JAEA-Research
2009-008

JAEA-Research

高温ガス炉黒鉛構造物の設計用照射データの内外挿法による拡張

ーIG-110黒鉛構造物の設計用照射データの評価ー

Expansion of Irradiation Data by Interpolation and Extrapolation for Design of Graphite Components in High Temperature Gas-cooled Reactor
- Evaluation on IG-110 Graphite Irradiation Data for Component Design -

國本 英治　柴田 大受　島崎 洋祐　衛藤 基邦
塩沢 周策　沢 和弘　丸山 忠司　奥 達雄

Eiji KUNIMOTO, Taiju SHIBATA, Yosuke SHIMAZAKI, Motokuni ETO
Shusaku SHIOZAWA, Kazuhiro SAWA, Tadashi MARUYAMA and Tatsuo OKU

原子力基礎工学研究部門
核熱応用工学ユニット

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate

June 2009

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

高温ガス炉黒鉛構造物の設計用照射データの内外挿法による拡張
― IG-110 黒鉛構造物の設計用照射データの評価 ―

日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門核熱応用工学ユニット
國本　英治※1・柴田　大受・島崎　洋祐+1・衛藤　基邦*1・塩沢　周策※2・沢　和弘
丸山　忠司*2・奥　達雄*3

(2009 年 3 月 27 日受理)

第 4 世代原子力システムの有力な候補の一つとして、超高温ガス炉（VHTR）が世界的に注目され研究開発が進められている。我が国では、日本原子力研究開発機構の試験研究炉である高温工学試験研究炉（HTTR）が運転中であり、高温ガス炉の実用化に向けた研究開発が進められている。高温ガス炉の炉内には黒鉛構造物が使用されるが、実用炉における使用条件は HTTR に比べてはるかに厳しいため、十分な照射データベースが整備されていない場合には照射データの拡充が必要である。一方、既存の照射データを活用し、合理的な内外挿方法を用いれば必要なデータベースを確保することができる。

本報告書は HTTR で実績があり、VHTR 用の主要銘柄である IG-110 黒鉛を対象に、寸法、熱伝導率、縦弾性係数、強度、熱膨張係数の照射効果と定常照射クリープ係数について、合理的な内外挿方法を示したものである。内外挿にあたっては、他銘柄の黒鉛の照射データを活用し、汎用的な方法を導出した。その結果、世界に先駆けて IG-110 黒鉛の照射特性を VHTR の使用条件まで拡張することができ、設計に必要な図表を得ることができた。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
※ 1 技術開発協力員、＊1 東洋炭素㈱、＊2 東京工業大学、＊3 茨城大学名誉教授、
＋1 大洗研究開発センター高温工学試験研究炉部、※2 特別研究員

JAEA-Research 2009-008

Expansion of Irradiation Data by Interpolation and Extrapolation for Design of Graphite Components in High Temperature Gas-cooled Reactor －Evaluation on IG-110 Graphite Irradiation Data for Component Design－

Eiji KUNIMOTO※1, Taiju SHIBATA, Yosuke SHIMAZAKI+1, Motokuni ETO＊1, Shusaku SHIOZAWA※2, Kazuhiro SAWA, Tadashi MARUYAMA＊2 and Tatsuo OKU＊3

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March27, 2009)

The Very High Temperature Reactor (VHTR), one of the generation Ⅳ reactor systems, is being focused and developed internationally. In Japan, the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) of the Japan Atomic Energy Agency is in operation, and research and development for the development of commercial High Temperature Gas-Cooled Reactors (HTGRs) are carried out. Nuclear graphites are used for core components of the HTGRs and expansion of irradiation data is necessary when enough irradiation data are not established, because the graphite components in the HTGRs are used at severer condition than that in the HTTR. The necessary database can be established by expansion of existing irradiation data with appropriate interpolation and extrapolation methods.

This paper shows the reasonable interpolation and extrapolation method, on dimensional change, thermal conductivity, Young's modulus, strength, irradiation creep strain and coefficient of thermal expansion for IG-110 graphite which is used for the HTTR and a major candidate for the VHTR.The interpolation and extrapolation method was developed so as to be general by using the irradiation data of the other graphites. As a result, irradiation properties of the IG-110 graphite were successfully expanded to the VHTR condition for the first time and the irradiation properties being necessary for the design could be developed.

Keywords: HTGRs, VHTR, IG-110 Graphite, Dimension, Thermal Conductivity, Young's Modulus, Strength, Irradiation Creep, Coefficient of Thermal Expansion

※1 Collaborating Engineer、＊1 Toyo Tanso Co.Ltd.、＊2 Tokyo Institute of Technology 、
＊3 Professor emeritus at Ibaraki University、
＋1 Department of HTTR,Oarai Research and Development Center、※2 Scientific Consultant

目次

1．はじめに **1**
2．寸法 **1**
2.1 照射に伴う寸法変化 1
2.2 IG-110 黒鉛の寸法変化率に及ぼす照射効果の内外挿法による評価 3
3．熱伝導率 **5**
3.1 照射に伴う熱伝導率変化 5
3.2 IG-110 黒鉛の熱伝導率に及ぼす照射効果の内外挿法による評価 5
4．縦弾性係数 **6**
4.1 黒鉛の照射による縦弾性係数変化 6
4.2 IG-110 黒鉛の縦弾性係数変化に及ぼす照射効果の内外挿法による評価 6
5．強度 **7**
5.1 照射に伴う強度変化 7
5.2 IG-110 黒鉛の強度に及ぼす照射効果の内外挿法による評価 8
6．照射クリープ **9**
6.1 照射クリープひずみ 9
6.2 IG-110 黒鉛の定常照射クリープ係数の内外挿法による評価 9
7．熱膨張係数 **11**
7.1 照射に伴う熱膨張係数の変化 11
7.2 IG-110 黒鉛の熱膨張係数に及ぼす照射効果の内外挿法による評価 11
8．まとめ **12**
謝辞 **12**
参考文献 **13**

Contents

1. Introduction ····· 1
2. Dimension ····· 1
2.1 Dimensional changes caused by neutron irradiation ····· 1
2.2 Evaluation of dimensional change of irradiated IG-110 graphite by interpolation and extrapolation ····· 3
3. Thermal conductivity ····· 5
3.1 Changes in thermal conductivity caused by neutron irradiation ····· 5
3.2 Evaluation of the irradiation effect on thermal conductivity of IG-110 graphite by interpolation and extrapolation ····· 5
4. Young's modulus ····· 6
4.1 Changes in Young's modulus caused by neutron irradiation ····· 6
4.2 Evaluation of the irradiation effect on Young's modulus of IG-110 graphite by interpolation and extrapolation ····· 6
5. Strength ····· 7
5.1 Strength change caused by neutron irradiation ····· 7
5.2 Evaluation of the irradiation effect on strength of IG-110 graphite by interpolation and extrapolation ····· 8
6. Irradiation creep ····· 9
6.1 Irradiation creep of graphite ····· 9
6.2 Evaluation of the irradiation creep coefficient of IG-110 graphite by interpolation and extrapolation ····· 9
7. Coefficient of thermal expansion ····· 11
7.1 Changes in CTE caused by neutron irradiation ····· 11
7.2 Evaluation of the irradiation effect on CTE of IG-110 graphite by interpolation and extrapolation ····· 11
8. summary ····· 12
Acknowledgements ····· 12
References ····· 13

1．はじめに

第 4 世代原子力システムの有力な候補の一つとして、超高温ガス炉（VHTR）が世界的に注目され研究開発が進められている。我が国では、日本原子力研究開発機構の試験研究炉である高温工学試験研究炉（HTTR）が運転中であり、高温ガス炉(HTGR)の実用化に向けた研究開発が進められている。

HTGR の炉内構造物には黒鉛が使用されるが、黒鉛の材料特性は銘柄に依存し、熱・機械的特性、酸化ならびに照射挙動などは銘柄によって大きく異なる。また、その特性値のばらつきは金属材料と比較してはるかに大きいなど、構造設計のためには金属材料とは異なる独自の規格・基準が必要である。HTTR 黒鉛構造物の設計にあたっては、日本原子力研究所（現、日本原子力研究開発機構）で独自に定めた黒鉛構造設計方針等が適用された。これらには有意な高速中性子照射下で用いられる IG-110 黒鉛について寸法、熱伝導率、縦弾性係数、強度、熱膨張係数の照射効果曲線と定常照射クリープ係数についてのデータが含まれている。しかし、HTTR の使用条件を超えた照射下で使用される実用 HTGR に適用するためには、この黒鉛構造設計方針を基に、実用炉に適用出来る新たな規格を策定する必要がある。そのためには照射データの拡充が必要であるが、十分なデータベースが整備されていない場合には、既存照射データを合理的な内外挿法によって評価し、設計曲線を提示する必要がある。

本研究では HTTR 用に用いられており、かつ VHTR 用の主要銘柄である IG-110 黒鉛について、設計に用いることのできる、寸法、熱伝導率、縦弾性係数、強度、熱膨張係数等の特性に関する照射データと定常照射クリープ係数に対して適切な内外挿法を検討し、世界に先駆けて照射効果曲線を導出した。

照射データの内外挿にあたっては、以下を基本方針とした。

(1) 対象銘柄について照射温度が 2 種以上のデータから内外挿を行う。
(2) 対象銘柄に十分な照射データがない場合、他銘柄のデータより照射温度、照射量等に依存する特性変化の傾向を評価検討し、対象銘柄に適用して内外挿を行う。

2．寸法

2.1 照射に伴う寸法変化

(1) 黒鉛に対する中性子照射の影響

黒鉛の結晶構造は炭素原子が六角形に配列した層からなり、単位格子中には 4 個の原子が含まれる六方晶系の結晶である。各層内における基底面の炭素の結合は共有結合であるのに対し、各層の結合は極めて弱いファン・デル・ワールス力である。層構造であることから単結晶の性質は、非常に異方性が高くなる。

黒鉛の単結晶に対しては、高速中性子の照射により、中性子により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[(1)]ため、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。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。

黒鉛結晶子は照射により c 軸方向に膨張し a 軸方向に収縮するが、黒鉛バルク体の組織に内在する微細な気孔は黒鉛結晶子の c 軸方向の膨張を吸収する。一方 a 軸方向の収縮は残るため、高温では全体として照射による体積収縮が生じる。さらに照射が進むと気孔による c 軸方向の膨張の吸収は限界に達し、結晶子自身のスエリング成長のため粒界でのき裂発生等により新たな気孔が生成し、急速な体積膨張が生じる [(1)]。

以上のように、黒鉛バルク体の寸法変化は照射によって収縮し、ターンアラウンド（TA）と呼ばれる極小値を迎えた後、膨張に転じる挙動を示す。

(2) 黒鉛の照射による寸法変化モデルの検討

黒鉛の照射挙動は、一般的に取得した実験データに基づき、照射量に対する多次元の式でフィッティングカーブがされている[(2)]。一方、黒鉛の照射による寸法変化については以下のような説明がされている[(3)]。

黒鉛バルク体の単位照射量あたりの x 方向の寸法変化率（$dG_x/d\gamma$）は(2.1)式で表される。

$$\frac{dG_x}{d\gamma} = A_x \frac{1}{X_c}\frac{dX_c}{d\gamma} + (1-A_x)\frac{1}{X_a}\frac{dX_a}{d\gamma} + f_x \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.1)$$

ここで

$dG_x/d\gamma$：黒鉛バルク体の単位照射量あたりの x 方向の寸法変化率（ $1/(n/m^2)$ ）

x　：任意の方向

γ　：中性子照射量（n/m^2）

A_x　：x方向へ黒鉛結晶がc軸に揃った配向割合（定数）(－)

dX_c　：c軸方向の寸法変化率（－）

dX_a　：a軸方向の寸法変化率（－）

f_x　：単位照射量あたり寸法変化に寄与する気孔量の変化率（$1/(n/m^2)$）

$G_x(\gamma)$：黒鉛バルク体の照射による X 方向の寸法変化率（－）

$G_x(\gamma)$ は、以下に示すように(2.1)式を積分して得られる。

$$G_x(\gamma) = A_x \int \frac{1}{X_c}\frac{dX_c}{d\gamma} d\gamma + (1-A_x)\int \frac{1}{X_a}\frac{dX_a}{d\gamma} d\gamma + \int f_x d\gamma$$

$$= A_x G_c(\gamma) + (1-A_x) G_a(\gamma) + F_x(\gamma) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.2)$$

ここで、

$F_x(\gamma)$：生成した気孔の寄与による寸法変化率（－）

$G_a(\gamma)$：黒鉛結晶の照射による a 軸方向の寸法変化率（－）

$G_c(\gamma)$：黒鉛結晶の照射による c 軸方向の寸法変化率（－）

ここで Gc(γ)、Ga(γ)を求めるため、HOPG（高配向性熱分解黒鉛）の照射による寸法変化[(4)]（**図 2.1**）を見ると、Gc(γ)及び Ga(γ)は照射量に対してほぼ直線的に膨張あるいは収縮すると考えられるため、**図 2.2** に示すように Gc(γ)、Ga(γ)は照射量に対して一次式で近似できる。

Fx(γ)については実験データ（**図 2.3**[(5)]）より (2.3)式のように二次式で近似できると考えられる。

$$F_x(\gamma) = k_1\gamma^2 + k_2\gamma \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3)$$

$F_x(\gamma)$を（2.3）式で示した照射量γの二次式で表すことについては以下のメカニズムと考えた。

(2.4)式のように気孔と寸法変化率の関係$F_x(\gamma)$は照射量γにおける寸法変化に寄与する気孔量($P_x(\gamma)$)と比例の関係にあると仮定した場合、照射によって生成する気孔量（$P_{xi}(\gamma)$）と、もともと内在している気孔量（$P_{x0}(\gamma)$）については(2.5)式が成り立つと考えられる。照射に伴う寸法変化と気孔変化のモデルを**図2.4**に示す。

$$F_x(\gamma) = lP_x(\gamma) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.4)$$

$$P_x(\gamma) = P_{xi}(\gamma) + P_{x0}(\gamma) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.5)$$

ここで

$P_x(\gamma)$　：照射量γにおける寸法変化に寄与する気孔量(vol%)
$P_{xi}(\gamma)$　：照射によって生成する気孔量(vol%)
$P_{x0}(\gamma)$　：もともと黒鉛に存在している気孔量(vol%)
l　：定数（1/vol%)

寸法が伸びに転ずる TA 点までは黒鉛に元々内在している気孔やマイクロクラックに c 軸方向の膨張が吸収されるため、(2.6)式の $P_{x0}(\gamma)$は線形的に減少する。また、(2.7)式の $P_{xi}(\gamma)$は照射に伴う気孔の変化等により二次式的に変化すると考えらる。

$$P_{x0}(\gamma) = k_0\gamma \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.6)$$

$$P_{xi}(\gamma) = m_1\gamma^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.7)$$

従って、（2.4）式により $F_x(\gamma)$は $P_x(\gamma)$と同様に二次式で近似できるため、（2.3）式は妥当と考えられる。従って（2.2）式において、$G_c(\gamma)$、$G_a(\gamma)$は一次式、$F_x(\gamma)$は二次式で表されるため、$G_x(\gamma)$は照射量γの二次式で表すことが出来る。

(3)　寸法変化率の照射データ

照射データの内外挿を行う際に用いた黒鉛の未照射状態の物理特性値を**表 2.1**[(6)(7)(8)(9)(10)]に示す。また、IG-110 黒鉛[(11)(12)(13)]、H-451 黒鉛[(14)(15)(16)]、ATR-2E 黒鉛[(9)]の照射による寸法変化率を**図 2.5～2.8** に示す。図中の曲線は(2.3)式で得られたように照射量の二次式で描いたものである。これらの曲線より、各々の条件について黒鉛の照射による寸法変化のターンアラウンド点を求めた。これらのターンアラウンド点で規格化した寸法変化率を**図 2.9** に示す。**図 2.9** より黒鉛の照射による寸法変化率は二次曲線的な変化を示し、黒鉛の収縮・膨張の挙動は照射温度、材質、黒鉛の配向性に関係なく、前述のモデルで示したように一定の範囲で二次式によって近似できることが確認された。

2.2　IG-110 黒鉛の寸法変化率に及ぼす照射効果の内外挿法による評価

IG-110 黒鉛について照射による寸法変化率は600℃での重照射データしかないため400,800℃等の照射効果曲線を得るため、内外挿により照射データの拡張を行った。具体的な手法を以下

に示す。

図 2.9 より、照射量の二次式で整理出来ることから、二次式によって内外挿を行った。ここで照射による p_T、及び q_T を用いて Gx(γ)を以下の式で表すこととする。

$$G_x(\gamma) = h_T(\gamma - p_T)^2 + q_T \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.8)$$

ここで、

Gx(γ)　：照射による寸法変化率
p_T　：TA点の照射量
q_T　：TA点の寸法変化率
h_T　：二次の項の係数
γ　：高速中性子照射量（$\times 10^{26}$n/m^2,E＞0.1MeV）
T　：照射温度（℃）

照射データが比較的揃っている他銘柄の各照射温度について得られた二次曲線の TA 点の照射量（p_T）、寸法変化率（q_T)ならびに二次の項の係数（h_T）について温度依存性を求め**図 2.10**、**図 2.11**、**図 2.12** に示す。図より p_T、q_T の温度依存性は T に対して一次式で表し、h_T の温度依存性は T に対して e^T の指数関数で表すこととした。

さらに、それらを 600℃における p_T、q_T、h_T の値で規格化して各温度について変化率 α_{pT},α_{qt}, 及び α_{ht} を求め、**図 2.13**、**図 2.14**、**図 2.15** に示す。

高照射量領域までデータのある IG-110 黒鉛の 600℃の寸法変化データ（**図 2.8**）の二次曲線の p_T、q_T、h_T の値に他銘柄から算出した変化率を乗じて IG-110 黒鉛の各照射温度における寸法変化率（Gx(γ)）を導出した。なお、変化率は perpendicular 方向の変化率と parallel 方向変化率の異方性を考慮しているが IG-110 黒鉛は等方性のため配向性を平均化した変化率値を用いた。計算結果を**表 2.2** に示す。

さらに(2.8)式を原点を通る二次式として、以下の（2.9）式によって内外挿を行った。

$$G_{x2}(\gamma) = a_1\gamma^2 + a_2\gamma \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.9)$$

ここで、

Gx_2(γ)　：照射による寸法変化率
a_1,a_2　：係数

式（2.9）で得られた照射効果曲線を**図 2.16** に、また外挿式の係数を**表 2.3** に示す。**図 2.16** が求めるべき IG-110 黒鉛の寸法の照射効果曲線である。

この手法の妥当性について H-451 黒鉛のデータを用いて検証した。その結果を**図 2.17** に示す。照射温度 900℃の時の寸法変化率の実測値より求めた照射曲線と外挿曲線はよく一致しており、本外挿方法は妥当であると考えられる。

なお、照射寸法変化の TA 照射量を越えて黒鉛構造物を使用する場合には、設計上十分な保守性を持たせることが望ましい。

3．熱伝導率

3.1 照射に伴う熱伝導率変化

黒鉛結晶の基底面に垂直方向の熱伝導度は小さいため、熱はほとんど基底面に沿ってフォノンによって運ばれる。照射による黒鉛の熱伝導率が比較的照射初期に大きく低下するのは、照射によって導入される比較的小さな欠陥（格子間原子や空孔またはそれらのクラスター）がフォノンを散乱し、平均自由行程を小さくするためである。高温になるに従って、これらの欠陥は再結合し、消滅するか、またはより大きなサイズの欠陥や転移ループなどに成長し散乱効果は減少する。照射が進んでも、寸法変化ほど大きく変化しないのは c 軸方向の膨張を吸収する層面にほぼ平行な気孔が閉じても層面に沿って伝播するフォノン伝導機構に大きな影響を与えないためであると考えられる[1]。

IG-110 黒鉛[11)~13)]、H-451 黒鉛[14)~16)]、ATR-2E 黒鉛[9)]、準等方性黒鉛[8)]の照射による熱伝導率の変化率を**図 3.1～図 3.4** に示す。これらのデータの中から照射温度 600℃の時の熱伝導率の変化を抽出し、**図 3.5** に示す。図より照射による熱伝導率の変化は黒鉛の銘柄によらず傾向は類似していることが確認された。

3.2 IG-110 黒鉛の熱伝導率に及ぼす照射効果の内外挿法による評価

IG-110 黒鉛について照射による熱伝導率変化率は 600℃での重照射データしかないため、内外挿により照射データの拡張を行った。具体的な手法を以下に示す。

本検討では熱伝導率変化はターンアラウンド（TA）点照射量までは Price の熱伝導率計算モデル式（(3.1)式）で表し[13)]、TA 後はほぼ一定の割合で低下するため、(3.2)式で示す一次の経験式により照射効果曲線を表すこととした。

$$\frac{K}{K_0} = \frac{K_S}{K_0} + \left(1 - \frac{K_S}{K_0}\right)\exp(-\gamma T/\tau) \qquad (\gamma \leqq \gamma_{TA}) \cdots\cdots \quad (3.1)$$

$$\frac{K}{K_0} = a_1\gamma + a_2 \qquad (\gamma > \gamma_{TA}) \cdots\cdots \quad (3.2)$$

ここで、

K　：照射量 γ まで照射した後の熱伝導率（W/(m・K)）
K_0　：照射前の熱伝導率（W/(m・K)）
K_S　：飽和後の熱伝導率（W/(m・K)）
T　：照射温度（℃）
τ　：定数（n/(m^2・℃)）
γ_{TA}　：TA 点の高速中性子照射量（$\times 10^{26}$ n/m^2, E＞0.1MeV）
a_1,a_2 ：係数

図 3.1 に示したように、他銘柄の TA 後の熱伝導率変化を一次式で表し、一次式の係数(a_1)の温度依存性を導出する。さらに TA 後まで照射データが揃っている IG-110 黒鉛の 600℃の熱伝導率変化（**図 3.4**)を基準として適用し、各照射温度の内外挿を行った（**図 3.6**）。

式（3.1）と式（3.2）で得られた照射効果曲線を**図 3.6** に、また TA 後の外挿式の係数を**表 3.1** に示す。**図 3.6** が求めるべき IG-110 黒鉛の熱伝導率の照射効果曲線である。

この手法の妥当性について ATR-2E 黒鉛のデータを用いて検証した。その結果を**図 3.7** に示す。照射温度 400℃の時の熱伝導率の変化率の実測値より求めた照射データ直線と外挿直線はよく一致しており、本外挿方法は妥当であると考えられる。

内外挿に用いた準等方性黒鉛の 400℃における重照射領域での熱伝導率は約 5%程度まで低下するため、重照射における外挿直線は 5%までの低下として差し支えないと考えられる。また、黒鉛の照射後熱伝導率は一定量の照射量を超えると銘柄によらず一定であるという実験結果もあるため、今後照射試験によりデータを取得し、この点の評価をすることが望ましい。

なお、黒鉛が使用温度以上にさらされた場合、アニール効果により熱伝導率が回復することが報告されている[17]。そのため、これを定量化して事故時における安全設計に用いることは差し支えない。その場合、十分照射データを揃えることが望ましい。

4．縦弾性係数

4.1 黒鉛の照射による縦弾性係数変化

黒鉛の照射による縦弾性係数変化は照射初期に縦弾性係数は大きく増加する。これは黒鉛結晶内に作られた欠陥（空孔や小さなクラスター）が基底面に沿って運動する転位の動きをピン止め（Pinning）するためである。更に照射が進むと縦弾性係数は大きく増加する。これは黒鉛の収縮により気孔が消滅して緻密化することによる。収縮が最大になり、膨張に転じ始める照射量では新たな気孔の発生により縦弾性係数は低下し始める。また、照射初期における増加率は、照射温度が低いほど大きい[1]。

高温工学試験研究炉（HTTR）基準で用いている黒鉛の縦弾性係数[13]は、応力－ひずみ曲線における基準引張強さ及び基準圧縮強さの 1/3 の点と原点を結んだ直線の勾配で表されている。また、照射による縦弾性係数は超音波法で縦波の音速から算出している。したがって、照射に伴う縦弾性係数の変化値は未照射の縦弾性係数値に超音波法で測定した縦弾性係数の変化率を乗じて算出する。

4.2 IG-110 黒鉛の縦弾性係数変化に及ぼす照射効果の内外挿法による評価

IG-110 黒鉛について照射による縦弾性係数変化は 600℃での重照射データしかないため、内外挿により照射データの拡張を行った。具体的な手法を以下に示す。

低照射量領域における縦弾性係数の挙動は**図 4.1** に示す実測データ[9]より直線的に変化すると見なせるので(4.1)式で定める一次式によって表す。

また、高照射量領域の挙動については、**図 4.2** に ATR-2E 黒鉛、IG-110 黒鉛の高照射量領域の縦弾性係数の変化率を示す。縦弾性係数変化は低照射領域以後、黒鉛の構造的変化により極大値までは増加し、その後は低下することが確認された。さらに、**図 4.3** に示すように、縦弾性係数変化を各銘柄、温度毎の高照射領域における極大値で規格化した結果、照射による縦弾性係数の高照射領域の挙動は照射に伴う寸法変化と同様に、一定の範囲で二次式によって近似できることが確認された。よって高照射量領域は (4.2)式で示す二次式によって表すものとする。

低照射量領域から高照射量領域の遷移はそれぞれの近似線の交点とする。

$$\frac{E_d}{E_0} - 1 = a\gamma + b \qquad (\gamma \leqq \gamma_C) \cdots\cdots\cdots (4.1)$$

$$\frac{E_d}{E_0} - 1 = c(\gamma + d)^2 + e \qquad (\gamma > \gamma_C) \cdots\cdots\cdots (4.2)$$

ここで

γ_C ：高照射領域が始まる照射量（$\times 10^{26}$ n/m^2, E＞0.1MeV）
γ ：高速中性子照射量（$\times 10^{26}$ n/m^2, E＞0.1MeV）
a,b ：低照射量領域の一次式（縦弾性係数変化）の係数
c ：高照射量領域の二次式（縦弾性係数変化）の係数
d ：高照射量領域における極大値の高速中性子照射量（$\times 10^{26}$ n/m^2, E＞0.1MeV）
e ：高照射量領域におけるの極大値の縦弾性係数の変化

低照射量領域における内外挿方法の適用は、他銘柄の縦弾性係数の変化を**図 4.1** に示した一次式で近似し、直線の傾き（a)の温度依存性を導出する。さらに**図 4.4** に示すようにターンアラウンド点（TA）後まで照射データが揃っている IG-110 黒鉛の 600℃の縦弾性係数変化データ[(11)-(13)]に傾き(a) の温度依存性を適用して種々の照射温度における縦弾性係数の変化を算出した。

この手法の妥当性について IG-110 黒鉛の照射温度 800℃の場合の外挿直線と 800℃照射による縦弾性係数の変化率の実測値を検証した結果、よく一致しており、本外挿方法は妥当であると考えられる。

なお、縦弾性係数は照射初期に急激に増加するため、設計上は照射量ゼロからその立ち上がり区間に低照射量領域の近似直線を適用しても差し支えないと考えられる。また、IG-110 黒鉛のように低照射量領域において設計データがある場合はそれを適用することも妥当であると考えられる。

高照射量領域における内外挿法の適用は、他銘柄の極大値（照射量（d)、縦弾性係数の変化（e))、ならびに二次の項の係数（c）の 600℃を基準とした温度依存性の変化率を IG-110 黒鉛の 600℃の縦弾性係数変化を基準として適用し、各照射温度において内外挿を適用した。低照射量領域から高照射量領域の遷移はそれぞれの近似線の交点とすることが妥当であると考えられる。

式（4.1）と式（4.2）で得られた照射効果曲線を**図 4.5** に、また外挿式の係数を**表 4.1** に示す。**図 4.5** が求めるべき IG-110 黒鉛の縦弾性係数の照射効果曲線である。

5．強度

5.1 照射に伴う強度変化

照射に伴う黒鉛の強度変化は縦弾性係数とほぼ同様の挙動を示し $\sigma/\sigma_0 = (E/E_0)^k$ で表される[(1)(9)(18)]。照射初期に強度は上昇し、その後の寸法収縮（密度増加）に伴い更に強度は上昇し、最大収縮を超えた照射量において強度低下が始まる。しかし、一般的に照射に伴い寸法が収縮から膨張に転じ、元の寸法まで戻る照射量においても、強度は照射前の 30～50%ほど高い値を示す。

照射後の強度の照射量依存性を次式で表す。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0}=\left(\frac{E}{E_0}\right)^k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.1)$$

ここで

σ ：照射後の強度

σ_0 ：照射前の強度

E ：照射後の縦弾性係数

E_0 ：照射前の縦弾性係数

k ：定数。黒鉛銘柄によって異なり一般的に 0.5～1.0 [(1)]。k ＝ 0.5 の場合、塑性変形を伴わないグリフィスの脆性破壊条件を示し、塑性的挙動を示すに従い k が増加する。

5.2 IG-110 黒鉛の強度に及ぼす照射効果の内外挿法による評価

IG-110 黒鉛について、照射に伴う強度変化の内外挿方法による評価を以下のように実施した。

高照射量領域においては、照射効果を(5.2)式で表す。定数 k の導出法を以下に示す。内外挿法によって導出した IG-110 黒鉛の縦弾性係数変化の高照射量領域における極大値と、600℃の強度変化の極大値[(11)]（**図 5.1**）の比から $\sigma/\sigma_0 = (E/E_0)^k$ の定数 k を算出した。その結果、k=0.71 となった。この k 値を用いて 1000℃における外挿曲線を作成し、実験データ[(19)]と比較した。ともに図 5.1 に示す。1000℃における外挿曲線は実験データの傾向と合致しているため、この k 値を温度によらず IG-110 黒鉛に対して用いることとした。

低照射量領域における強度変化データの内外挿は縦弾性係数データの内外挿法を適用して算出した式を用いた。すなわち、以下の①もしくは②の手法を用いて内外挿を行う。

①IG-110 黒鉛のように低照射量領域において縦弾性係数の照射データ設計曲線がある場合は、(5.3)式をそのまま適用する。

②縦弾性係数の内外挿式が一次式で表される照射量領域においては(5.4)式の照射効果曲線で表す。なお、縦弾性係数は照射初期に急激に増加するが、この急激な増加を示す照射領域については、設計上、低照射量領域の近似直線を適用することは差し支えないと考えられる。

すなわち、本検討では次式によって照射による強度変化を表すとした。

$$\frac{\sigma_S}{\sigma_0}=\left(\frac{E_S}{E_0}\right)^k \left(\gamma > \gamma_C\right) : \frac{\sigma_S}{\sigma_0}=\left\{c\left(\gamma+d\right)^2+e\right\}^k \quad \cdots\cdots\cdots \quad (5.2)$$

$$\frac{\sigma_P}{\sigma_0}=\left(\frac{E_P}{E_0}\right)^k \left(\gamma \leqq \gamma_C\right) : \frac{\sigma_{P1}}{\sigma_0}=\left\{ \left[\sum_{i=1}^{5} a_i \cdot \left(\gamma^{1/2}\right)^i\right]_t \right\}^k \quad \cdots \quad (5.3)$$

又は

$$\frac{\sigma_{P2}}{\sigma_0}=\left\{a\,\gamma+b\right\}^k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.4)$$

ここで

γ_C ：縦弾性係数の照射変化において高照射領域が始まる照射量（$\times 10^{26}$ n/m^2, E＞0.1MeV）

σ_P ：低照射領域の強度

σ_{P1} ：IG-110黒鉛の縦弾性係数設計曲線(HTTR基準)を適用する場合の強度（MPa）
σ_{P2} ：低照射領域において強度変化を一次式で表す場合の強度（MPa）
σ_S ：高照射領域の強度（MPa）
k ：定数（k=0.712）
$a\gamma+b$ ：縦弾性係数の低照射領域の内外挿式
$c(\gamma+d)^2+e$ ：縦弾性係数の高照射領域の内外挿式
$\left[\sum_{i=1}^{5} a_i \cdot \left(\gamma^{1/2}\right)^i\right]_t$ ：IG-110 黒鉛の縦弾性係数の照射効果関係式設計用データ[13]

IG-110黒鉛の照射による強度変化の内外挿結果を**図5.2**に示す。

6．照射クリープ

6.1 照射クリープひずみ

HTGR 炉内黒鉛構造物の内部応力は、温度勾配や照射に伴う寸法変化等による応力発生と照射クリープによる応力緩和とによって定まる[20]。従って、炉内黒鉛構造物の供用期間は、照射クリープひずみと照射に伴う寸法変化に依存する。また、定常照射クリープ係数は、照射温度が高くなるに従って大きくなる傾向にある。

照射クリープ式は Maxwell モデル（定常照射クリープ）と Kelvin モデル（過渡照射クリープ）を直列に結合したモデルで表される[21]。ここでは次式によって照射クリープひずみ ε_c の変化を表現するものとする。

$$\varepsilon_c = a\frac{\sigma}{E_0}\{1-\exp(-b\gamma)\}+K\sigma\gamma \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (6.1)$$

ここで
ε_c ：照射クリープひずみ
σ ：応力（MPa）
γ ：高速中性子照射量（$\times 10^{26}$ n/m^2, E＞0.1 MeV）
a、b ：遷移照射クリープパラメータ
K ：定常照射クリープ係数
E_0 ：照射前の縦弾性係数（GPa）

ATR-2E 黒鉛、H-451 黒鉛、IG-110 黒鉛の照射クリープひずみ（ε_c）を初期弾性ひずみ（$\varepsilon_0=\sigma/E_0$）で規格化し、無次元化した結果を**図 6.1**、**図 6.2** に示す。その結果、各銘柄共に同様な変化をしており、照射による変化は同一として扱った。

6.2 IG-110 黒鉛の定常照射クリープ係数の内外挿法による評価

IG-110黒鉛の定常照射クリープ係数データについて内外挿法による評価を以下のように実施した。

定常照射クリープ係数 K の照射温度依存性は、他銘柄の準等方性黒鉛の照射試験結果[9][22][23]および、IG-110 黒鉛の実測値データ（照射温度 600～1000℃）[13]に対して次式を適用し、これ

を照射効果に関する外挿曲線とした（**図 6.3**）。

定常照射クリープ係数の照射効果関係式：K= 0.7163 exp(0.0012T)・・・(6.2)

(6.1)式に(6.2)式で示した定常照射クリープ係数を代入し、各照射温度での IG-110 黒鉛の照射クリープひずみを**図 6.4** に示す。ここで T は照射温度である。

上記の検討では照射データが十分には存在しないため、高照射量領域の三次照射クリープについては内外挿法による評価を実施しなかったが、参考として高照射量領域の照射クリープひずみの変化を三次照射クリープとして評価する場合の内外挿法の一例を以下に示す。

照射クリープひずみ（ε_c）を初期弾性ひずみ（$\varepsilon_0=\sigma/E_0$)で規格化し、無次元化する。

照射クリープを表す式として TA 前後で分けて表す。

①TA 前（1 次、2 次照射クリープ）

$$\varepsilon_{c1}=\frac{\sigma}{E_0}\cdot a\sqrt{\gamma} \qquad \left(\gamma \leqq \gamma_{TA}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots (6.3)$$

②TA 後（3 次照射クリープ）

$$\varepsilon_{c2}=\frac{\sigma}{E_0}\cdot\left\{b(\gamma+p)^2+q\right\} \qquad \left(\gamma > \gamma_{TA}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots (6.4)$$

ここで

γ　：高速中性子量

E_0　：照射前縦弾性係数

σ　：負荷応力

p　：照射寸法変化の TA 点照射量

q　：照射量 p に対する照射クリープひずみ（規格化した照射クリープひずみ $\varepsilon_c\cdot(E_0/\sigma)$）。照射量 p に対する q は ATR-2E 黒鉛（300、500℃）、H-451 黒鉛(900℃)の実測値より近似多項式より算出する。

a、b　：係数。近似多項式で TA 点を終点とした。

IG-110 黒鉛への外挿は、照射クリープを表す式(6.3)、(6.4)の係数 a 及び b は ATR-2E 黒鉛及び H-451 黒鉛の実測値（**図 6.5**）よりフィッティングカーブを作成し、その式の温度との関係（**図 6.6**）より導出した。IG-110 黒鉛への外挿結果を**図 6.7** に示す。

IG-110 黒鉛の実測値と外挿曲線を比較すると低照射量領域ではあるが、照射クリープのばらつきを考慮すると良く一致している。なお、ここで得られた外挿線と HTTR 設計曲線の低照射領域における一次照射クリープひずみがほぼ等しいことが確認された。

本検討では、これまでの知見に基づき、遷移照射クリープと定常照射クリープの式に対して内外挿法を適用した。実際に本方法を適用する際には保守側の評価であることを確認し、今後、データの蓄積がなされた場合には、高照射量領域における本式の妥当性を確認することが望ましい。また、本検討では引張荷重と圧縮荷重による照射クリープひずみは同等として扱った。今後、圧縮荷重による照射データの蓄積と評価を行い、精度を向上させることが期待される。そのため、今後、照射クリープ試験を実施してデータの蓄積を図ることが望まれる。

7．熱膨張係数

7.1 照射に伴う熱膨張係数の変化

黒鉛の照射による平均熱膨張係数は、照射による黒鉛結晶子 c 軸方向の膨張によって結晶子の間に存在するマイクロクラックが閉じるため、照射初期に熱膨張係数が増加する。更に照射量が増えると、フィラーと結合材の照射による寸法変化の差が顕著になり内部応力が生じてマイクロクラックが生成するので熱膨張係数が減少する[24]。

照射による熱膨張係数は照射寸法変化のターンアラウンド(TA)をもたらす照射量（γ_{TA})まで 3 次曲線的に変化し、その後には直線的に低下する。

7.2 IG-110 黒鉛の熱膨張係数に及ぼす照射効果の内外挿法による評価

IG-110 黒鉛の照射による平均熱膨張係数の内外挿法による評価を以下のように実施した。

照射寸法変化の TA 照射量以下では、照射データが揃っている ATR-2E 黒鉛の熱膨張係数の照射に伴う変化データ[9]を TA の照射量で規格化した三次式のマスターカーブを作成する(**図 7.1**)。さらに、各照射温度の TA 照射量における熱膨張係数変化（R_{TA}）の実測値より R_{TA} と照射温度の関係式を導出した（**図 7.2**)。R_{TA} と照射温度の関係式は任意の照射量と熱膨張係数変化の関係にも適用できるものとし、算出した温度依存性をマスターカーブへ乗じて、熱膨張係数の極大値（R_{MAX})、照射に伴い熱膨張係数変化率が 1 になる照射量（γ_{R1})、R_{TA} を算出する。IG-110 黒鉛に適用する場合、R_{MAX} 、γ_{R1}、 R_{TA} 点の照射量は他銘柄の TA 照射量で規格化されているため、IG-110 黒鉛の TA 照射量を乗じることにより、IG-110 黒鉛の R_{MAX} 、γ_{R1}、 R_{TA} 点が算出される。

さらに IG-110 黒鉛の原点、 R_{MAX} 、γ_{R1}、 R_{TA} の各点に適合する外挿線を作成し、これを外挿曲線とする。

TA 後の照射による熱膨張係数の変化は照射量の一次式で近似できるため、TA 後の一次式の傾き（d）の温度依存性を導出し（**図 7.3**)、対象とする照射温度の TA 後の一次直線を作成した（**図 7.4**)。

ここで

R_{TA} ：照射に伴う寸法変化の TA 点照射量における熱膨張係数変化（α_{TA}/α_0)

R_{MAX} ：極大値を示す熱膨張係数変化（α_{MAX}/α_0）

γ_{TA} ：照射に伴う寸法変化の TA 点の照射量（$\times 10^{26}$n/m^2,E＞0.1MeV)

γ_{MAX} ： R_{MAX} の時の照射量（$\times 10^{26}$n/m^2,E＞0.1MeV)

γ_{R1} ：照射に伴う熱膨張係数変化率が 1 になる照射量（$\times 10^{26}$n/m^2,E＞0.1MeV)

上述したように照射による熱膨張係数の変化は次式で表されると考える。

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = a\gamma^3 + b\gamma^2 + c\gamma + 1 \qquad (\gamma \leqq \gamma_{TA}) \cdots\cdots\cdots (7.1)$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = d\gamma + e \qquad (\gamma > \gamma_{TA}) \cdots\cdots\cdots\cdots (7.2)$$

ここで

γ ：高速中性子照射量（$\times 10^{26}$ n/m^2, E＞0.1MeV）
γ_{TA} ：TAの照射量（$\times 10^{26}$ n/m^2, E＞0.1MeV）
α_0 ：照射前の20℃からの平均熱膨張係数(℃$^{-1}$)
α ：照射後の20℃からの平均熱膨張係数(℃$^{-1}$)
a,b,c,d,e ：係数

式（7.1）と式（7.2）で得られた照射効果曲線を**図 7.4** に、また外挿式の係数を**表 7.1** に示す。**図 7.4** が求めるべき IG-110 黒鉛の熱膨張係数の照射効果曲線である。

この手法の妥当性について ATR-2E 黒鉛ならびに準等方性黒鉛のデータを用いて検証した。その結果を**図 7.5** と**図 7.6** に示す。照射された時の熱膨張係数の実測値と外挿線はよく一致しており、本外挿方法が妥当であると考えられる。

8．まとめ

本研究では実用高温ガス炉での使用を想定し、IG-110 黒鉛について HTTR の使用条件範囲を超えた照射条件に対する各種特性の変化を既存データの内外挿によって導出した。導出にあたっては他銘柄の黒鉛の照射データを基に汎用的な内外挿方法を検討して用いた。

本研究において実施した IG-110 黒鉛照射データ（寸法変化、熱伝導率、縦弾性係数、強度、照射クリープひずみ、熱膨張率等）への内外挿法の適用により、世界に先駆けて実用高温ガス炉の設計に必要な照射効果曲線が得られた。

なお、実際に HTGR 設計に適用するに当たっては以下の点について留意する必要がある。

(1) 将来的には確認のため照射データの蓄積を行い、精度を向上させることが望ましい。
(2) 本報告では照射データを適宜規格化することにより銘柄依存性を考慮しなくても良い外挿式を提案している。これらの提案式は既存データに基づいて導出しているので、既存データがカバーする範囲外で使用する場合は当該範囲における照射データを揃えることが望ましい。
(3) ここで示した内外挿の方法は一つの提案であり、黒鉛の照射挙動等を十分モデル化できる他の方法の存在を否定するものではない。

謝辞

照射データの内外挿方法を検討するにあたり、ご助言、ご指導頂きました日本原子力学会「高温ガス炉黒鉛構造物規格化のための調査検討」特別専門委員会の方々に感謝いたします。

参考文献

(1) 田辺哲朗,丸山忠司、核融合炉用黒鉛（炭素）材料(1993)
(2) D.K.L.Tang and B.J.Marsden, Effects of dimensional change strain in nuclear graphite component stress analysis, Nuclear Engineering and Design, 237, pp.897-904(2007)
(3) Irradiation damage in graphite due to fast neutrons in fission and fusion systems,IAEA-TECDOC-1154（2000)
(4) B.T. Kelly, J.E. Brocklehurst,High dose fast neutron irradiation of highly oriented pyrolytic graphite, Carbon, Volume 9, Issue 6, December 1971, pp. 783-789
(5) J.E. Brocklehurst, B.T. Kelly, Analysis of the dimensional changes and structural changes in polycrystalline graphite under fast neutron irradiation, Carbon, Volume 31, Issue 1, 1993, pp.155-178
(6) 曽我部敏明　他,高温ガス炉用炭素繊維強化炭素複合材料の開発,JAERI-Research 2002-026(2002)
(7) 角田淳弥　他,HTTR 炉心の初装荷 IG-110 黒鉛の特性値,JAEA-Technology 2006-048(2006)
(8) W.H.Martin, Amended DIDO Equivalent Neutron Doses for D.F.R Graphite Experiments 27/6,199/1 and 199/2, TRG M 3453(C)(1966)
(9) Gerd Haag, Properties of ATR-2E Graphite and Property Changes due to Fast Neutron Irradiation, Jül-4183 (2005)
(10) Shahed Fazluddin,High Temperature Irradiation Behaviour of Nuclear Graphite, EuroCourse Seminar II 発表資料(2008)
(11) S.Ishiyama et al., The effect of high fluence neutron irradiation on the properties of a fine-grained isotropic nuclear graphite, Journal of Nuclear Materials, 230, pp.1-7 (1996)
(12) 丸山忠司　他,高速炉遮蔽体用黒鉛の照射挙動,動燃技報,92,pp.49-53 (1994)
(13) 石原正博 他、高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造物設計方針における設計用データの解説、JAERI-M　91-153（1991)
(14) G.B.Engle,Assesment of Grade H-451 Graphite for Replaceble Fuel and Reflector Elements in HTGR,GA-A14690(1977)
(15) P.J.Price and L.A.Beavan,Final Report on Graphite Irradiation Test OG-3, GA-A-14211(1977)
(16) L.L. Snead et al., Swelling of nuclear graphite and high quality carbon fiber composite under very high irradiation temperature, Journal of Nuclear Materials,381, pp.55–61 (2008)
(17) 角田淳弥　他, 高温ガス炉黒鉛構造物の熱伝導率に関するアニーリング効果の設計式検討（受託研究）,JAEA-Research 2008-007(2008)
(18) R.J.Price、GA-A15495、Strength of Irradiated Graphite：A Review(1979)
(19) T. Oku et al., IRRADIATION CREEP PROPERTIES AND STRENGTH OF A FINE-GRAINED ISOTROPIC GRAPHITE, Journal of Nuclear Materials, 172, pp.77-84 (1990)
(20) 奥達雄,照射損傷効果－寸法変化と照射クリープ特性－,35-41,炭素 TANSO,201(2002)
(21) 伊与久達夫　他,高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説,JAERI-M 91-083(1991)
(22) R.J.Price、GA-A16402、IRRADIATION-INDUCED CREEP IN GRAPHITE(1981)
(23) Timothy D. Burchell,Irradiation induced creep behavior of H-451 graphite, Journal of Nuclear Materials(2008)
(24) 松尾秀人, 高温ガス炉用黒鉛材料の寸法および物理的性質に及ぼす高温照射の影響,JAERI-M 87-207 （1988）

表 2.1 内外挿に用いた黒鉛の未照射状態の物理特性[6][7][8][9][10]

GRADE		H-451	ATR-2E	IG-110	準等方性黒鉛
Filler Coke		Petro	Pitch	Petro	Gilsocarbon
Forming Methed		Extruded	Extruded	Isostatic Pressing	Moulded
Bulk Density (Mg/m^{-3})		1.74	1.80	1.77	1.82
Coeff. Thermal Expan. ($10^{-6}\cdot K^{-1}$)	Par	3.3	4.4	4.6	4.3
	Per	4.0	4.9		4.1
Thermal Conductivity ($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	Par	163	179	116	121
	Per	149	163		127
Yeung's Modulus (GPa)	Par	10.6	9.6	10.0	9.2
	Per	9.6	8.4		9.3
Tensile Strength (MPa)	Par	14.2	12.6	25.0	—
	Per	13.9	12.4		—
Isotropy Ratio		1.21	1.11	1.09	1.05

Par:Parallel、Per:Perpendicular
IG-110 の CTE 測定温度:RT-1000℃、ATR-2E の CTE 測定温度:RT-500℃、準等方性黒鉛の CTE 測定温度:RT-120℃
Isotropy Ratio ＝(CTEmax/CTEmin) or (電気抵抗率 max/電気抵抗率 min)

表 2.2 IG-110 黒鉛の照射による寸法変化率の式(2.8)の係数

温度 (℃)	TA時の照射量(p_T) ($x10^{26}n/m^2$,E>0.1MeV)	TA時の寸法変化率(q_T) (%)	二次の項 (h_T)
300	3.13	−2.60	0.18
400	2.77	−2.37	0.24
500	2.40	−2.15	0.33
600	2.04	−1.93	0.44
700	1.67	−1.71	0.60
800	1.30	−1.48	0.81
900	0.94	−1.26	1.09
1000	0.57	−1.04	1.46

表 2.3 寸法変化率の外挿式の係数

材質	IG-110	
照射温度(℃)	a_1	a_2
400	$2.79x10^{-1}$	−1.64
600	$4.50x10^{-1}$	−1.86
800	$8.21x10^{-1}$	−2.19

表 3.1 熱伝導率の外挿式の係数

材質	IG-110	
照射温度(℃)	a_1	a_2
400	-2.93×10^{-2}	3.75×10^{-1}
600	-7.94×10^{-2}	5.27×10^{-1}
800	-1.15×10^{-1}	6.34×10^{-1}

表 4.1 縦弾性係数の外挿式の係数

材質	IG-110				
照射温度(℃)	a	b	c	d	e
400	-1.69×10^{-1}	1.16	-4.56×10^{-1}	−3.92	2.29
600	-7.45×10^{-2}	8.89×10^{-1}	-6.84×10^{-1}	−2.75	1.66
800	-4.03×10^{-2}	7.26×10^{-1}	-8.45×10^{-1}	−1.93	1.04

表 7.1 熱膨張係数の外挿式の係数

材質	IG-110				
照射温度(℃)	a	b	c	d	e
400	1.33×10^{-1}	-6.83×10^{-1}	8.00×10^{-1}	-1.03×10^{-1}	1.07
600	2.64×10^{-1}	-9.93×10^{-1}	7.96×10^{-1}	-1.34×10^{-1}	1.01
800	6.28×10^{-1}	−1.57	7.38×10^{-1}	-1.64×10^{-1}	8.96×10^{-1}

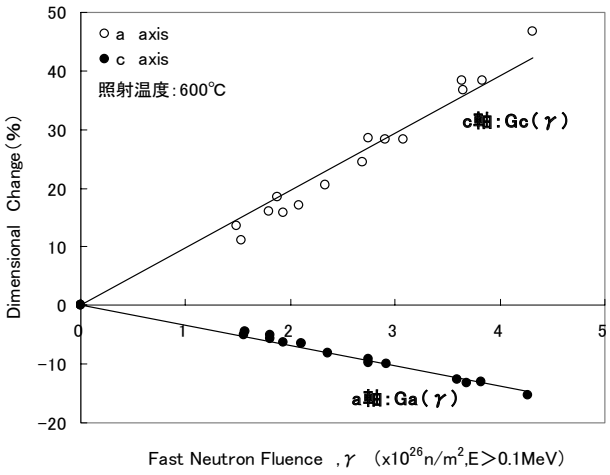


図2.1 HOPGの照射寸法変化[4]

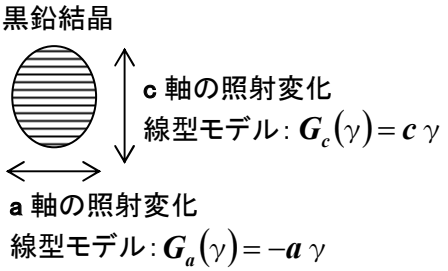


図 2.2 黒鉛結晶に対する照射寸法変化モデル

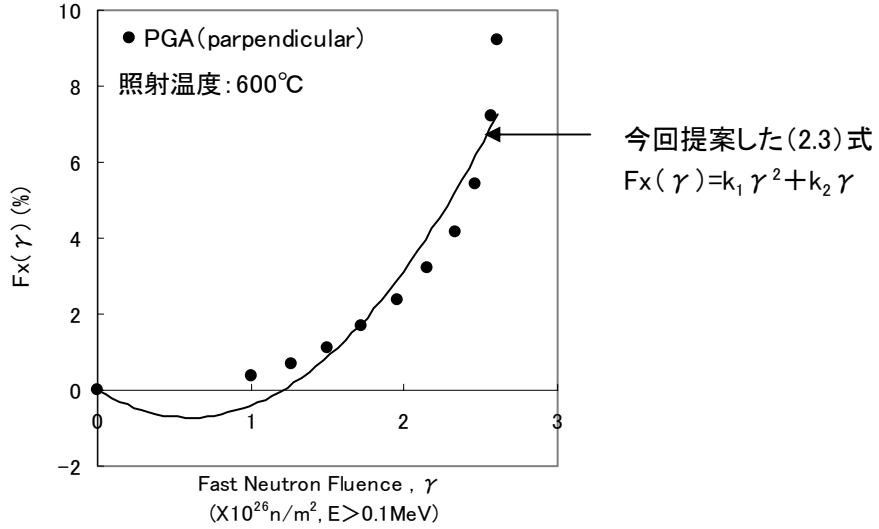


図2.3 高速中性子照射量γとFx(γ)の関係[5]

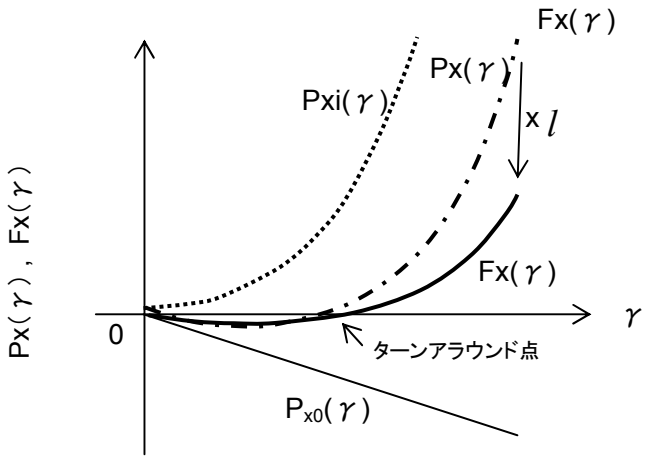


図2.4 寸法変化と気孔変化のモデル図

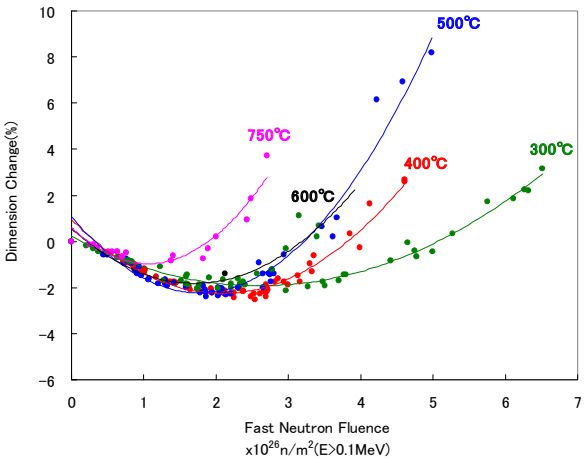


図 2.5 ATR-2E 黒鉛(perpendicular)の照射寸法変化率

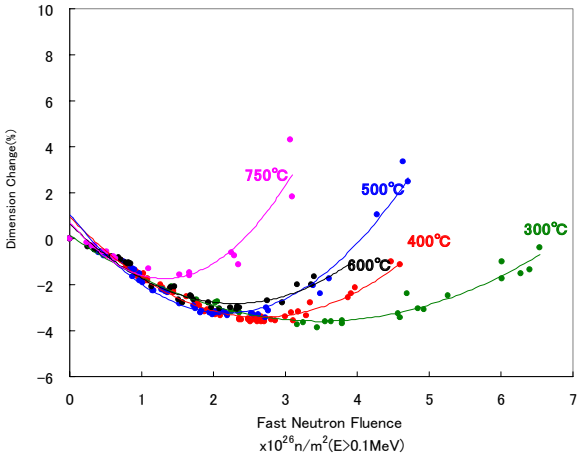


図 2.6 ATR-2E 黒鉛(parallel)の照射寸法変化率

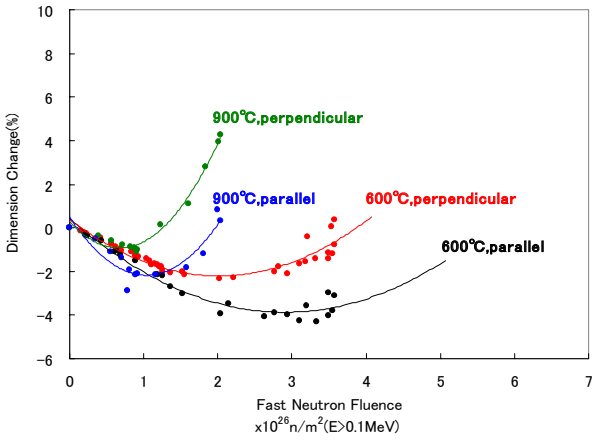


図 2.7 H-451 黒鉛(perpendicular,parallel)の照射寸法変化率

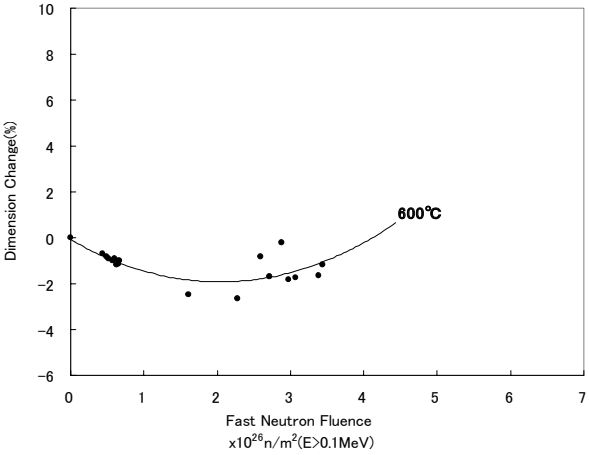


図 2.8 IG-110 黒鉛の照射寸法変化率

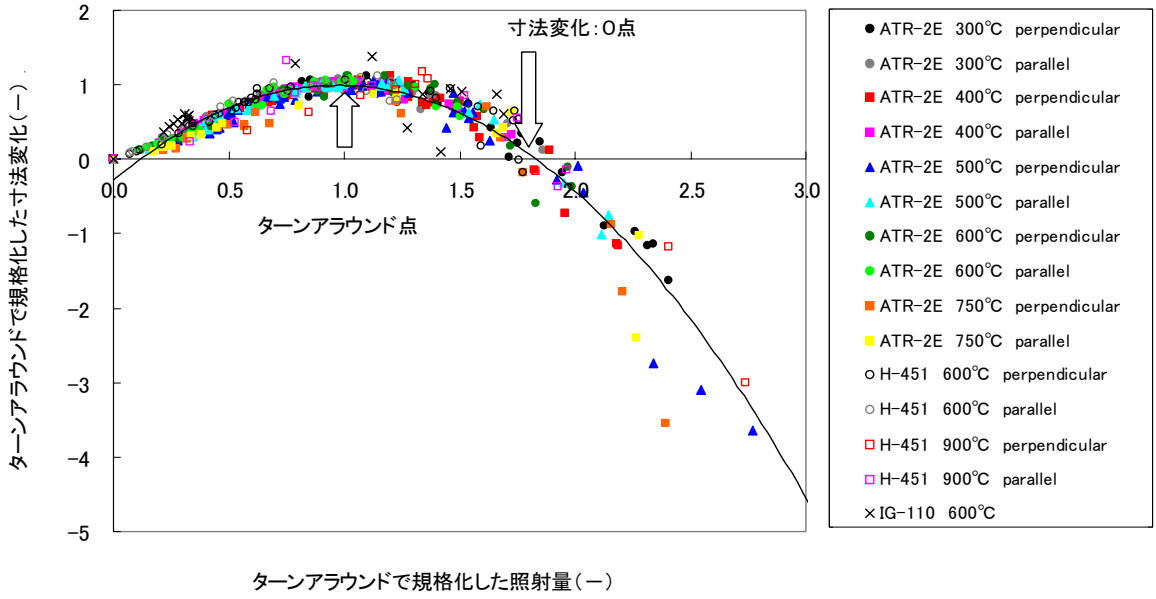


図2.9 ターンアラウンド点で規格化した照射寸法変化

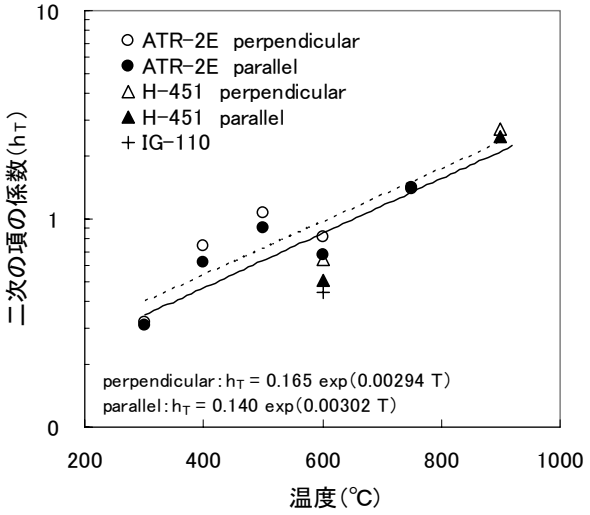


図2.10 係数(h_T)の温度依存性

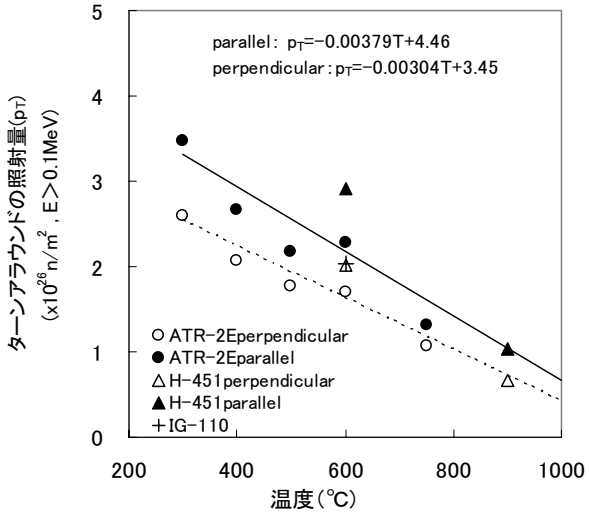


図2.11 係数(p_T)の温度依存性

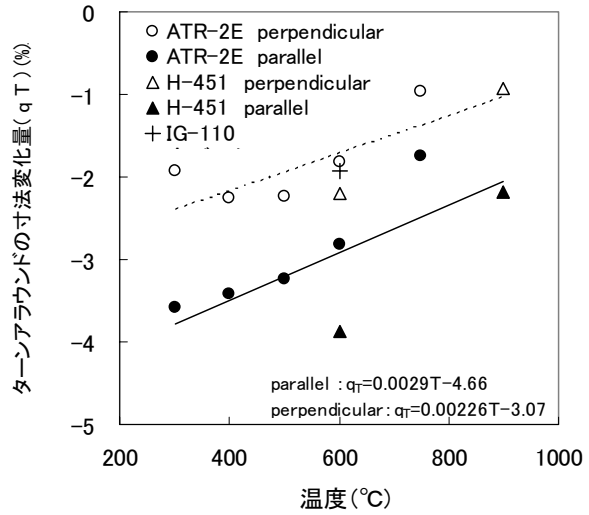


図2.12 係数(q_T)の温度依存性

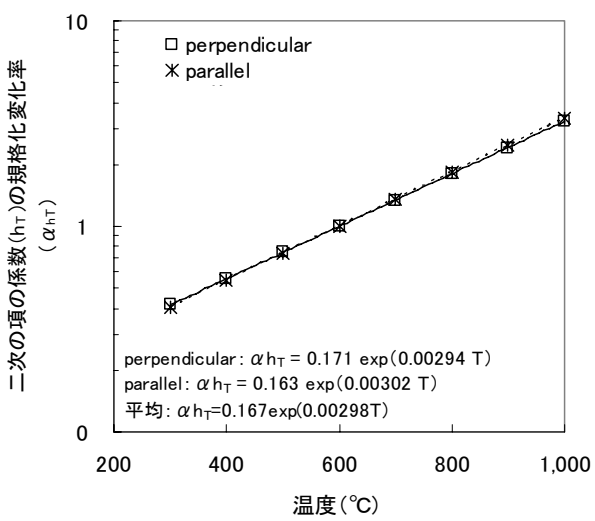


図2.13 係数(h_T)の温度依存性を規格化した時の変化率(α_{hT})

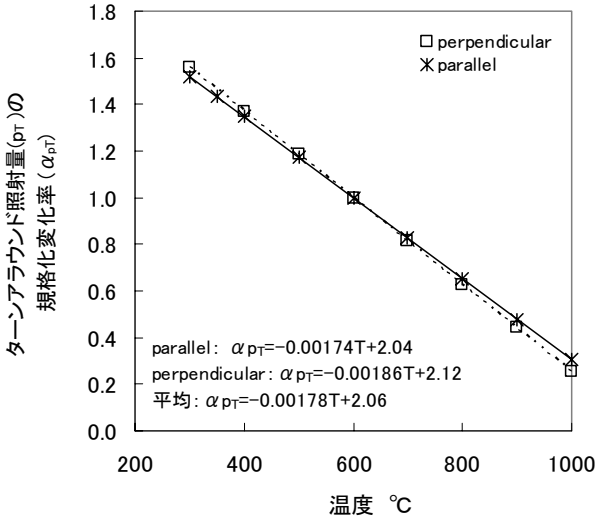


図2.14 係数(p_T)の温度依存性を規格化した時の変化率(α_{pT})

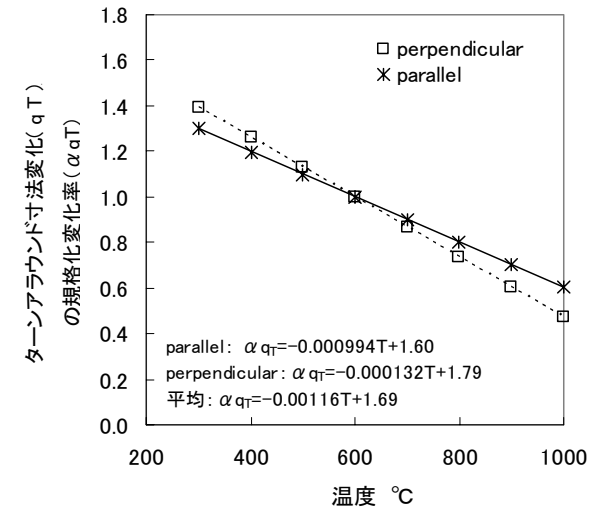


図2.15 係数(q_T)の温度依存性を規格化した時の変化率(α_{qT})

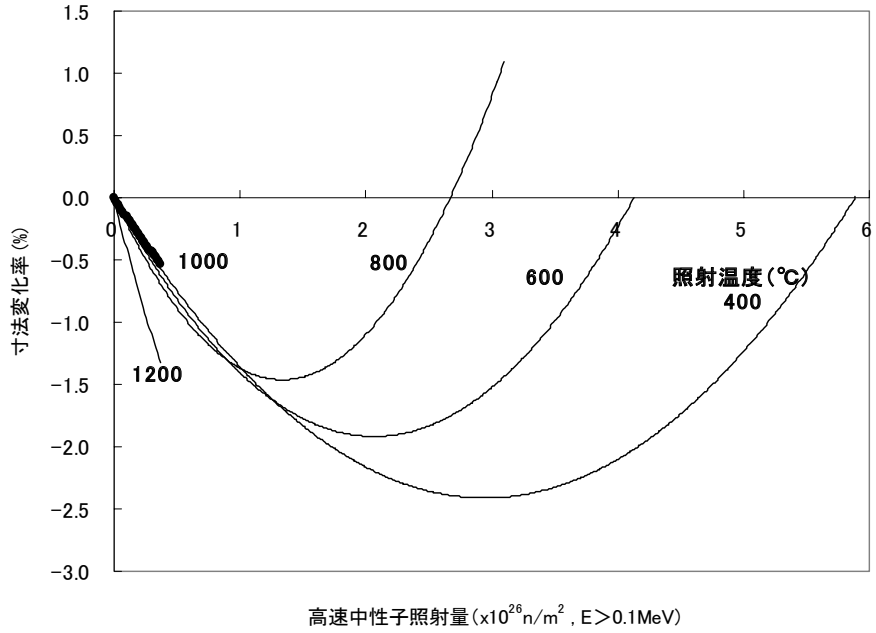


図 2.16 内外挿による IG-110 黒鉛の照射による寸法変化率曲線

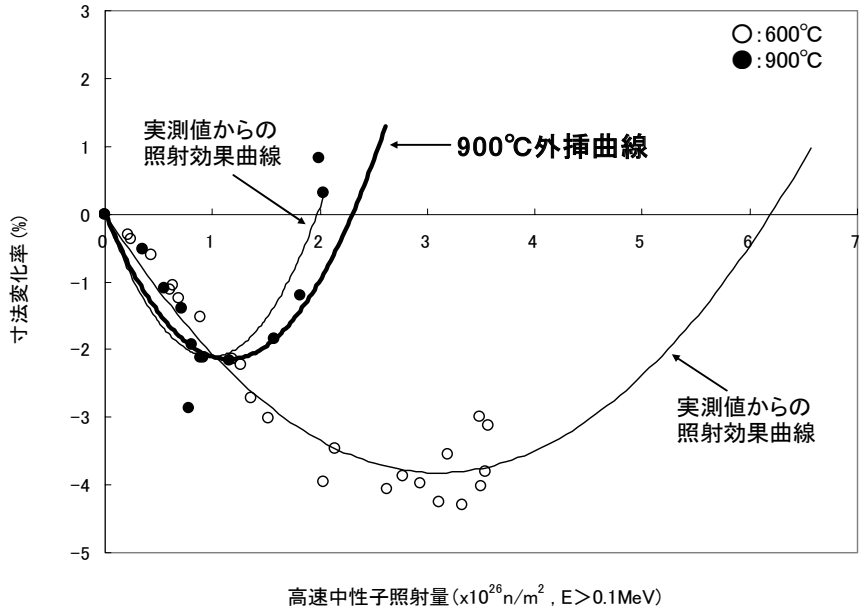
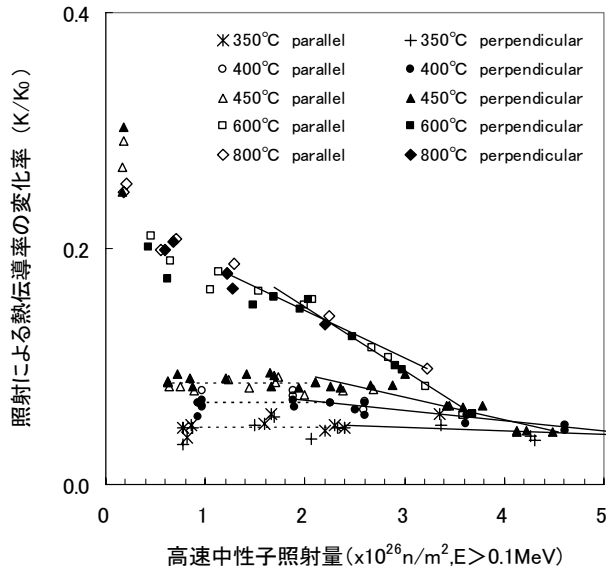


図 2.17 H-451 黒鉛への外挿検証



TA後の関係式

350℃: $K/K_0 = -0.0031\gamma + 0.058$

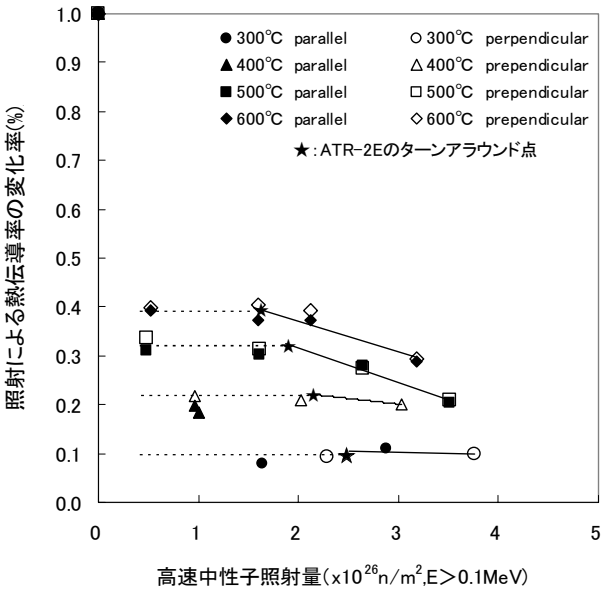
400℃: $K/K_0 = -0.0085\gamma + 0.0882$

450℃: $K/K_0 = -0.0190\gamma + 0.1308$

600℃: $K/K_0 = -0.0541\gamma + 0.2581$

800℃: $K/K_n = -0.0400\gamma + 0.2275$

図 3.1 準等方性黒鉛の照射による
熱伝導率変化率



TA後の関係式

300℃: $K/K_0 = -0.0031\gamma + 0.1118$

400℃: $K/K_0 = -0.0229\gamma + 0.2701$

500℃: $K/K_0 = -0.0715\gamma + 0.4595$

600℃: $K/K_0 = -0.0629\gamma + 0.4974$

図 3.2 ATR-2E 黒鉛の照射による
熱伝導率変化率

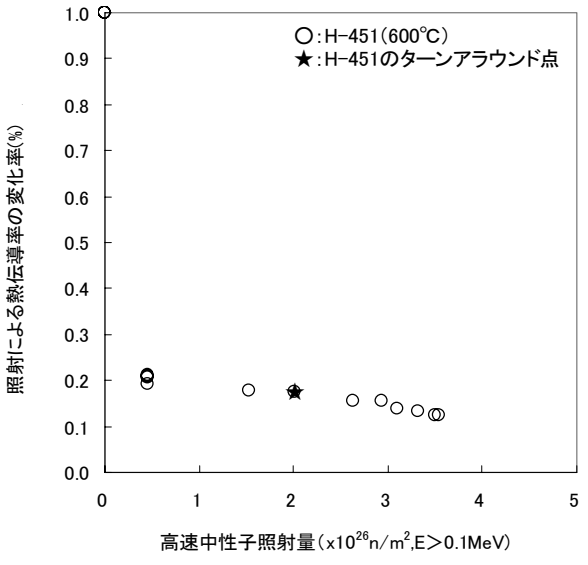


図 3.3 H-451 黒鉛の照射による
熱伝導率変化率

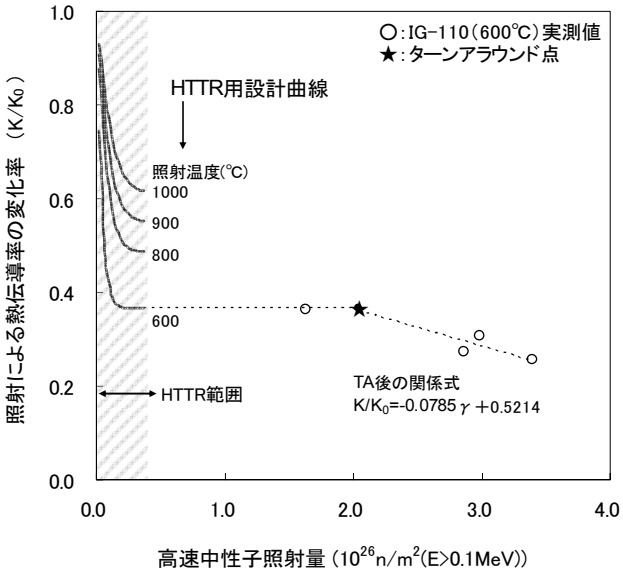


図 3.4 IG-110 黒鉛の照射による
熱伝導率変化率

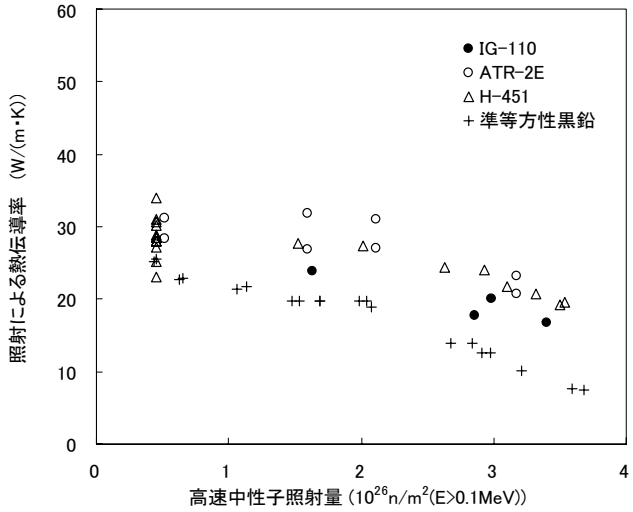
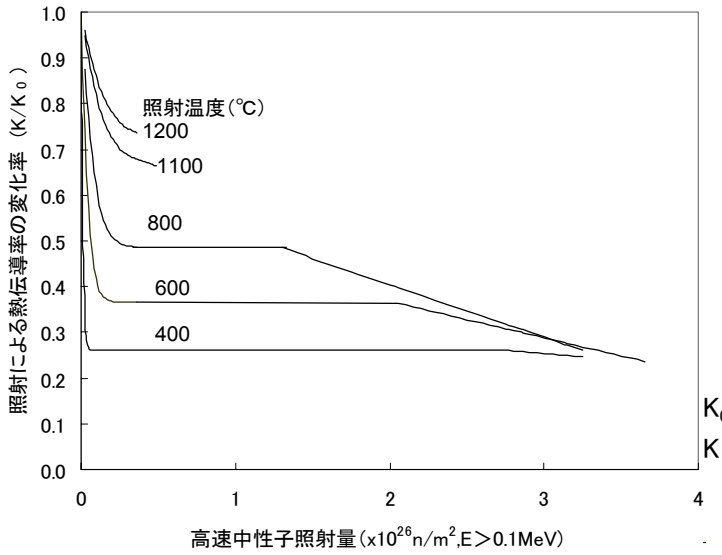


図 3.5 照射温度 600℃の熱伝導率の変化



K_0 :照射前の照射温度での熱伝導率
K :照射後の照射温度での熱伝導率

図 3.6 内外挿による IG-110 黒鉛の熱伝導率の照射効果曲線

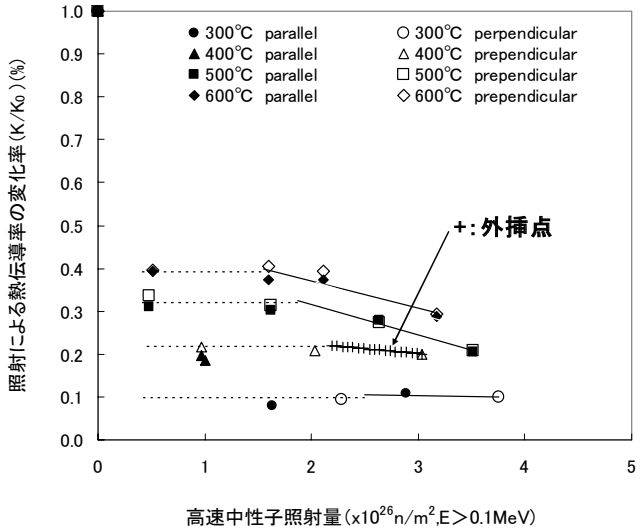
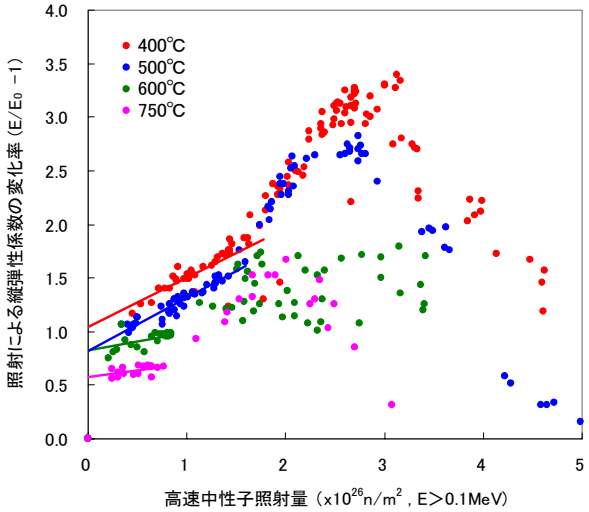


図 3.7 ATR-2E 黒鉛への外挿検証



低照射量領域の関係式

400℃：$E/E_0-1=0.464\gamma+1.042$

500℃：$E/E_0-1=0.503\gamma+0.817$

600℃：$E/E_0-1=0.171\gamma+0.822$

750℃：$E/E_0-1=0.124\gamma+0.572$

図 4.1 ATR-2E 黒鉛の照射による縦弾性係数の変化率

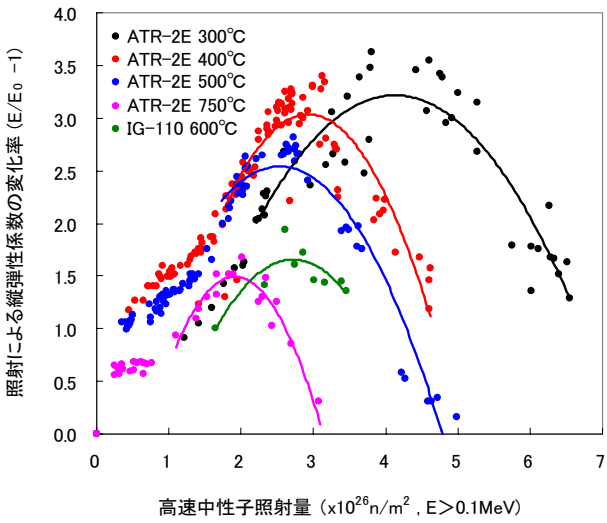


図 4.2 ATR-2E 黒鉛と IG-110 黒鉛の高照射量領域の照射による縦弾性係数の変化率近似曲線

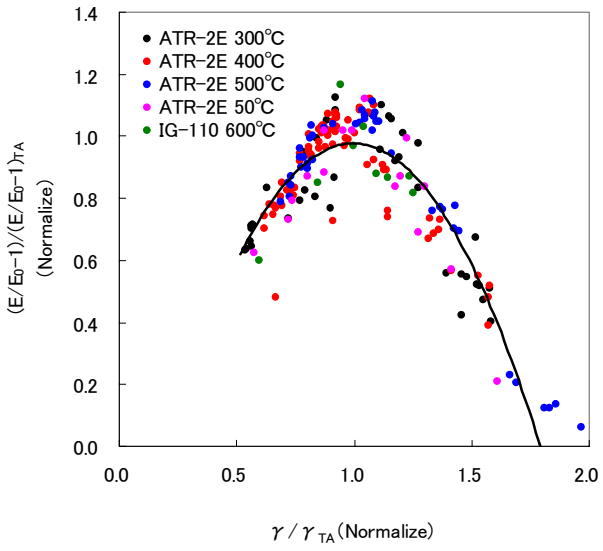


図 4.3 照射による縦弾性係数変化率を極大値で規格化した高照射量領域の挙動

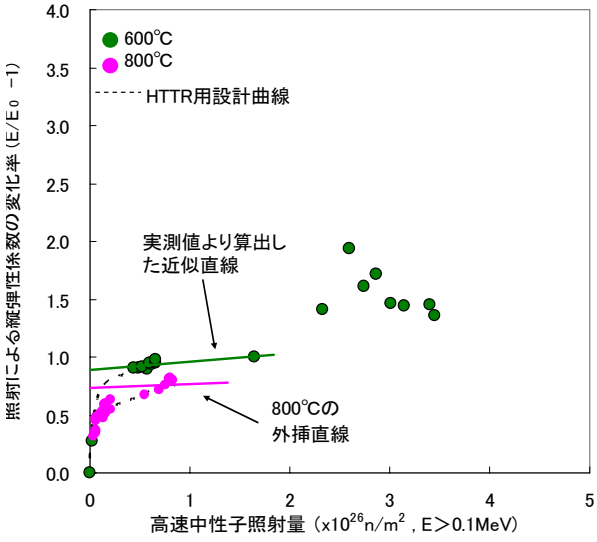
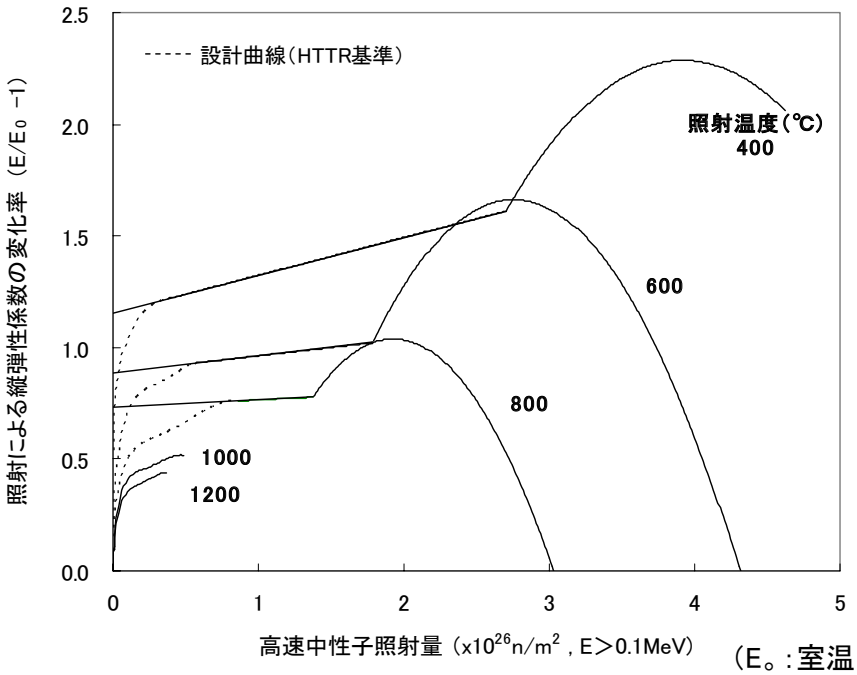


図 4.4 IG-110 黒鉛の照射による縦弾性係数の変化率



(E。:室温の縦弾性係数)
(E :高温の縦弾性係数)

図 4.5 内外挿による IG-110 黒鉛の縦弾性係数の照射効果曲線

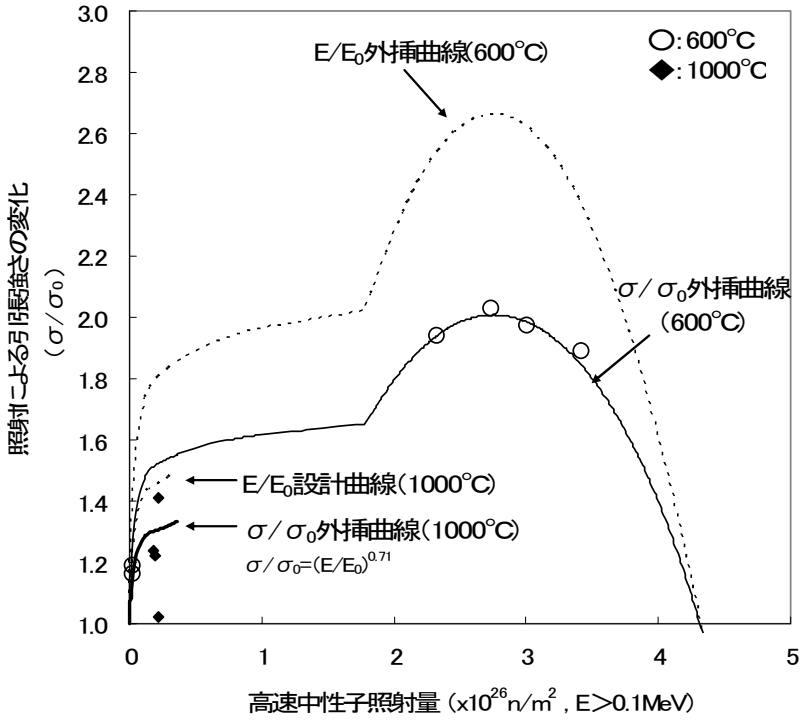


図 5.1 IG-110 黒鉛の照射による強度変化

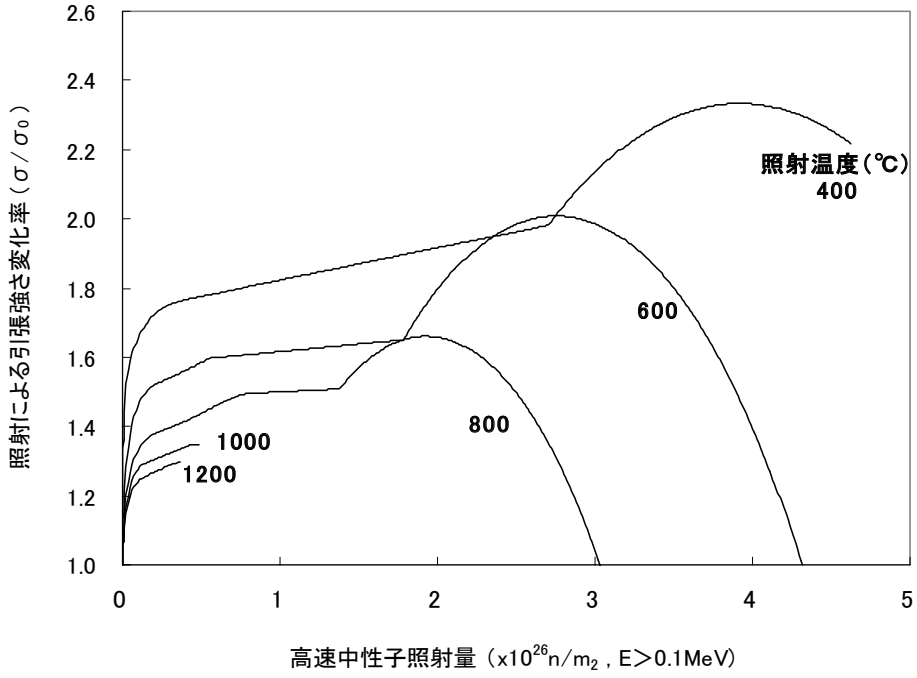


図 5.2 内外挿による IG-110 黒鉛の照射による強度変化率曲線

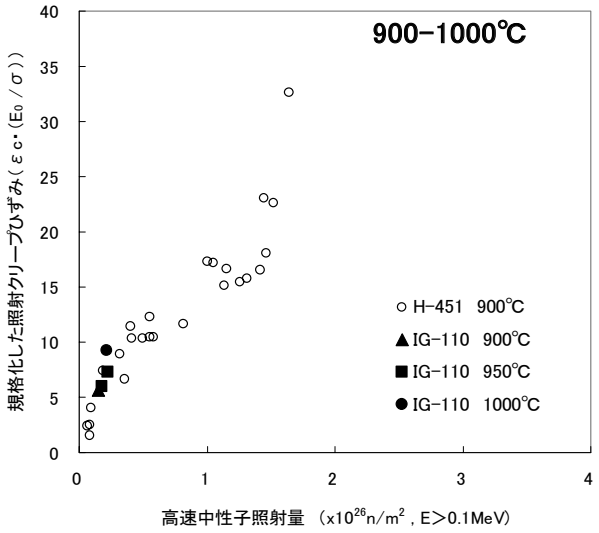


図 6.1 H-451 黒鉛と IG-110 黒鉛の初期弾性ひずみで規格化した照射クリープひずみ（900-1000℃）

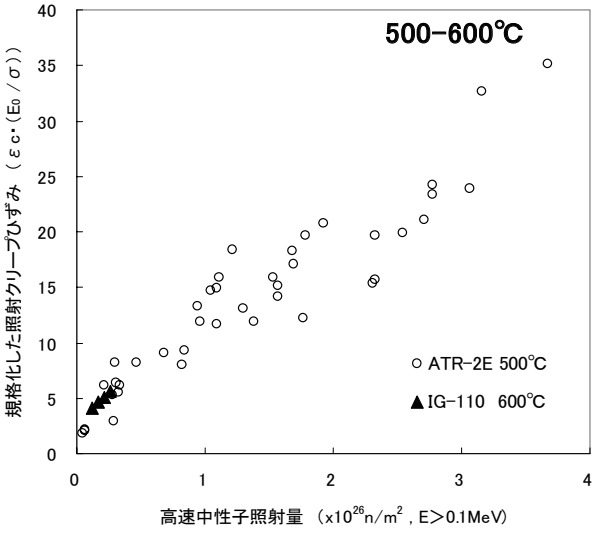


図 6.2 ATR-2E 黒鉛と IG-110 黒鉛の初期弾性ひずみで規格化した照射クリープひずみ（500-600℃）

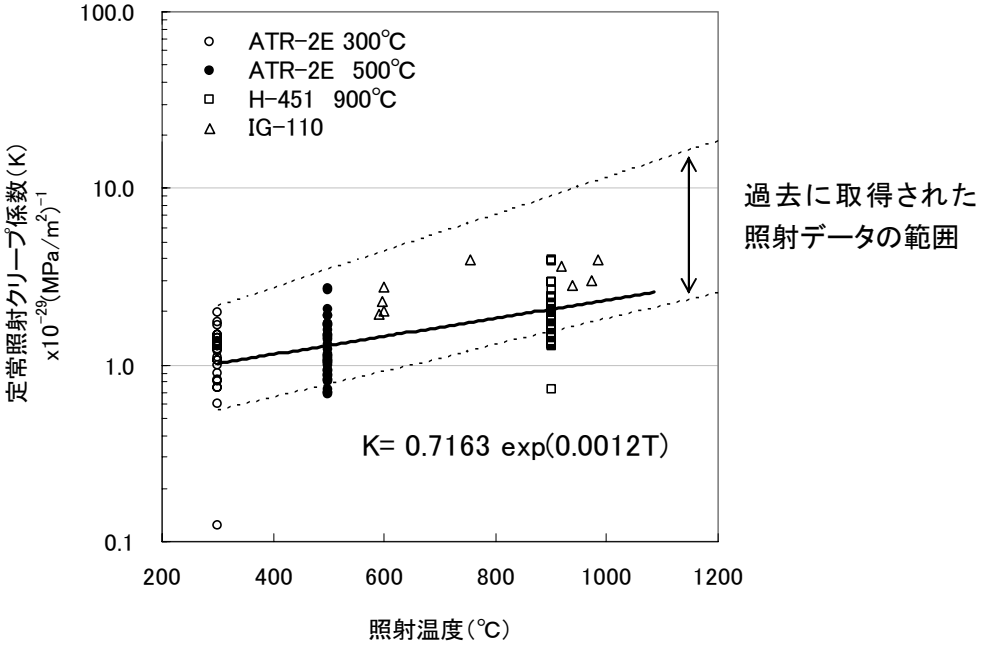


図 6.3 内外挿による IG-110 黒鉛の定常照射クリープ係数曲線

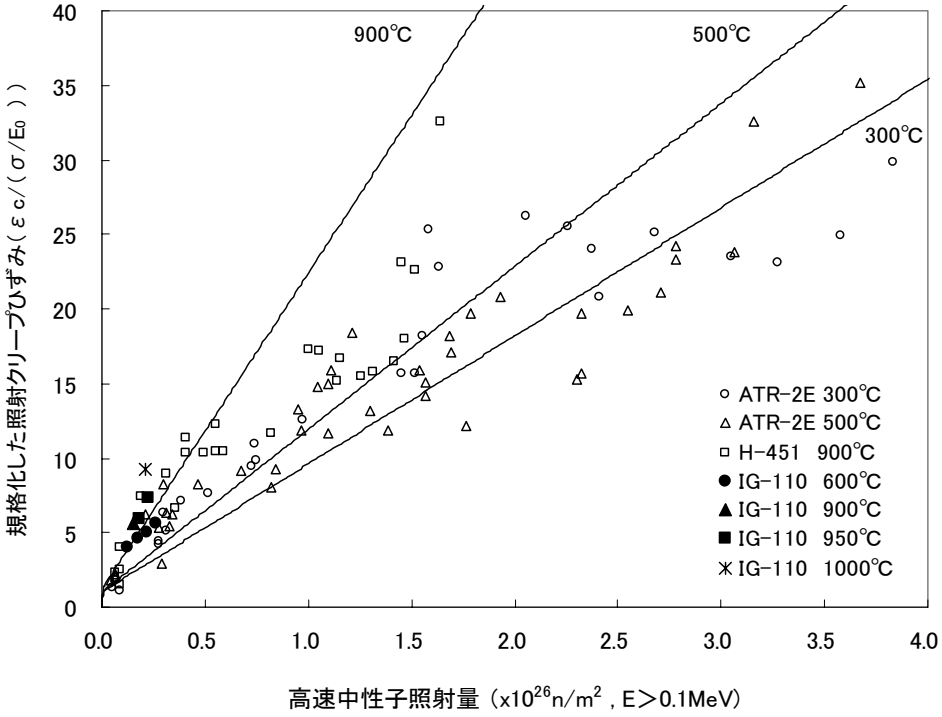


図 6.4 内外挿した定常照射クリープ係数を用いて規格化した IG-110 黒鉛の
照射クリープひずみ曲線と他銘柄の規格化した照射クリープひずみ

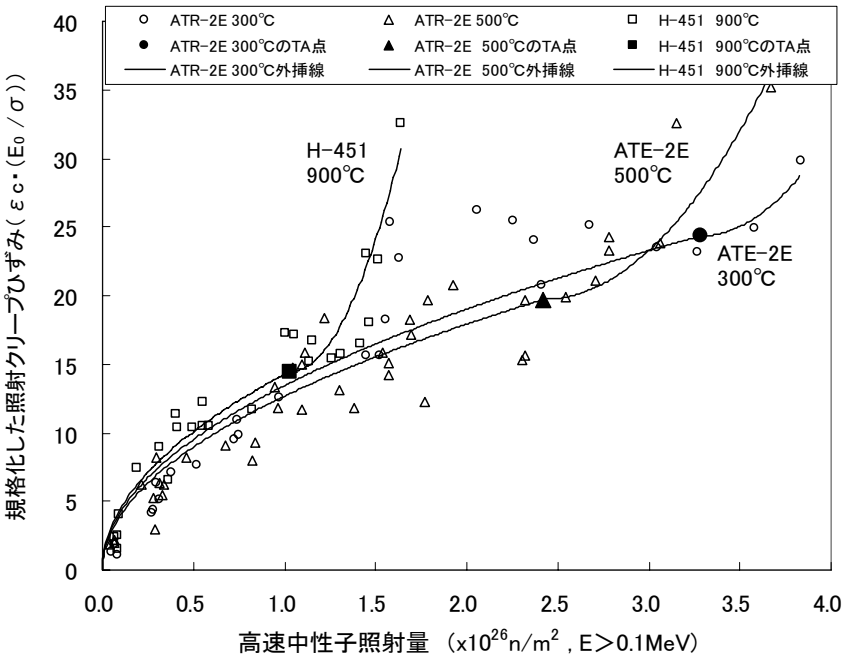


図 6.5 三次クリープを考慮した照射クリープひずみの変化

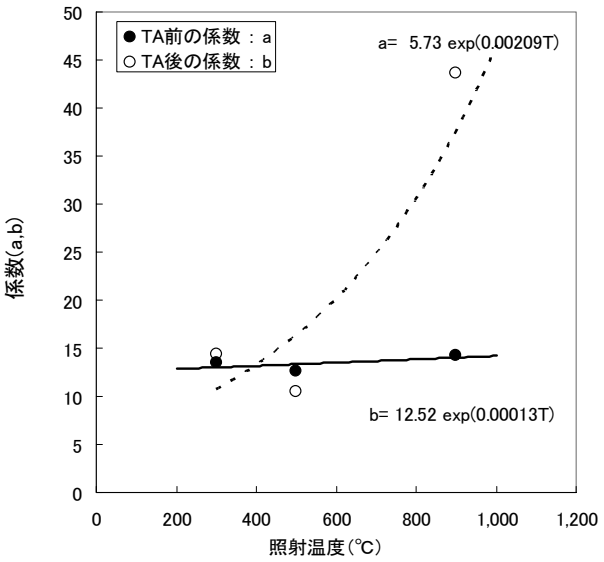


図 6.6 三次照射クリープを考慮した(6.3)、(6.4)式の係数の温度依存性

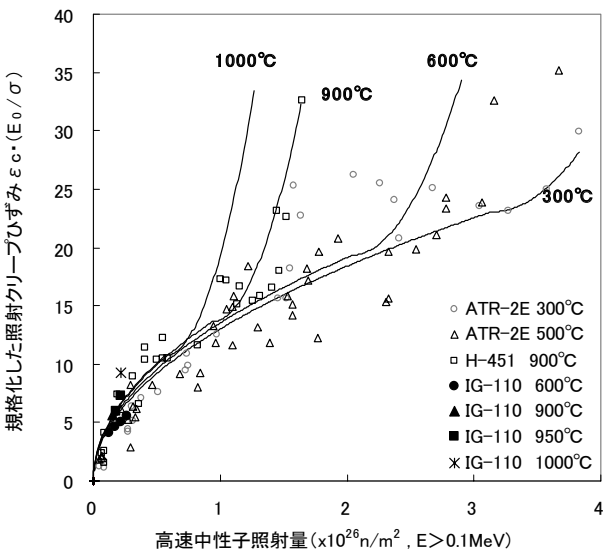
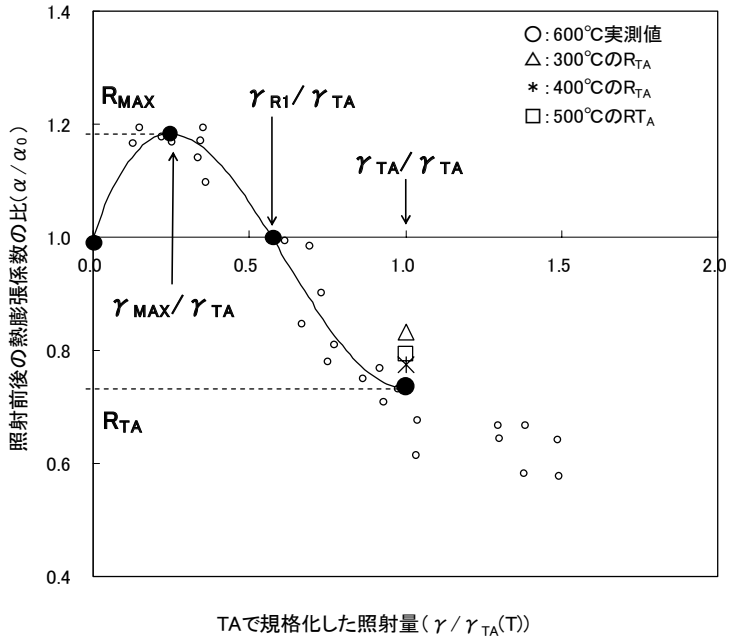


図 6.7 IG-110 黒鉛の三次照射クリープを考慮し、内外挿した照射クリープひずみ



R_{TA} :照射寸法変化の TA 時の熱膨張係数変化（α_{TA}/α_0）

R_{MAX} :極大値を示す熱膨張係数変化（α_{MAX}/α_0）

γ_{TA} :照射寸法変化の TA 時の照射量（x10^{26}n/m^2,E＞0.1MeV）

γ_{MAX} : R_{MAX} の時の照射量（x10^{26}n/m^2,E＞0.1MeV）

γ_{R1} :照射に伴い熱膨張係数変化率が 1 になる照射量（x10^{26}n/m^2,E＞0.1MeV）

図 7.1 ATR-2E 黒鉛の 600℃照射による熱膨張係数の変化（マスターカーブ）

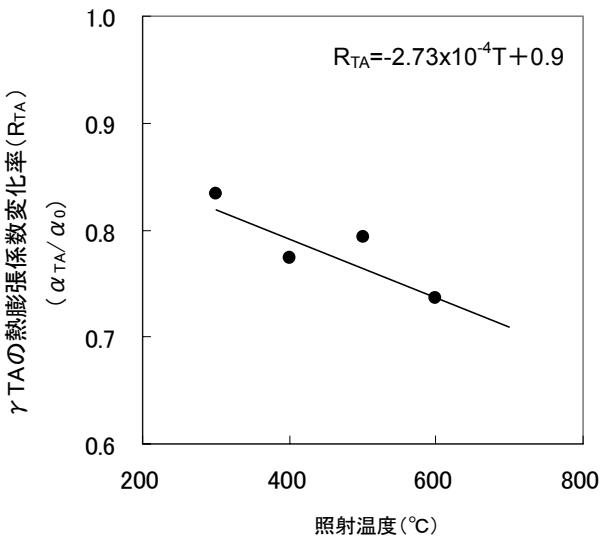


図7.2 R_{TA}の照射温度依存性

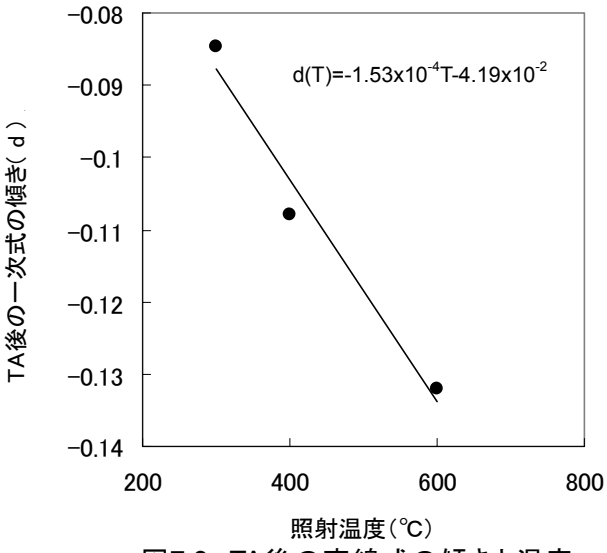
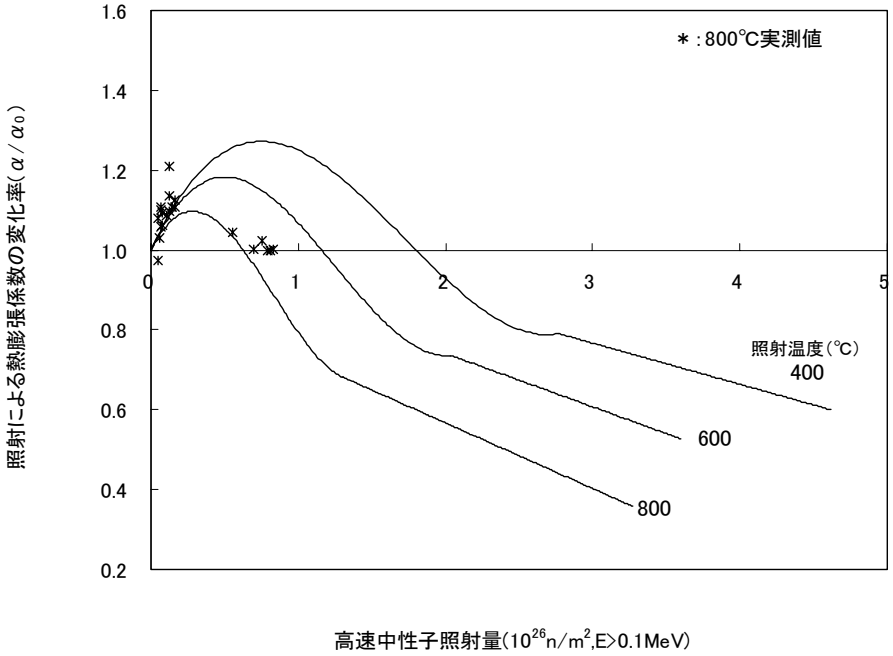


図7.3 TA後の直線式の傾きと温度依存性



（α :照射後の 20℃から照射温度までの平均熱膨張係数）

（α_0 :照射前の 20℃から照射温度までの平均熱膨張係数）

図 7.4 内外挿による IG-110 黒鉛の平均熱膨張係数の照射効果曲線

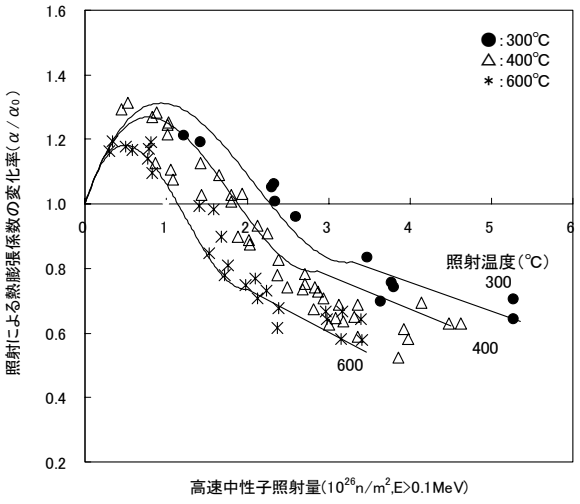


図7.5 ATR-2Eへの外挿法検証

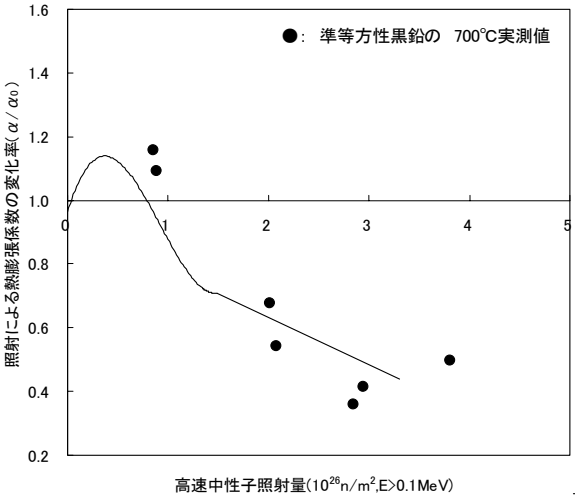


図7.6 準等方性黒鉛への外挿法検証

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(b)	rad	1(b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1(b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s^{-2}
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	m^{-1} kg s^{-2}
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m^2 kg s^{-2}
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m^2 kg s^{-3}
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m^2 kg s^{-3} A^{-1}
静電容量	ファラド	F	C/V	m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m^2 kg s^{-3} A^{-2}
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m^2 kg s^{-2} A^{-1}
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	kg s^{-2} A^{-1}
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m^2 kg s^{-2} A^{-2}
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m^2 s^{-2}
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m^2 s^{-2}
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号radおよびsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m^{-1} kg s^{-1}
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m^2 kg s^{-2}
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m^{-1} s^{-1}=s^{-1}
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m^{-1} s^{-2}=s^{-2}
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s^{-3}
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m^2 kg s^{-2} K^{-1}
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m^2 s^{-2} K^{-1}
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2 s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s^{-3} K^{-1}
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m^{-1} kg s^{-2}
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s^{-3} A^{-1}
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} sA
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} sA
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s^{-2} A^{-2}
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol^{-1}
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2 s^{-3}
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m^4 m^{-2} kg s^{-3}=m^2 kg s^{-3}
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m^2 m^{-2} kg s^{-3}=kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1 bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1 b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7}$ J
ダイン	dyn	$1 dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1 P=1 dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1 St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1 sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1 ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1 G=1Mx\ cm^{-2}=10^{-4}T$
エルステッド(c)	Oe	$1 Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1 Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1 R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています