

# 高速炉構造材料の照射損傷管理技術に関する研究開発

R & D on Irradiation Damage Management Technology for FBR Structural Materials

原子力機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA	Member
原子力機構	永江 勇二	Yuji NAGAE	Member
原子力機構	若井 栄一	Eiichi WAKAI	Non Member
原子力機構	青砥 紀身	Kazumi AOTO	Member

Proper management of neutron irradiation damage on structural materials is important to ensure the health of long-life fast breeder reactor (FBR) plants. Therefore, the effective index for irradiation damage or the combination of those should be developed. In this study, the effects of dose, helium, and the ratio of helium to dose on tensile and creep properties of FBR grade type 316 stainless steel were investigated in the assumed irradiation damage range of FBR structural materials, that is, up to about 1 displacement per atom for dose and up to about 30 appm for helium. As result, it was shown that dose is the most promising. In addition, a nondestructive evaluation method of dose using a vibrating sample magnetometer is also introduced.

**Keywords:** Dose, Helium, The ratio of helium to dose, Tensile, Creep, Nondestructive evaluation

## 1. 緒言

原子炉容器や炉内構造物等のように比較的低い放射線環境下に長時間継続的にさらされ、かつ寿命中の交換が困難である鉄鋼材料構造物に関して、機械特性に与える照射環境効果を適切に把握し管理することは、合理的なプラントの設計や建設、運転開始後の経年評価等の健全性確保のために必須である。照射環境効果を評価するための指標としては、これまでの研究により、弾き出し損傷量や He 生成量、及び両者の比 (He/dpa) が有望であることが知られている。

そこで本研究では、次世代高速炉の候補構造材料のひとつである高速炉用 SUS316 オーステナイト系ステンレス鋼 (316FR) を対象に、上記の候補指標の有効性を検討した。想定適用範囲は、弾き出し損傷量及び He 生成量についてそれぞれ約 1 dpa、約 30 appm までとした。高速炉「常陽」及び熱中性子炉「JRR-3M」を用いて中性子照射試験を行い、引張試験、クリープ試験に供した。異なる種類の原子炉を利用することにより、単一の炉では得ることが難しい照射損傷範囲の試料を得ることができる。さらに、

本研究では各炉での照射に加えて、両炉を用いた組合せ照射も実施した。

また、運転開始後の照射損傷量を非破壊で評価するために提案した遠隔操作式振動試料型磁力計を用いた手法についても紹介する。

## 2. 実験方法

### 2.1 中性子照射試験

中性子照射試験は、日本原子力研究開発機構の高速実験炉「常陽」(高速炉) 及び研究用原子炉「JRR-3M」(熱中性子炉) を用いて、各炉での単独照射試験及び両炉を用いて世界的にも希少である組合せ照射を実施した。照射試験の雰囲気は、不活性ガス (Ar, He) 中とした。高速炉での照射では、熱中性子炉での照射に比べて多くの弾き出し損傷が導入され、一方、熱中性子炉での照射では、より多くの He が生成されるため、複数の炉を用いた照射や組合せ照射を実施することにより、より広い範囲での照射損傷指標の検討が可能になる。

供試材には、316FR を用いた。また、熱中性子炉である「JRR-3」での照射の際に  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  反応を利用して、短時間でより多くの He を発生させるために、 $^{10}\text{B}$  を添加した 316FR(316FR+B) も作製し、照射試験に供した。両鋼の化学組成を表 1 に示す。316FR については 1050°C で、316FR+B については 1010°C で 30 分間保持した後、水冷することにより、溶体化処理を行った。試験片形状を図 1 に示す。引

連絡先: 高屋 茂, 〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002, (独) 日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門 構造材料評価グループ, 電話: 029-267-4141, E-mail: takaya.shigeru@jaea.go.jp

Table 1 Chemical compositions (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	N	B (ppm)
316FR	0.01	0.59	0.84	0.026	0.003	0.26	11.19	16.87	2.23	0.08	0.08	6
316FR+B	0.01	0.58	0.79	0.020	0.003	0.28	11.02	16.63	2.08	0.008	0.076	23*

\*: <sup>10</sup>B with 99% purity was used.

張試験、クリープ試験には SS-3 試験片を、照射損傷の非破壊評価手法の開発を目的とした磁気測定には短冊状試験片を用いた。

照射後に、照射損傷量及び照射温度を評価した結果、「常陽」での照射については、弾き出し損傷量、He 生成量、照射温度の範囲は、それぞれ、0.8~1.7 dpa、0.3~0.9 appm、487~565°Cであった。また「JRR-3M」での照射については、それぞれ 0.1~0.2 dpa、He 生成量：1.7~35 appm、441~579°Cであった。

中性子照射試験のより詳細については、松井らにより報告されている[1]。

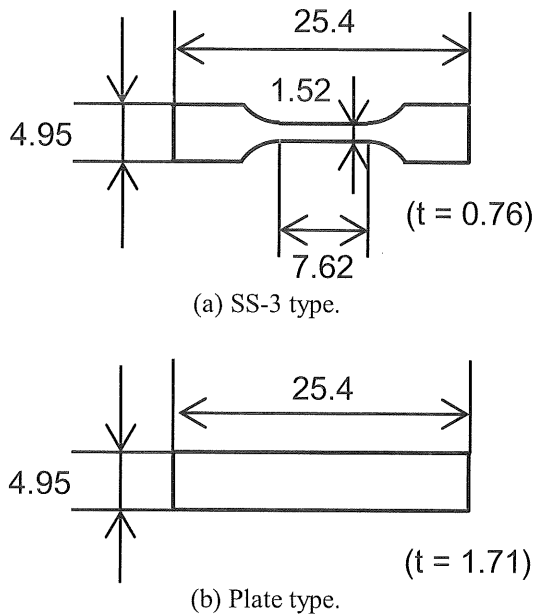


Fig.1 Dimensions of the samples. (unit: mm)

## 2.2 照射後試験

引張試験及びクリープ試験を実施した。試験温度はいずれも 550°Cとし、真空中 ( $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$  Pa) で実施した。引張試験における引張速度は 0.2 mm/min とした。

本研究では、引張試験、クリープ試験ともに、図 1(a)に示す微小試験片 (SS-3 試験片) を用いた。加藤らは、316FR の未照射材について、SS-3 試験片で得られた引張特性及びクリープ特性と、JIS 標準試験片で得られたそれらを比較し、両者に有意な差が認められないことを報告している[2]。

さらに、新たに開発した遠隔操作式振動試料型磁力計[3]を用いて照射材の磁化曲線を測定した[4]。図 1(b)に示す短冊状試験片を、照射後、6.5 mm の長さに切断し、測定に供した。印加磁場方向は試験片の長手方向とし、最大印加磁場は約  $0.5/\mu_0$  A/m とした。

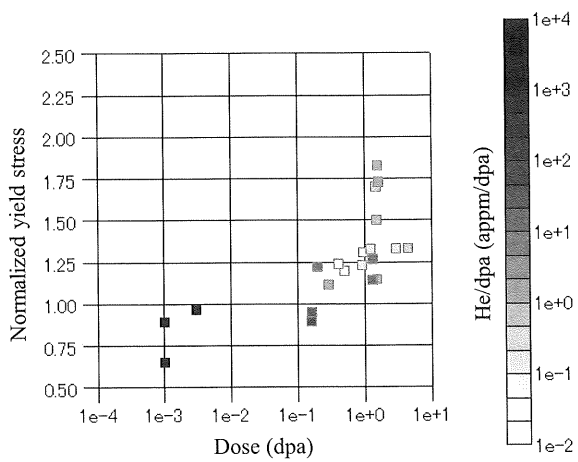
## 3. 照射損傷評価指標の検討

図 2 に、弾き出し損傷量と 550°Cでの引張試験結果 (未照射材の結果で規格化した降伏応力及び破断伸び) の関係を示す。なお、図には、今回の照射後試験結果の他に、原子力機構の既存照射後試験結果も含めた。また、図中プロット点の濃淡は、He/dpa に対応している。この図から、弾き出し損傷量の増加とともに、降伏応力が増加し、破断伸びが低下する傾向が認められ、弾き出し損傷量が引張特性への照射環境効果を評価するための指標として有効であることがわかる。一方、He/dpa については、仮に指標として有効であるならば、同一弾き出し損傷量で比較した場合、He/dpa に従ってデータが分布することが予想されるが、データのばらつきが見られる 1 dpa 付近に注目しても、そのような傾向は認められなかった。このことから、引張特性については、He/dpa を考慮する必要はないことが分かる。

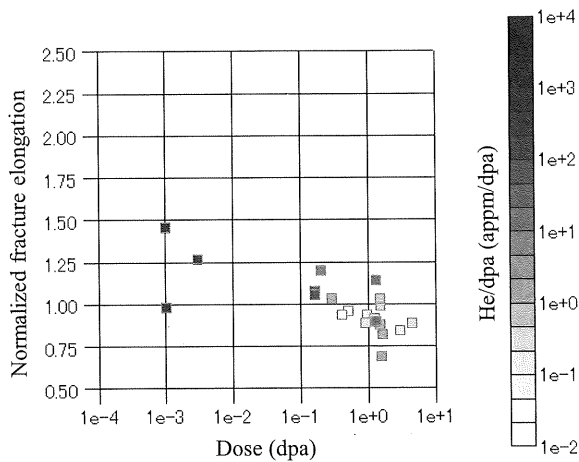
引張特性に与える He 単独の影響については、長谷川らにより検討されている[4, 5]。長谷川らは、316FR について、AVF サイクロトロンを用いて、約 550°Cで、50 MeV He<sup>2+</sup>イオンを最大 50 appm まで注入した後、注入温度と同じ 550°Cで引張試験を行い、He 注入量が機械特性に与える影響を調べている[5]。その際の弾き出し損傷量は約 0.01 dpa 以下である。その結果、He 注入量が 50 appm までの範囲では、強度、延性ともに、He 注入による顕著な変化は認められないことがわかった。長谷川らは、また、約 550°Cで 10 appm まで He を注入した 316FR の透過型電子顕微鏡観察も実施しており、マトリックス中にも結晶粒界においても、He バブルが観察されなかったことを報告している[4]。このように、He 生成量も、引張特性の照射環境効果を評価する上で考慮する必要が無いことが分かる。

以上のことから、想定適用範囲内においては、弾き出し損傷量が、引張特性への照射環境効果を評価するために有効な照射損傷指標であることが分かった。

次に、クリープ破断寿命の照射環境効果評価に有効な照射損傷指標について検討する。図 3 に、クリ



(a) Normalized yield stress.



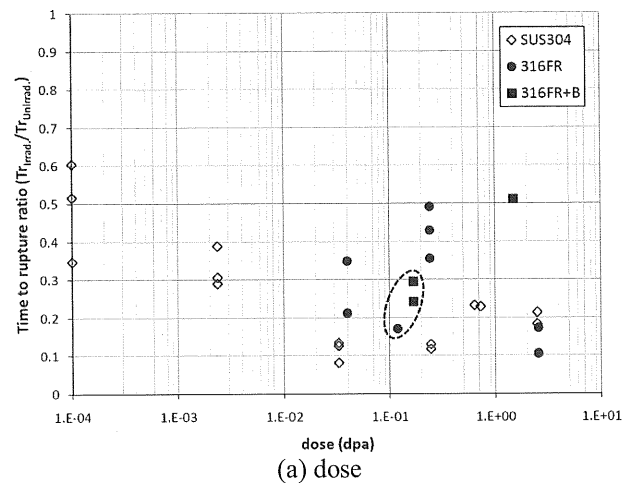
(b) Normalized fracture elongation

Fig. 2 Relationships between dose and tensile properties of 316FR at 550°C.

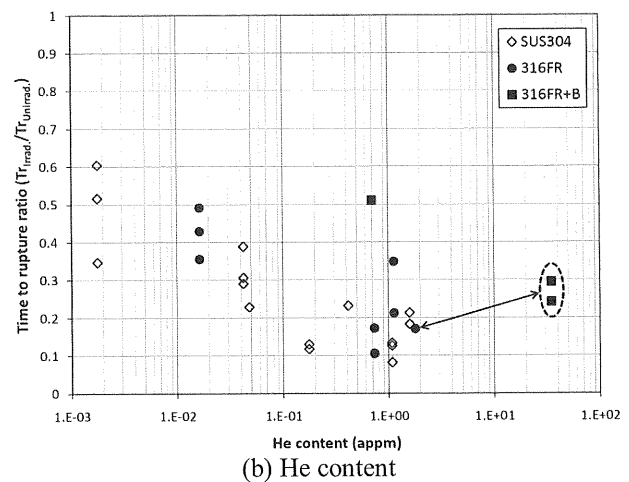
クリープ破断寿命比と弾き出し損傷量及び He 生成量との関係を示す。なお、クリープ破断寿命比とは、照射材のクリープ破断寿命と、同じ負荷応力での未照射材のクリープ破断寿命の比のことである。また、図には、316FR と同じオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 鋼に関するデータを含む原子力機構の既存照射後試験データも加えた。図 3 から、SUS304 に比べて、316FR の方が、照射によるクリープ寿命の低下程度が小さいことがわかる。また、弾き出し損傷量、He 生成量のいずれについても、値の増加とともに、クリープ破断寿命比が低下する傾向にあるように思われる。しかしこれは、多くのデータが「常陽」での照射試料を用いて得られているために He/dpa がほぼ等しく、弾き出し損傷量と He 生成量の効果を明確に分離できていないことが影響していると考えられる。そこで、図中点線の囲みで示した弾き出し損傷量がほぼ等しく、He 生成量が大きく異なる 316FR と 316FR+B の結果に着目すると、He 生成量が 1 桁以上異なるにも関わらず、クリ

ープ破断寿命比に大きな違いはないことが分かる。上述の長谷川らの研究結果からも、約 30 appm までとした今回の想定適用範囲内においては、He 生成量単独では機械特性に顕著な影響を及ぼさないと予想される。さらに He/dpa についても、クリープ破断寿命比との関係を検討したが、特に相関性は認められなかった。

以上の結果から、クリープ破断寿命についても、弾き出し損傷量が約 1 dpa まで、He 生成量が約 30 appm までとした想定適用範囲内であれば、弾き出し損傷量を用いて評価できることが分かった。ここで、一般的には、クリープ特性については He 生成量が影響すると考えられている。今回の検討では、単純な総量としての He 生成量とクリープ破断寿命の間に直接的な相関を求めることは困難であった。しかしながら、今後、例えば、結晶粒界に偏析する He 量等のような実効的な He 量との相関を検討する必要があると考えられる。



(a) dose



(b) He content

Fig. 3 Relationships between irradiation damage indexes and time to rupture ratio.

## 4. 損傷指標に基づく照射損傷の非破壊評価技術の開発

3.での検討から、照射損傷指標として弾き出し損傷量が有効であることが分かった。そこで、運転開始後の弾き出し損傷量の進行監視技術を開発することを目的として、遠隔操作式振動試料型磁力計を開発した[3]。本装置を用いることにより、照射材の磁化曲線を簡便に測定することが可能であり、磁化曲線から保磁力等各種磁化特性を評価することができる。

本研究で中性子照射した 316FR 及び 316FR+B の磁化曲線を測定し、各種磁化特性と弾き出し損傷量の関係を調べたところ、特に、最大印加磁場での磁化（飽和磁化相当値）と保磁力が弾き出し損傷量との相関が高かった[4]。例として、保磁力と弾き出し損傷量の関係を図 4 に示す。弾き出し損傷量とともに、保磁力が低下する傾向が認められる。

今後、データの拡充が求められるものの、遠隔操作式振動試料型磁力計を用いてサーベイランス試験片等の磁化曲線を測定し、保磁力等の磁化特性を評価することによって、損傷指標として有望である弾き出し損傷量の進行を監視できる可能性がある。

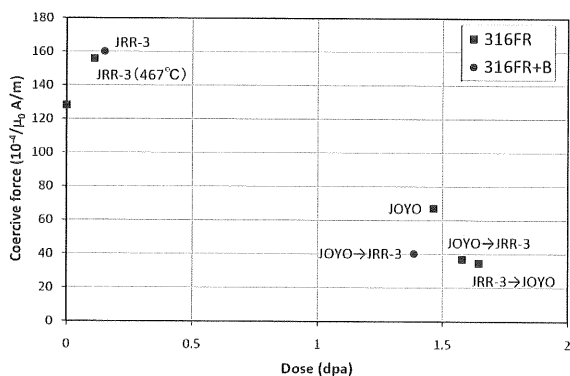


Fig. 4 Relationship between dose and coercive force[4].

## 5. 結言

次世代高速炉の候補構造材料である 316FR を対象に、照射損傷評価の候補指標である弾き出し損傷量、He 生成量及び両者の比について、中性子照射による引張特性及びクリープ特性変化との関係を調べ、次世代高速炉構造材料の照射損傷評価に有効な指標を検討した。想定適用範囲は、弾き出し損傷量及び He 生成量についてそれぞれ約 1 dpa、約 30 appm までの範囲とした。

「常陽」及び「JRR-3M」の各炉での照射及び両炉を用いた組合せ照射を実施し、引張試験及びクリープ試験に供した。原子力機構の既存照射後試験データを合わせた検討の結果、想定適用範囲内では、He

生成量及び He/dpa は、引張特性やクリープ特性に有意な影響を与えないと考えられること、一方、弾き出し損傷量については、その増加とともに降伏応力の増加、引張破断伸びの低下、クリープ寿命の低下が認められることがわかった。以上の検討の結果から、候補指標のうち、弾き出し損傷量が、照射損傷指標として最も有効であると考えられる。

さらに、遠隔操作式振動試料型磁力計を用いて評価した保磁力と弾き出し損傷量の関係を紹介し、サーベイランス試験片等を用いて、実機の弾き出し損傷量の進行を監視できる可能性を示した。

## 謝辞

本報告の内容は、旧電源開発促進対策特別会計法及び特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施した平成 18 年度、平成 19 年度及び平成 20 年度「長寿命プラント照射損傷管理技術に関する研究開発」の成果です。

## 参考文献

- [1] 松井義典ら，“実験炉組合せ照射（JRR-3⇔常陽）及びホット施設（WASTEF, JMTR ホットラボ、MMF, FMF）の作業計画と作業報告”，JAEA-Technology 2009-072 (2010).
- [2] 加藤章一，若井栄一，吉田英一，土岐沢耕一，福島文欧，“長寿命プラント照射損傷管理技術に関する研究開発 (5)微小試験片による未照射材料の強度試験”，日本原子力学会 2007 年秋の大会, G12 (2007).
- [3] 高屋茂，山県一郎，市川正一，永江勇二，若井栄一，青砥紀身，“照射損傷評価のための遠隔操作式振動試料型磁力計の開発”，保全学誌, 9[1], 51-56 (2010).
- [4] S. Takaya, I. Yamagata, S. Ichikawa, Y. Nagae, K. Aoto, “Nondestructive Evaluation of Neutron Irradiation Damage on Type 316 Stainless Steel by Measurement of Magnetic Properties”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, accepted.
- [5] A. Hasegawa, S. Nogami, M. Sato, E. Wakai, K. Aoto, “Evaluation of Helium Effect on Candidate Structural Materials for Next Generation Long-life Nuclear Plant”, CYRIC (Cyclotron and Radioisotope Center) Annual Report 2007, 25-29 (2008).
- [6] A. Hasegawa, S. Nogami, M. Sato, E. Wakai, K. Aoto, “Evaluation of Helium Effect on Candidate Structural Materials for Next Generation Long-life Nuclear Plant”, CYRIC Annual Report 2008, 47-52 (2009).