

JRR-4の取り替え用反射体要素の製作について

平成21年4月6日
原子力規制室

1. 経緯

平成19年12月28日、独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）原子力科学研究所JRR-4において、反射体要素1体の溶接部に割れが確認されたことから、JRR-4で使用中の全ての反射体要素の健全性について調査を行ったところ、全ての反射体要素において、黒鉛反射材が膨張していることが判明し、複数の反射体要素が使用に適さないと判断した。この結果を踏まえ、平成20年10月に、黒鉛反射材の照射成長を考慮した設計による反射体要素の設計及び工事の方法の認可申請が行われた。

2. 原子力機構における原因の調査結果

調査の結果、反射体要素溶接部の割れの主たる原因は、黒鉛反射材の膨張であること及び膨張の原因が高速中性子による照射成長であることが明らかとなった。これまでの設計での反射体要素の耐放射線強度における計算書においては、黒鉛反射材の寸法は、高速中性子の照射量の増大とともに減少するとの知見を採用していたが、今回の調査により、当初の知見よりも低温である照射場においては、高速中性子の照射量の増大とともに黒鉛反射材が膨張することが判明した。

3. 文部科学省における検討方法

本件については、原子力安全技術アドバイザーから専門的意見を聴取しつつ、JRR-4の取替え用反射体要素の製作に係る設計及び工事の方法の認可申請書における耐放射線強度評価のうち、放射線照射による黒鉛成長について、申請者（原子力機構）が提示した評価式の妥当性の検討を行った。

4. 文部科学省における検討結果

検討の結果、当該評価式は妥当なものであるとの結論を得た。検討の過程で、本件は新知見でもあり、温度履歴等の不確定要素もあることから、定期的なサーベイランスを行うことにより、反射体要素の健全性について確認することが必要であるとの見解が示された。これを踏まえ、定期的なサーベイランスの方針について確認し、平成21年2月3日付けで設計及び工事の方法について認可した。

J R R - 4 反射体要素の黒鉛反射材の照射成長に関する調査結果

平成20年12月8日
水戸原子力事務所

1. 研究炉 J R R - 4 における反射体要素の割れの概要

日本原子力研究開発機構の研究炉 J R R - 4 (Japan Research Reactor No. 4) は、軽水を減速材及び冷却材に使用した最大熱出力 3, 5 0 0 k W の原子炉で、燃料領域の周囲には、反射体要素を 3 6 体配置している。反射体要素のうち 3 3 体は、黒鉛を反射材としてアルミニウム合金製の被覆材ケースに内蔵したタイプである。J R R - 4 炉心の概略図を図 1 に示す。

平成 1 9 年 1 2 月 2 8 日、黒鉛反射材を内蔵した反射体要素の 1 体 (普通反射体要素 SD-86-04) の吊手と被覆材ケースの溶接部に割れが確認された。日本原子力研究開発機構が設置した「J R R - 4 反射体要素割れの原因調査アドホック検討会」による原因調査の結果、割れが生じた反射体要素の黒鉛反射材は、高速中性子による照射成長のため長手方向に 7 mm (約 1 %) 膨張していたことが確認された。黒鉛反射材上面とアルミニウム合金の被覆材ケースに設けてある 4 mm のギャップ以上に膨張していたことから、黒鉛反射材が吊手部を押し上げ、被覆材溶接部において延性破断が発生したことが、反射体要素の割れの原因であると判断された。

割れが生じた反射体要素の設計及び工事の方法の認可申請書 (昭和 6 0 年 8 月) において、黒鉛反射材の照射成長については、

- ①黒鉛 IG-11 の照射による寸法変化 (参考 1 : JAERI-M 8068(1979.1)) から、1, 0 0 0 °C 程度の照射温度においては、 $1.5 \sim 2.5 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ の中性子照射量では、寸法変化は収縮するのみ
- ②原子炉級黒鉛の低温照射による寸法変化 (参考データ 2 : JAERI-memo 58-186(1983.5)) から、照射温度が 3 5 3 ~ 4 0 0 °C の範囲では、照射初期に約 0. 0 5 % の膨張が見られ、その後、 $6 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ までの中性子照射量では収縮するとの知見を基に、反射材上面と被覆材ケースに設けてある 4 mm のギャップ以上に膨張しない

と評価していた。

また、平成 1 8 年 3 月の認可申請書では、高温ガス炉炉心黒鉛構造物の構造設計指針 (平成 2 年 1 2 月 科学技術庁原子力安全局) に基づき、6 0 0 ~ 1, 2 0 0 °C の温度範囲で、中性子照射量の増加とともに寸法変化は収縮するのみであることから、照射成長を考慮する必要はないものと評価していた。

今回、約 1 7 0 °C と推定される J R R - 4 の黒鉛反射材の温度条件下において、黒鉛反射材は顕著な膨張を示した。

2. 調査の概要

日本原子力研究開発機構は、JRR-4の使用環境下における黒鉛 IG-110 の照射成長挙動を明確にするため、これまで使用してきた反射体要素を分解し、製作時寸法と調査における寸法測定値から得られる寸法の変化率を求めた。また、高速中性子照射量については、計算コードから得られる高速中性子束に反射体要素が炉心に滞在していた時間を乗じることにより評価している。

黒鉛反射材の寸法測定では、広範囲の高速中性子照射量について照射成長を調査するため、普通反射体要素 1 1 体、大型反射体要素 I 型 1 体及び大型反射体要素 II 型 1 体の合計 1 3 体を対象とした。それぞれ普通反射体要素、大型反射体要素 I 型及び大型反射体要素 II 型の概略図を図 2～4 に示す。

3. 調査方法

3. 1 寸法測定の方法

燃料要素に近い黒鉛反射材の側面では中性子照射量が多く、その反対側面では黒鉛反射材内で中性子が減速、散乱又は吸収されるため照射量が少なくなることから、照射成長量の差が生じることが予想されたため、寸法測定では、黒鉛反射材の長手方向 4 辺及び幅方向 4 辺の測定を行った。

また、反射体要素の中性子照射量は、鉛直方向中心付近において最も多く、その上下では少なくなる分布となるため、黒鉛反射材には長手方向に膨張分布が生じることが予想されたため、幅方向 4 辺の測定においては、長手方向に一定の間隔を定め、1 1 箇所の測定を行った。

黒鉛反射材の全長の平均値は、長手方向 4 辺の測定値を平均して求め、幅の平均値は、1 1 箇所それぞれについて幅方向 4 辺の測定値を平均して求めている。平均値を求めた理由は、JRR-4 炉心燃焼管理に用いている汎用核計算コードシステム SRAC による中性子束の計算において、反射体要素の断面平均値が出力されることから、その計算結果と照射成長の測定結果を対応させるためである。

測定に用いた計器は較正され、長手方向 4 辺の測定にデジタルノギスを、幅方向 4 辺の測定にデジタルマイクロメータを用いている。

反射体要素の黒鉛反射材の寸法測定箇所を図 5 に、長手方向及び幅の寸法測定時における状況を図 6 及び図 7 に示す。

3. 2 高速中性子照射量の計算方法

黒鉛反射材の各寸法測定箇所における高速中性子照射量は、汎用核計算コードシステム SRAC 及びモンテカルロ輸送計算コード MCNP を用いた計算により、原子炉出力 3, 5 0 0 kW 時の高速中性子束 (0. 18~10MeV) を求め、反射体要素が炉心に滞在していた時間 (3, 500kW 換算) を乗じることにより算出した。

SRAC による計算では、幅の平均測定値と高速中性子照射量の断面平均値それぞれの長手方向分布を比較することを目的とし、黒鉛反射材長手方向 1 1 箇所それぞれについて高速中性子束の断面平均値を計算している。

MCNP による計算では、幅方向 4 辺の測定値と側面 4 面の高速中性子照射量それぞれの長手方向分布を比較することを目的とし、黒鉛反射材長手方向 1 1 箇所それぞれについて側面 4 面の高速中性子束を計算した。

4. 調査結果

黒鉛反射材の寸法変化率と高速中性子照射量を比較した結果、いずれの反射体要素においても、黒鉛反射材の幅は高速中性子照射量の増大とともに大きくなることが確認された。普通反射体要素 (SD-85-01) のように、黒鉛反射材の全長がアルミニウム合金の被覆材ケース寸法以下の場合、黒鉛反射材の寸法変化率は、高速中性子照射量の増大とともに線形的に大きくなることが確認された。一方、普通反射体要素 (SD-86-03) のように黒鉛反射材の全長が大きく成長したものほど、黒鉛の寸法変化率と高速中性子照射量の関係にバラツキが多かった。

この原因として、黒鉛反射材とアルミニウム合金の被覆ケースが接触することにより、黒鉛の寸法変化が抑制されたものと考えられる。普通反射体要素 SD-85-01 及び SD-86-03 の黒鉛反射材の寸法変化率と高速中性子照射量の比較を一例として図 8 及び図 9 に示す。

黒鉛反射材の寸法変化率 (幅の平均値) と高速中性子照射量 (断面平均値) の関係の評価した結果、高速中性子照射量 $2.5 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ 以下において、照射成長係数 (単位高速中性子照射量あたりの寸法変化率) は最大 $7.13 \times 10^{-25} \% \text{m}^2/\text{n}$ 、最低 $4.21 \times 10^{-25} \% \text{m}^2/\text{n}$ 、平均 $5.71 \times 10^{-25} \% \text{m}^2/\text{n}$ であった。高速中性子照射による黒鉛反射材の寸法変化率を図 1 0 に示す。

5. まとめ

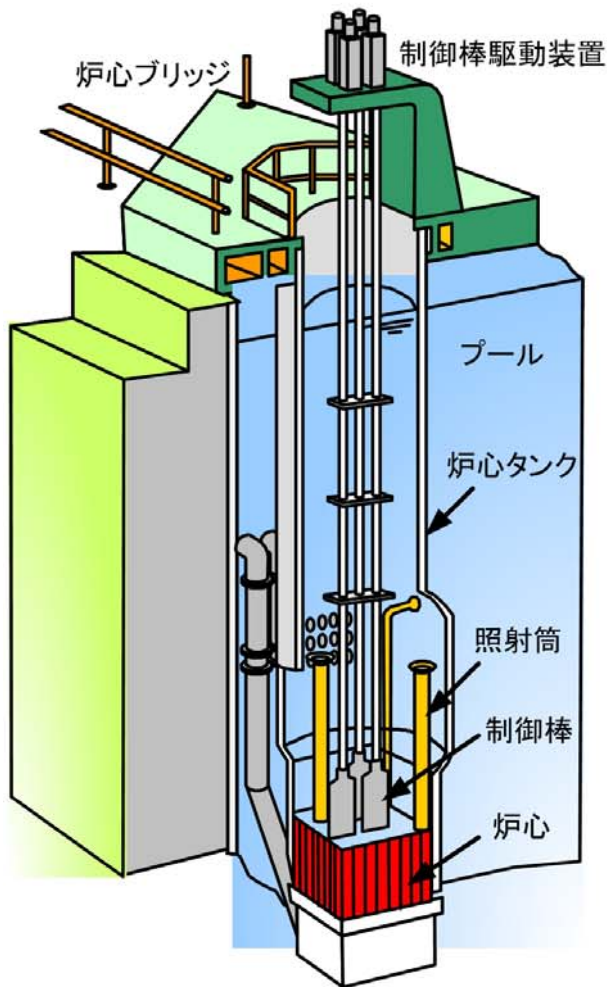
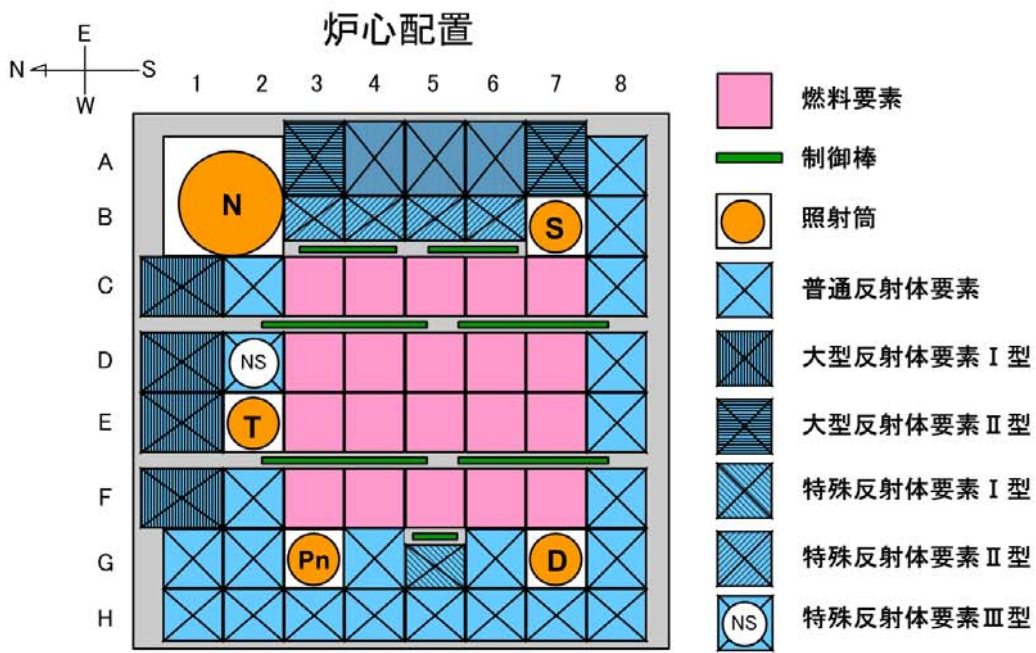
JRR-4 使用環境下における黒鉛 IG-110 の照射成長挙動として、黒鉛反射材の照射成長による寸法変化率と高速中性子照射量の関係が示された。取り替え用反射体要素の製作に係る設計及び工事の方法の認可申請書（平成20年10月）においては、照射成長係数として最大値 $7.13 \times 10^{-25} \% \text{m}^2/\text{n}$ を採用し、次式により黒鉛反射材の照射成長を安全側に評価した設計であるとしている。

$$w = \left\{ 1 + 7.13 \times 10^{-27} \Phi_{\max} \right\} \cdot w_0$$

$$L = \int_0^{L_0} \left\{ 1 + 7.13 \times 10^{-27} \Phi(z) \right\} dz$$

w	: 照射成長後の反射材幅の最大寸法	[mm]
L	: 照射成長後の反射材長さの最大寸法	[mm]
w_0	: 常温(20°C)における未照射の反射材幅の寸法	[mm]
L_0	: 反射材の元の長さ	[mm]
Φ_{\max}	: 反射材断面あたりの平均高速中性子照射量の最大値	[n/m ²]
$\Phi(z)$: 反射材断面あたりの平均高速中性子照射量の軸方向分布	[n/m ²]

また、大型反射体要素 I 型及び II 型については、照射成長係数の最大値 $7.13 \times 10^{-25} \% \text{m}^2/\text{n}$ を用いて黒鉛反射材の反りを評価した設計であるとしている。



反射体要素概略図
及び面の定義

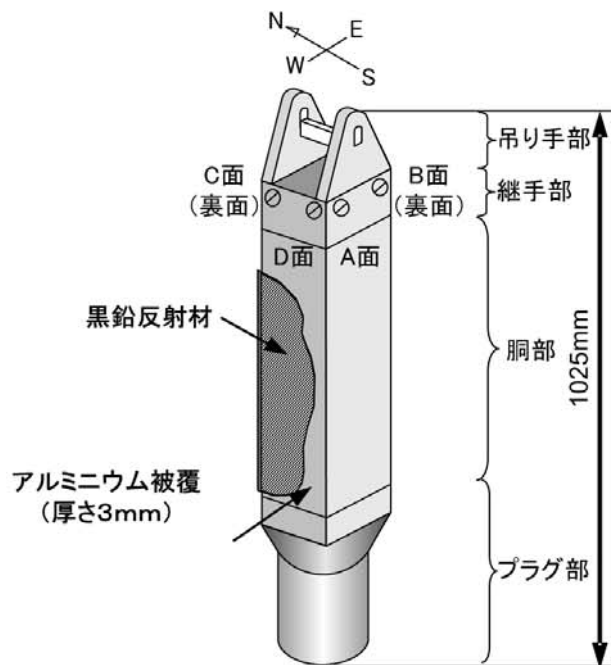


図1 JRR-4 炉心の概略図

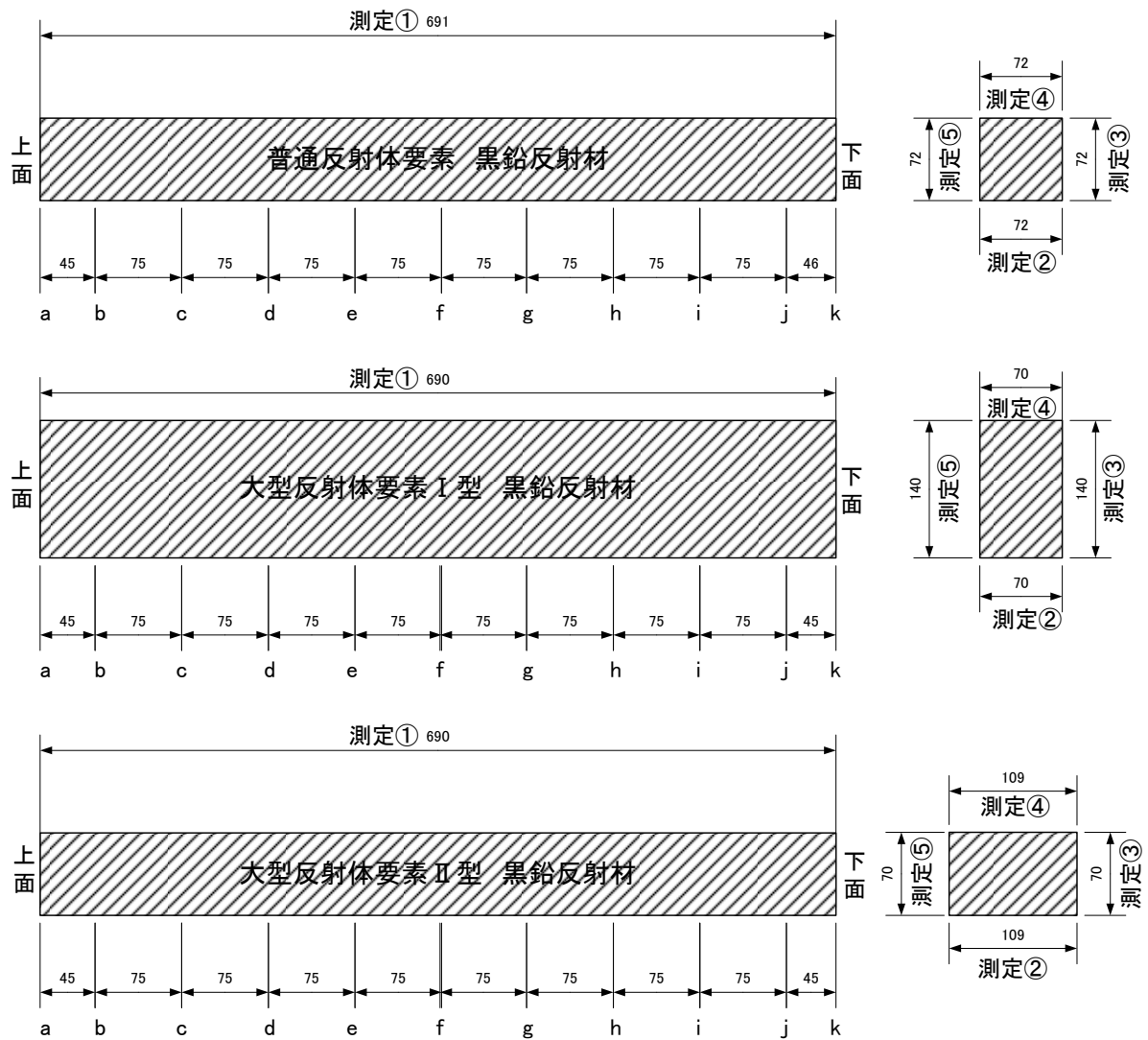
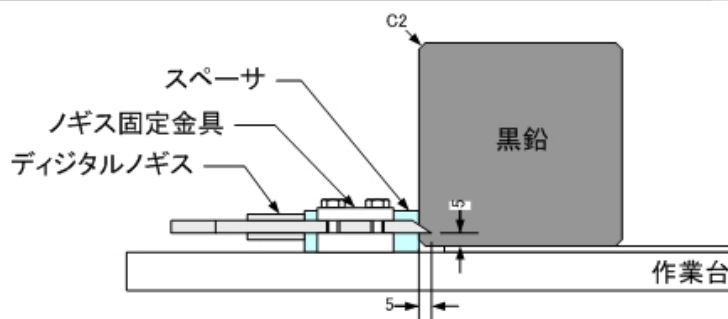
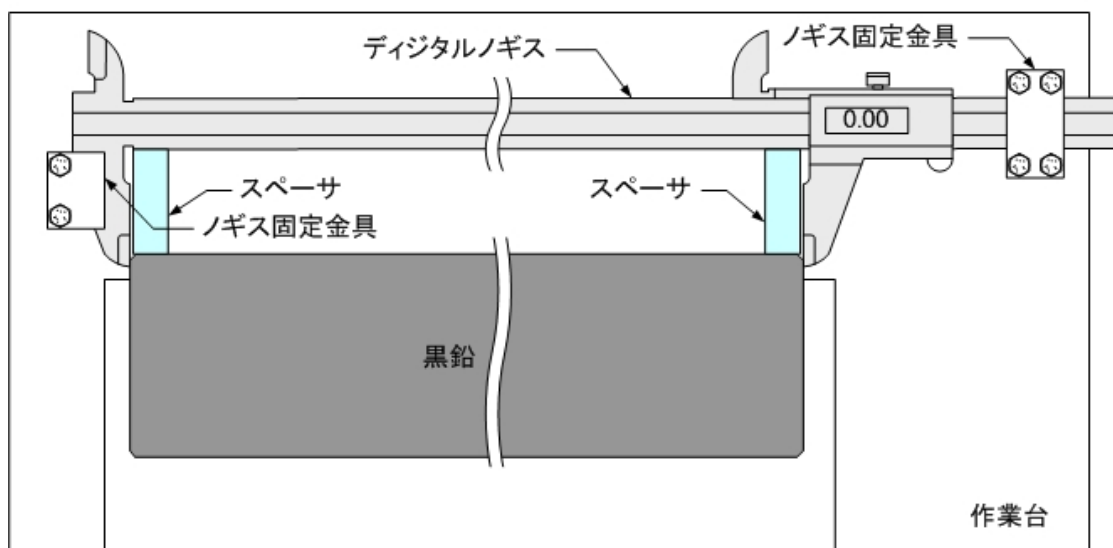
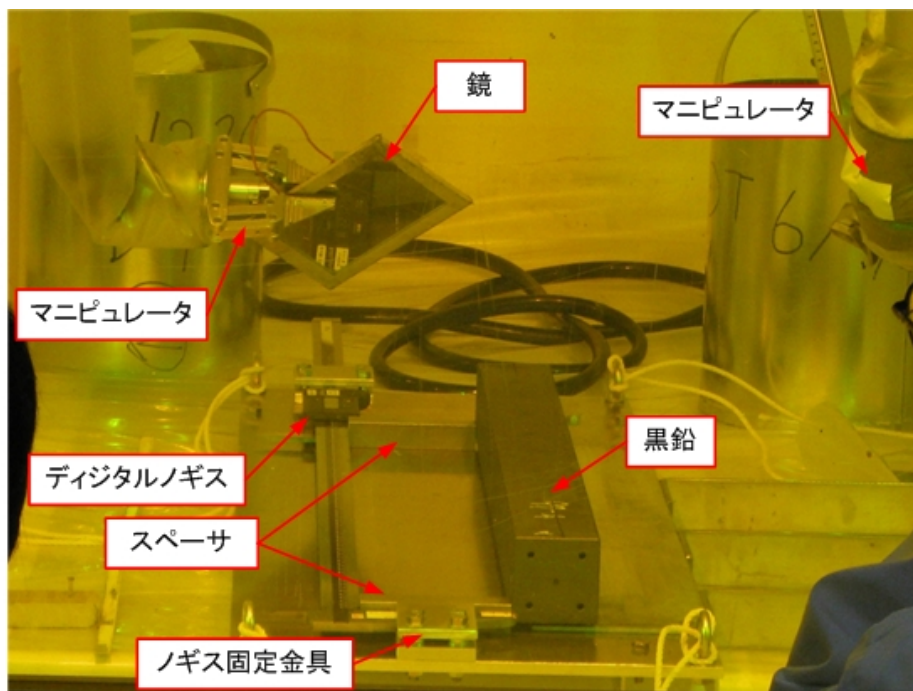
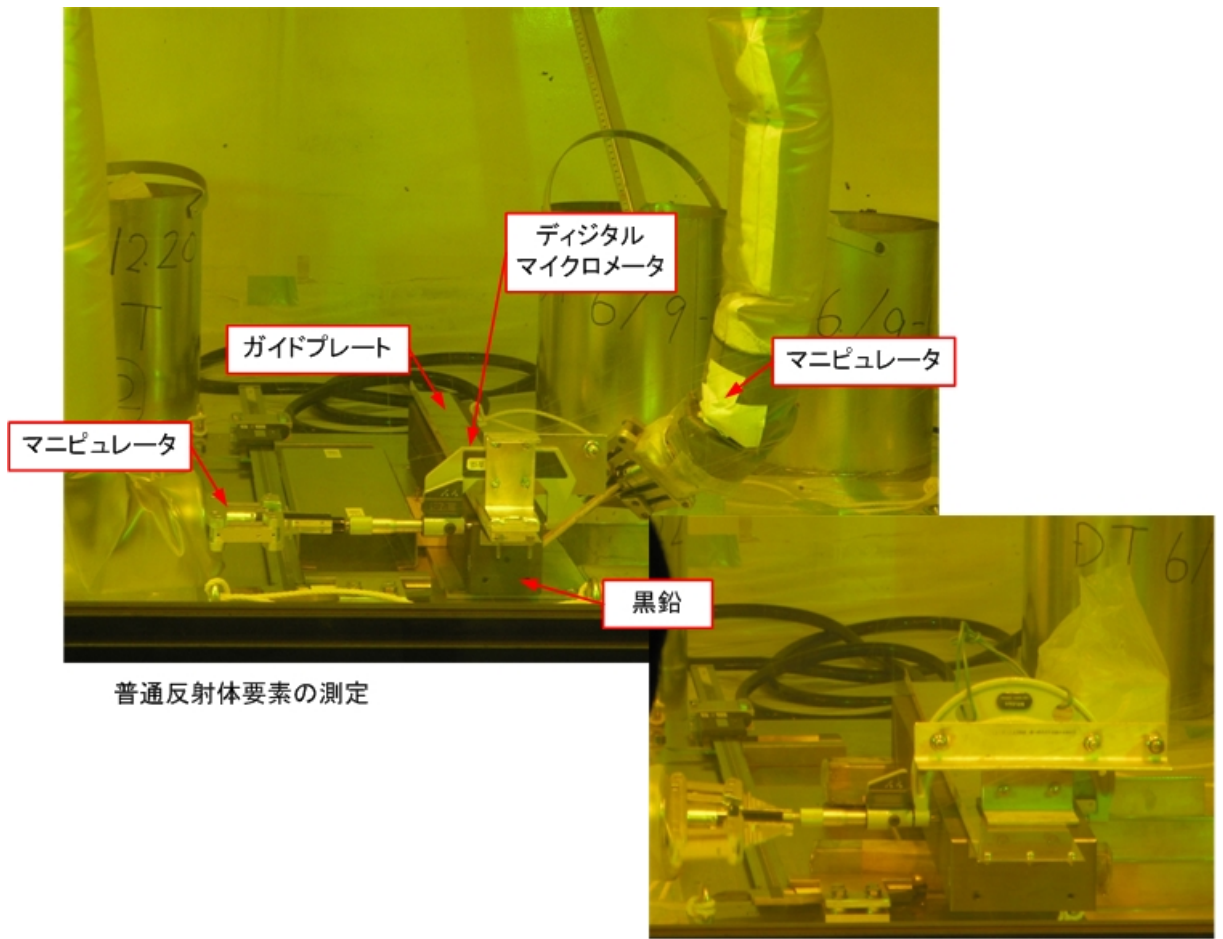


図5 反射体要素黒鉛反射材の寸法測定箇所



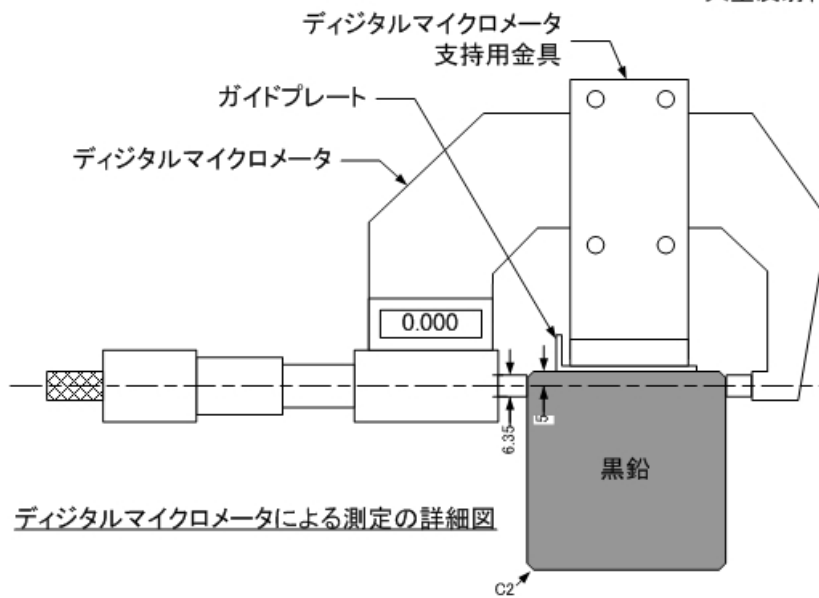
デジタルノギスによる測定の詳細図

図6 長手方向の寸法測定時における状況



普通反射体要素の測定

大型反射体要素 I 型の測定



デジタルマイクロメータによる測定の詳細図

図 7 幅の寸法測定時における状況

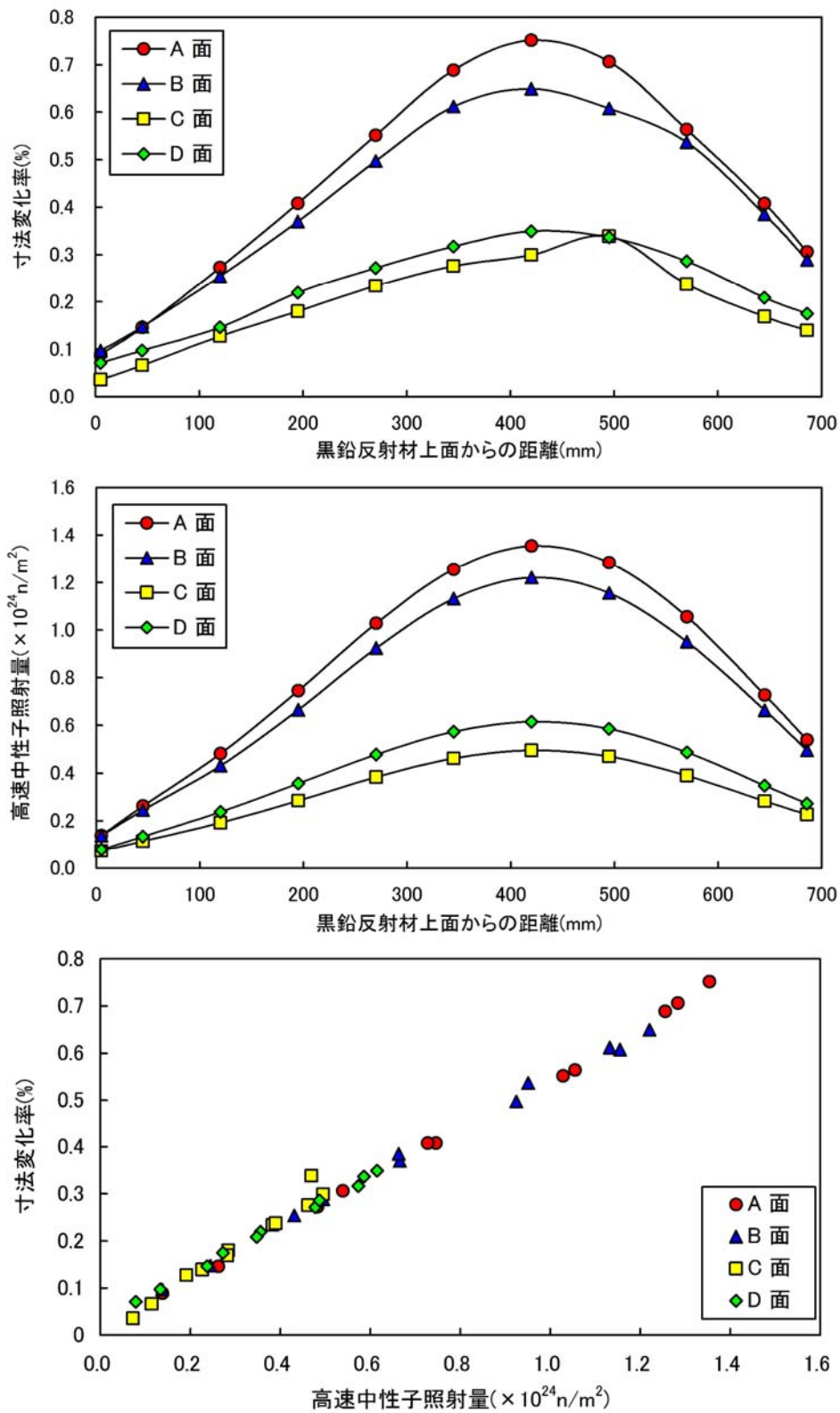


図8 黒鉛反射材の寸法変化率と高速中性子照射量の比較
(普通反射体要素 SD-85-01)

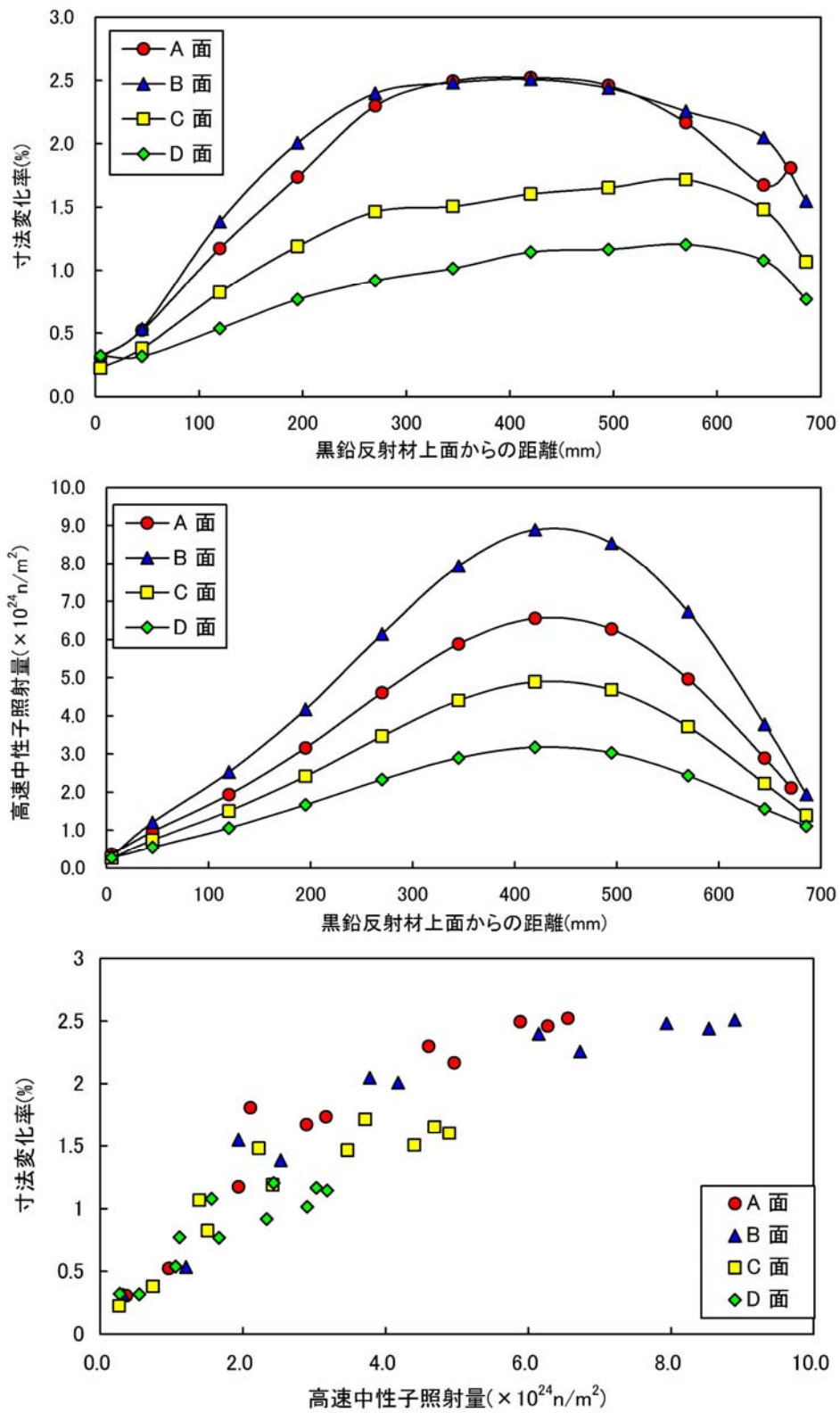


図9 黒鉛反射材の寸法変化率と高速中性子照射量の比較
(普通反射体要素 SD-86-03)

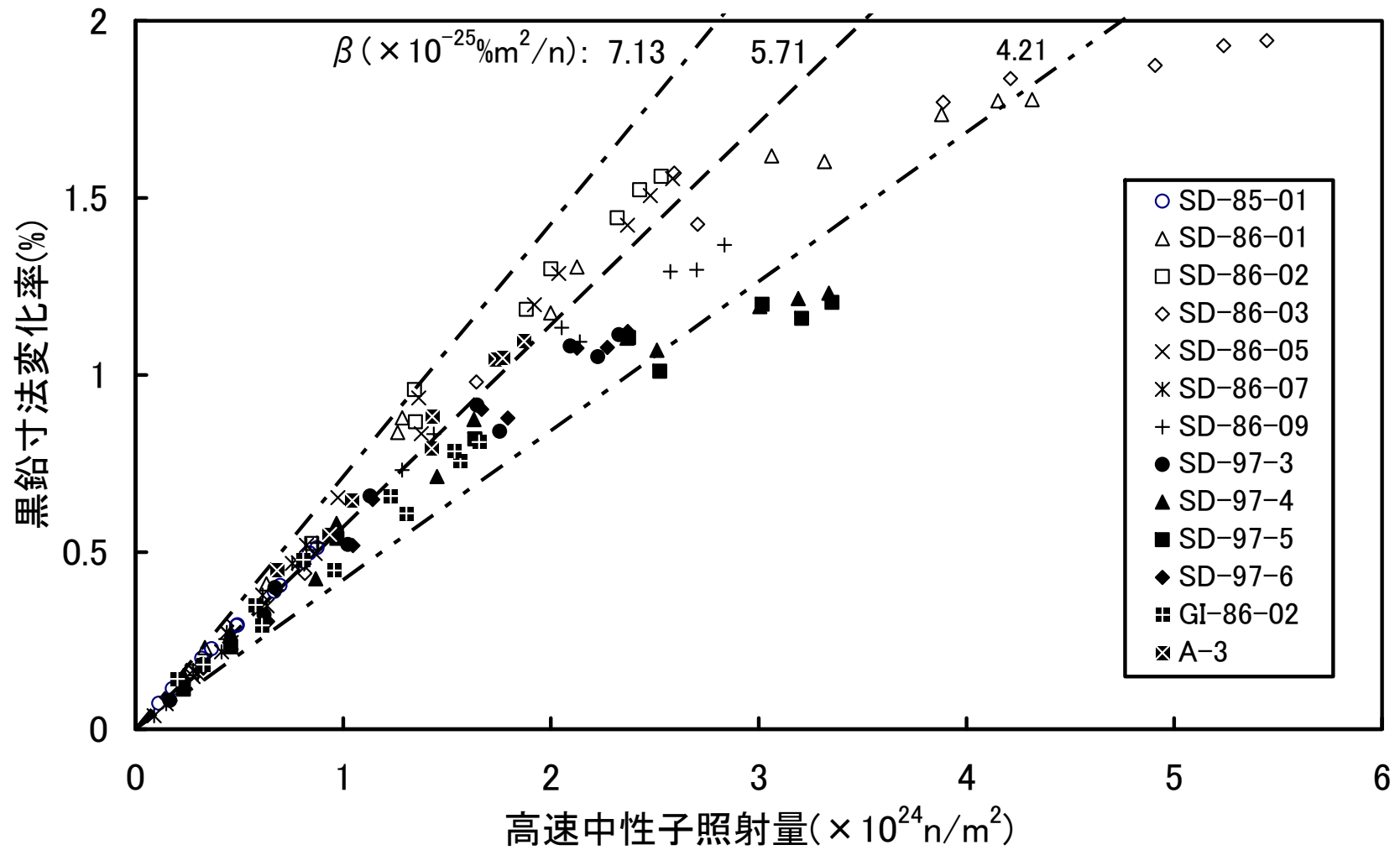
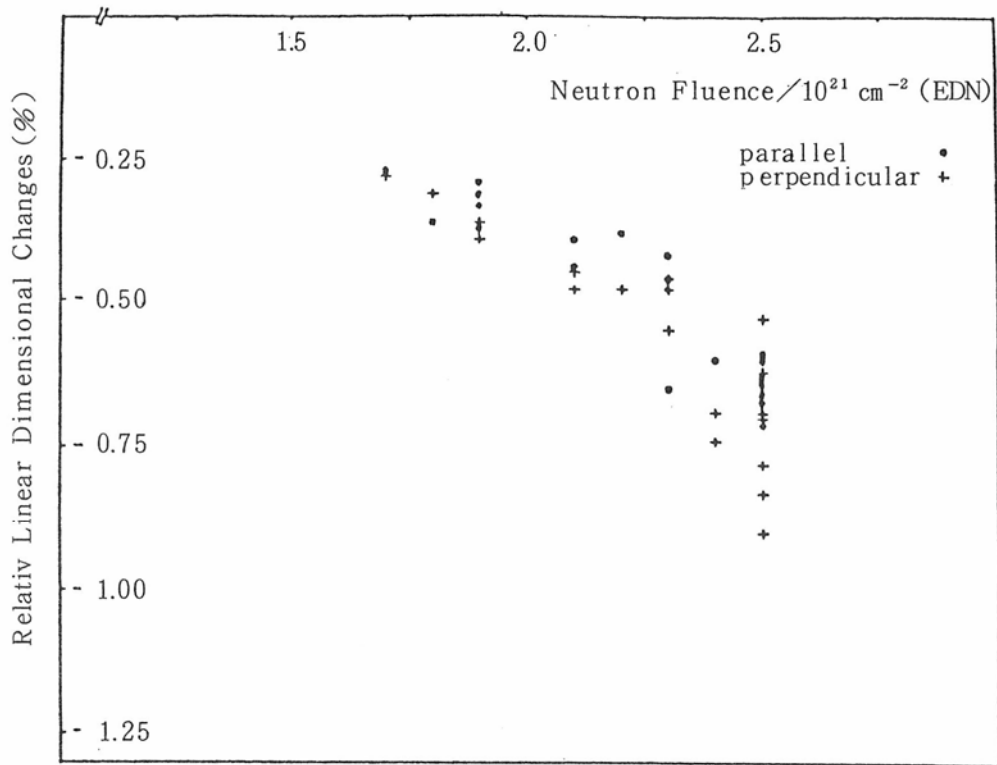
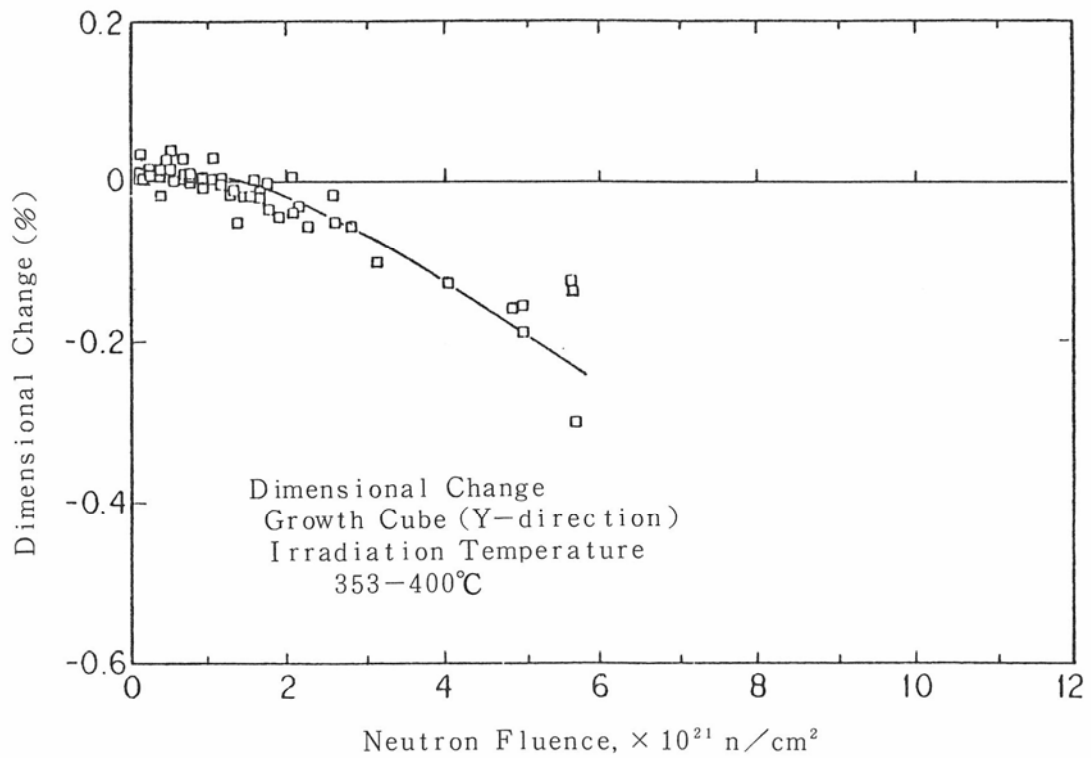


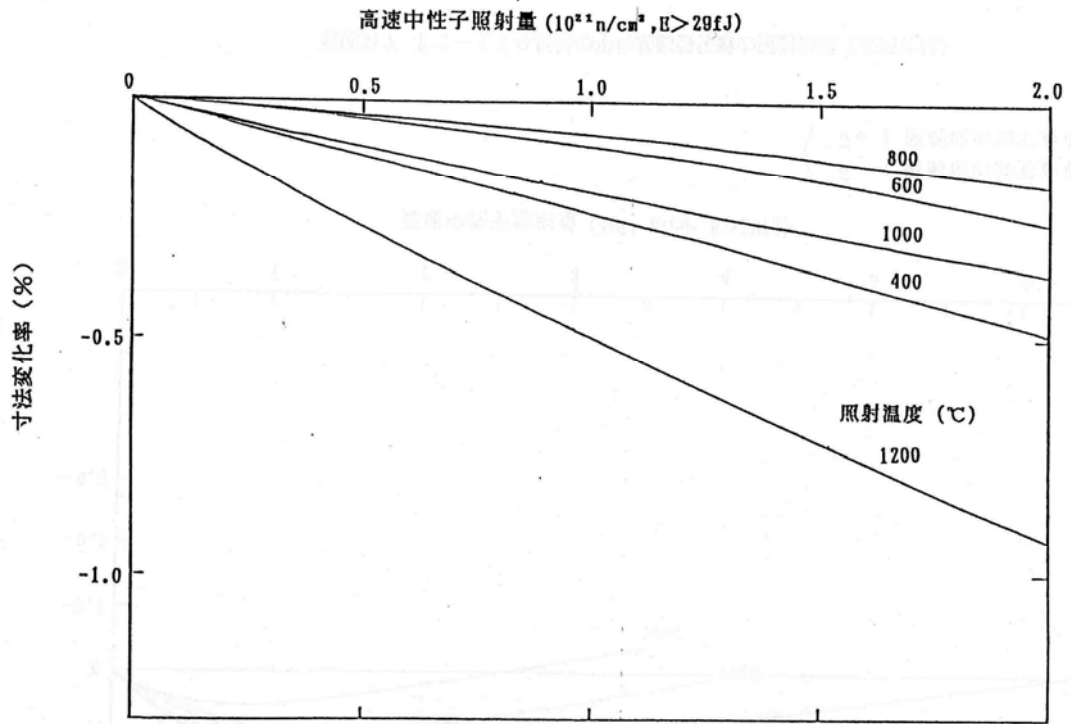
図10 高速中性子照射による黒鉛反射材の寸法変化率 (図中の β は照射成長係数を示す。)



参考図 IG-11 の照射成長



参考図 原子炉級黒鉛の低温照射による照射成長



参考図 IG-110 の照射による寸法変化率
(400°Cは内挿による)