

総合講演・報告 2「高温ガス炉の安全性について
(「プリズマティック型高温ガス炉の安全設計プロセス」研究専門委員会中間報告)」

(4) 高温ガス炉黒鉛の安全性

(4) Safety of graphite components in HTGR

東洋炭素株式会社 國本英治

1. はじめに

高温ガス炉 (HTGR) は、安全性に優れ、第 4 世代原子力システムの有力な候補の一つとして注目されており、世界的に研究開発が進められている。我が国においては、(国研)日本原子力研究開発機構 (JAEA) において、1998 年に初臨界を達成した高温工学試験研究炉 (HTTR) を中心に研究開発が進められている。

黒鉛材料は、高速の中性子を減速する減速材及び中性子を反射する反射材としての特性を備えており、耐放射線性・耐熱性・耐食性を有することから、高温ガス炉等の炉心用構造材として用いられている。HTTR の炉内構造物として採用されている IG-110 黒鉛は、世界で稼働中 (HTR-10 (中国))、および建設中の HTR-PM (中国) にも採用されている。本セッションでは、その高温ガス炉用 IG-110 黒鉛の化学的・機械的特性、照射挙動を示し、安全性及び健全性について紹介する。

2. 黒鉛について 1)

黒鉛は、他の工業材料にない導電性、耐熱性、伝熱性、潤滑性、耐薬品性などの優れた特徴がある。また、原料及び製造方法の組合せにより、多種多様な特性を設計できる材料である。さらに軽量で加工性が良いことから、冶金、化学、電気、航空宇宙や原子力など多くの産業分野で使用されている。しかしながら一般生活において黒鉛の存在を目にする機会は少なく、いわゆる「工業界の黒子」として活躍している。

2.1 黒鉛の化学的・機械的特性

黒鉛は完全還元雰囲気では、2500～3000℃でも物理的・化学的に安定した物質であり、高温構造材として使用されている。また、黒鉛の化学的特徴として、高温での酸化反応が挙げられる。約 3000℃で黒鉛化された黒鉛は揮発成分が無いいため難燃性であるが、IG-110 黒鉛は、ハロゲンガス中、約 2000℃に加熱し、酸化触媒となる金属不純物を低沸点のハロゲン化合物にして揮発させ除去した高純度材料であるため、炭素原子の酸化反応が極めて遅く、さらに難燃性の材料である。さらに、IG-110 黒鉛は緻密で内部気孔が少なく、反応表面積が小さいため、反応ガスが黒鉛内部まで拡散しにくく、耐酸化性を向上させている。

黒鉛の特筆すべき特徴として、強度が 2500℃まで温度と共に増大し、さらに常温強度の約 2 倍にも達することが挙げられる。この特異な性質により高温の用途には必要不可欠な材料となっている。また、微粒等方性黒鉛は、粗粒黒鉛と比較して、高強度でばらつきが小さい特徴を有している。

2.2 黒鉛の照射挙動

黒鉛は高速中性子の照射により、結晶中の炭素原子の層に垂直な c 軸方向では伸び、層平面の a 軸方向では収縮する挙動を示す。これは、中性子にはじき出された炭素原子が層間に入りクラスターを形成するためである。さらに照射が進むとクラスターは、成長し格子間型の転位ループとなり、新たな一層を形成し、c 軸方向に伸びが生じる。この結果、炭素原子が抜けた空孔の応力緩和により a 軸方向は収縮する。このように大きなループは、格子中に新たな結晶平面ができていることを意味しており、巨視的な寸法変化を引き起こす要因となる。その他にも、黒鉛は照射によって熱伝導、ヤング率、強度、熱膨張係数等が変化し、照射によるクリープも引き起こされる。

3. 高温ガス炉黒鉛構造物に関する安全要件について

日本原子力学会「高温ガス炉の安全設計方針」研究専門委員会（平成 25 年 5 月～平成 27 年 2 月）において策定された「実用高温ガス炉の安全要件」のうち、高温ガス炉黒鉛構造物に対する安全機能と安全上の機能要求の達成に必要な、「構造物として求められる特性」と「材料として求められる特性」を以下に示す。

3.1 構造物として求められる特性

構造物としての設計における基本的な考え方は次のとおりである。

黒鉛構造物は、すべての原子炉システム状態で生じ得るすべての劣化プロセスとの組み合わせにおいて、その構造上の健全性を維持するとともに炉心の構造材として必要な性能を有し、また、原子炉の炉心内で予想される放射線レベルとその他の条件に十分に耐えるように設計されなければならない。

黒鉛構造物に構造物として求められる特性は、次のとおりである。

- ① 黒鉛構造物から構成される炉心は、発熱密度に比して大きな熱容量を有すること
- ② 黒鉛構造物から構成される炉心は、炉心からの除熱に関する性能要求を満足できる伝熱特性を有すること
設計において考慮すべき伝熱特性に関する劣化プロセスは、次のとおりである。

✓ 照射及び温度変化による変形及び物性値の変化

- ③ 構造上の健全性を維持できること

構造上の健全性維持については、設計限度として黒鉛構造物の応力制限を規定するとともに、発生する応力評価を行い、これが応力制限を満足するように設計する。設計においては、次の荷重を考慮する。(1) 自重、(2) 他の構造物の重量、(3) 地震荷重、(4) 熱荷重、(5) 流体振動、(6) 関連構造物との摩擦相互作用、(7) 照射ひずみ（炉心黒鉛構造物）、(8) 炉心差圧（炉心支持黒鉛構造物）また、発生応力の評価に当たっては、照射効果、酸化効果を考慮する。これらより、設計において考慮すべき強度に関する劣化プロセスは、次のとおりである。

- ✓ 流体励起振動などを含む静的及び動的な荷重
- ✓ 照射又は化学的影響に起因する変形及び物性値の変化

また、黒鉛構造物は、取り扱いに伴う荷重及び応力に耐えるものでなければならない。

3.2 材料として求められる特性

黒鉛構造物として使用する黒鉛に求められる材料特性及びこれに関する指標をまとめると、以下となる。

- ① 高熱伝導特性 : 熱伝導率(炉床部断熱層は除く)
- ② 高強度特性 : 曲げ強さ、引張強さ、圧縮強さ
- ③ 耐酸化性特性 : 灰分量
- ④ 低放射化特性 : 放射化性不純物

上記の特性項目について、未照射時及び原子炉の炉心内で予想される放射線レベルとその他の条件下において、十分な特性を有することが必要であり、これを満足するのが等方性黒鉛または準等方性黒鉛である。

なお、原子力の黒鉛構造物に使用される黒鉛には、核的特性（低ホウ素当量）が要求されるが、安全上の機能を果たすための要件ではないため、ここでは考慮しない。

また、商業用高温ガス炉の黒鉛構造物として採用するためには、上記の「材料と求められる特性」を満たし、なおかつ以下 4 点を満たすことが重要である。

1. 優れた耐中性子照射特性を持ち、設計上有効な熱的、機械的な照射データを有すること。

2. 構造上の安全性の観点から、高強度でばらつきの少ない材料であること。
3. 等方的性質を有し、大型サイズが製造出来ること。
4. コストパフォーマンスに優れて、長期間安定した供給が可能であること。

我が国では、1977 年から HTTR の建設に向けた各種材料の R&D が開始された。IG-110 黒鉛は、高耐熱性、十分な強度、高い品質安定性を有していることが立証され、中性子損傷に関する数多くのデータも有していることから、現在稼働中の高温ガス炉（HTTR,HTR-10）に採用されている。

3.3 高温ガス炉黒鉛構造物の規格案

将来の実用高温ガス炉の黒鉛構造物の規格化に必要な内容を検討するため、2008 年に「高温ガス炉黒鉛構造物規格化のための調査検討」特別専門委員会が日本原子力学会に設立された。委員会においては、実用高温ガス炉の黒鉛構造物の規格化のため、HTTR の黒鉛構造物設計方針を見直し、IG-110 黒鉛の設計用照射データを示すと共に、照射データの内外挿による評価手法を検討した。また、米国機械学会(ASME)で検討されていた高温ガス炉黒鉛構造物の規格の調査、相互の整合性の検討がなされた。委員会の活動の結果、2009 年に ASME に先駆けて世界的に受け入れられる「高温ガス炉黒鉛構造物規格原案」がまとめられた。

3.4 IG-110 黒鉛の健全性・安全性

通常、黒鉛製造では、厳しい品質保証体制のもと、種々の検査項目を設定することにより、健全性を確保している。中でも、IG-110 黒鉛は、原子力用黒鉛として数十年にわたり安定した品質を維持し、長期間安定した供給が可能な材料である。

IG-110 黒鉛は高強度で、ばらつきが小さいため、高温ガス炉黒鉛構造物の設計上、十分な安全上の裕度が確保できる。等方性黒鉛の製法及び検査項目については、既に多くの解説があるので詳しくはそれらを参照されたい¹⁾²⁾。

4. まとめ

- ・高温ガス炉黒鉛構造物が構造上の健全性を維持するためには、高熱伝導特性、高強度特性、耐酸化特性、低放射化特性に優れた黒鉛であることが求められる。
- ・高温ガス炉黒鉛構造物の設計においては、十分な安全上の裕度が必要である。この要求には高強度でばらつきが小さく、安定的に供給され、さらに豊富な照射データを持つ黒鉛を使用することが重要である。
- ・微粒等方性である IG-110 黒鉛は、原子力用黒鉛として HTTR（日本）、HTR-10（中国）に使用された実績を持ち、建設中の HTR-PM（中国）にも採用されている。
- ・実機の HTGR から取得される様々な IG-110 黒鉛のデータは、将来建設されるであろうカザフスタン、中国、米国等の HTGR に活かす事が期待される。

参考文献

- 1) 東條純, 等方性黒鉛の製法と主な用途, TANSO, No.234, pp.234-243(2008)
- 2) 東洋炭素(株)ホームページ, <http://www.toyotanso.co.jp/>