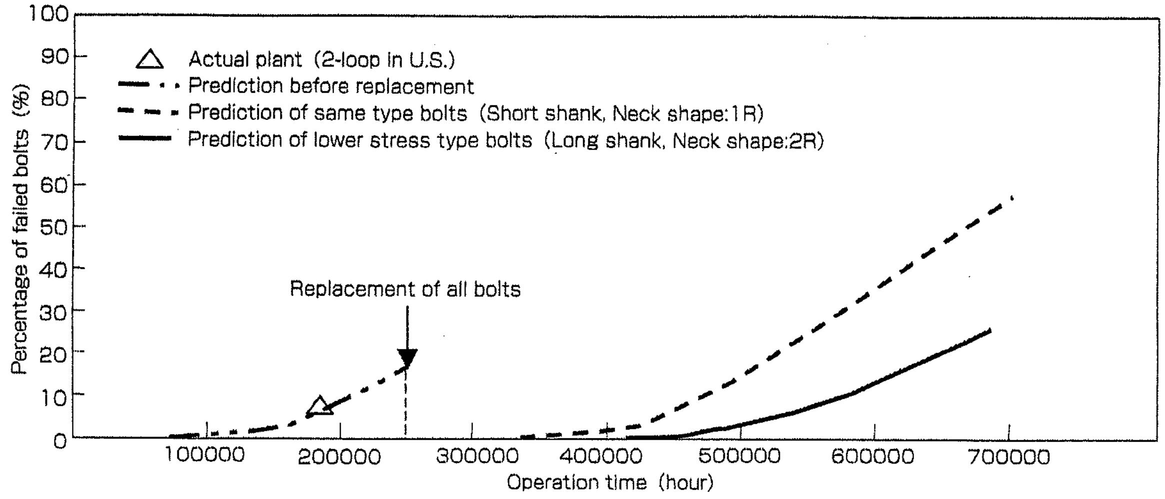

Fig.5 2-Loop estimation curve of failed baffle former bolt