

クリープ変形と照射変形を同時に受ける黒鉛 構造物に発生する残留応力の解析的評価

日本原子力研究所 正 ○石原 正博 日本原子力研究所 塙 悟史
日本原子力研究所 正 伊与久達夫 日本原子力研究所 茂木春義

1. はじめに

高温でかつ中性子照射下で黒鉛材料を構造用材料として使用する場合には、中性子照射下のクリープ変形と同時に中性子照射による寸法収縮挙動（照射による焼き締め起因した「照射変形」）を考慮しなければならない。これらは不可逆的な変形で、長時間の高温中性子照射を受けた構造物には残留ひずみが蓄積される。そこで、内部に多数の冷却孔を有する原子炉用黒鉛構造物を対象に、クリープ変形をMaxwell-Kelvinモデルで、また照射変形を温度及び照射量の関数として扱い、構造物に発生する応力の中性子照射量依存性を解析的に検討した。

2. 解析

2.1 材料モデル

(1) 照射下クリープ変形

黒鉛の照射下クリープ挙動は、Maxwell-Kelvinモデルで表現され⁽¹⁾、定常クリープひずみ(ε^s)および遷移クリープひずみ(ε^T)は、

$$\begin{aligned}\varepsilon^s &= M^s \sigma \Phi \\ \varepsilon^T &= M^T (\sigma - \varepsilon^T E^T) \Phi\end{aligned} \quad \} (1)$$

と表される。なお、 M^s は定常クリープ係数、 σ は応力、 Φ は高速中性子照射量、 M^T は遷移クリープ係数、 E^T は遷移クリープの弾性率である。

(2) 照射変形

黒鉛の照射変形は、照射を受ける温度および照射量に依存する。このため、照射変形を照射量および温度の関数として黒鉛構造設計基準で規定される以下の式を用いた⁽²⁾。

$$\varepsilon_i(\Phi, t) = \left[\sum_{i=1}^5 a_i \cdot \Phi_i \right] \quad (2)$$

ここで、 Φ は高速中性子照射量($\times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 、中性子エネルギー $E > 29 \text{ fJ}$)、 t は温度($^{\circ}\text{C}$)で、 a_i 、 Φ_i は定数である⁽²⁾。

(3) 材料の変形モデル

黒鉛の変形モデルとして、上記により生じるひずみの他に図1に示す機械的ひずみ、熱ひずみを考慮した。なお、解析に用いた物性値は、上記の他のヤング率、熱膨張率、熱伝導率、ポアッソン比で、ポアッソン比以外は温度および照射量依存性⁽²⁾を考慮した。

2.2 解析モデル

解析対象構造物は、図2に示す高温ガス炉（高温工学試験研究炉として現在日本原子力研究所大洗研究所に建設中）用の燃料体黒鉛ブロックで、内部にウラン燃料を装填した燃料棒を有し、燃料棒と黒鉛ブロックの環状流路を冷却材が流れる構造である。なお、原子炉冷却材はヘリウムガスで、原子炉出口温度は最高950 $^{\circ}\text{C}$ である。解析では、黒鉛の諸特性を考慮するよう開発された粘弾性応力解析コード“VIENUS”⁽³⁾を用い、黒鉛ブロックを水平方向2次元でモデル化した。解析には8節点一般化平面ひずみ要素を用い、要素数は632で節点数は2374である。

2.3 解析条件

高温工学試験研究炉の核・熱流動解析結果⁽⁴⁾を入力条件として黒鉛ブロック内温度分布を求め（図3）、これを用いて応力解析を行った。なお、解析対象黒鉛ブロックの高速中性子束は、 $1.69 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ($E > 29 \text{ fJ}$)である。

3. 結果および考察

3.1 運転初期熱応力

黒鉛の破壊が最大主応力説で規定されている⁽²⁾ことから、応力解析結果は主応力値で評価した。運転開始時の最大熱応力（最大引張応力）は、構造物が低温領域となる図3のA点で生じている。一方、最小熱応力（最大圧縮応力）は、逆に構造物が高温側となる図3のB点で生じている。これらの箇所は、一般的に考えられる高温側で圧縮応力、低温側で引張応力と一致するものである。なお、最大あるいは最小熱応力の発生位置が温度の最も低い箇所あるいは高い箇所と異なるのは、冷却孔の回りの構造不連続部に生じる応力集中が影響しているものと考えられる。

3.2 運転時応力の中性子照射量依存性

運転時応力の最大値および最小値は初期熱応力と同様に図3の点A、Bで生じた。A、B点の運転時応力の中性子照射量依存性を図4に示す。運転初期に生じた引張および圧縮の熱応力は、中性子照射を受けるとともに減少し、発生応力が次第にゼロに漸近している。これは、クリープ変形および照射変形に起因した応力緩和によるものと考えられる。すなわち、クリープ変形により引張応力の領域は

伸び、圧縮応力の領域は収縮することから応力が緩和される。さらに、照射変形による寸法収縮量が低温部<高温部であることから⁽²⁾ 相対的に高温部（圧縮応力領域）の方が収縮するため、照射変形はクリープ変形と同様の応力緩和となる。

また、照射変形による寸法収縮量は、ほぼ照射量に比例する⁽²⁾ ことから、図4に示す非線形を有した応力緩和挙動はクリープ変形の寄与が支配的であることがわかる。

3.3 原子炉停止時応力の中性子照射量依存性

一方、原子炉停止時に黒鉛構造物が低温状態となり熱変位が開放されると、クリープ変形および照射変形により蓄積された残留ひずみに起因した残留応力が黒鉛構造物に発生する。残留応力の最大値および最小値の発生位置は、上で述べた運転時応力の最小値および最大値の発生位置で生じている。すなわち、図3のA点には最小の残留応力（最大圧縮応力）が、B点には最大の残留応力（最大引張応力）が発生している。これは、運転時応力の高い箇所は応力緩和されて生じる残留ひずみの量も大きく、また発生応力を和らげるよう残留ひずみが生じるため上記の運転時応力と停止時応力の挙動となる。（運転時応力が引張応力の場合には引張の残留ひずみが蓄積され、原子炉停止時はこの引張残留ひずみの蓄積したところは圧縮の残留応力が発生する。運転時応力が圧縮応力の場合はこの逆である。）

さらに、発生する残留応力は、中性子照射量の増大とともに増加している。これは、クリープ変形および照射変形により構造物内に蓄積される残留ひずみが照射とともに増大するためであることが容易に理解される。

4. まとめ

中性子照射下で黒鉛構造物を使用する場合、照射下でのクリープ変形と照射変形に起因して、原子炉運転時の応力緩和型の応力発生形態と、原子炉停止時の残留ひずみの蓄積に起因した応力発生形態の2つのモードがあることを解析的検討により示した。また、これらの応力発生モードは相互に関連し、応力緩和型の最大引張応力および最大圧縮応力の発生している箇所では、残留応力がそれぞれ最大圧縮応力および最大引張応力となることを示した。

参考文献

- 1.R.J.Price,Gulf-GA-12615(1973).
- 2.石原他、JAERI-M 91-153(1991).
- 3.T.Iyoku et al.,Nucl.Sci. and Tech.,10,28 (1991).
- 4.日本原子力研究所、非公開資料(1997).

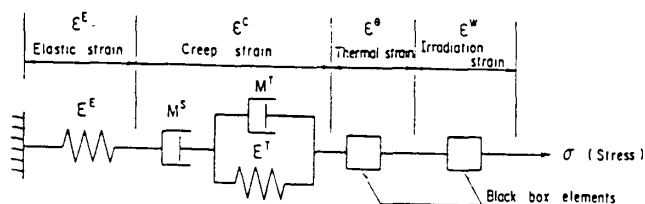


Fig.1 Rheology model of graphite.

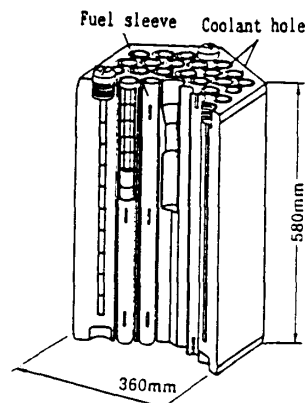


Fig.2 Structure of fuel graphite block.

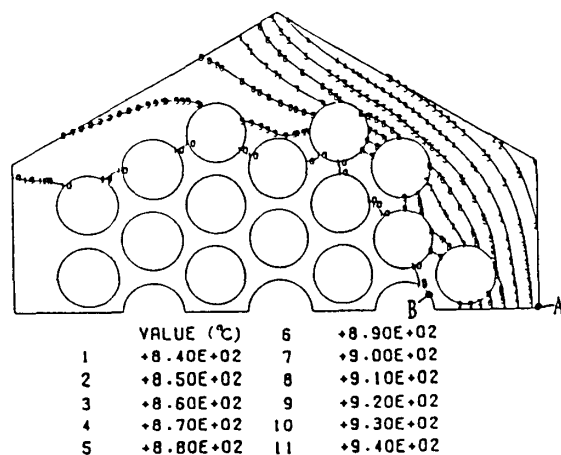


Fig.3 Temperature distribution in graphite block.

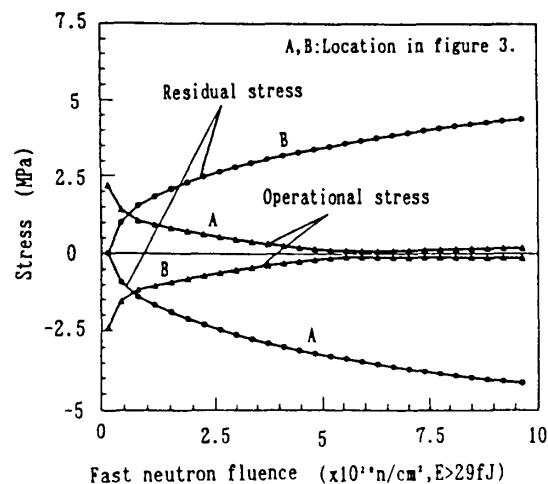


Fig.4 Stress change as a function of neutron fluence.