

# JRR-4 反射体要素の割れ事象の発生及び今後の保全

## Investigation of the Crack in a Reflector Element of JRR-4 and Future Maintenance

原子力研究開発機構 坂田 茉美 Mami SAKATA  
原子力研究開発機構 八木 理公 Masahiro YAGI  
原子力研究開発機構 堀口 洋徳 Hironori HORIGUCHI  
原子力研究開発機構 平根 伸彦 Nobuhiko HIRANE

A crack was found on a weld area of one reflector element in JRR-4 on December 28, 2007. The following examinations were carried out, visual examination, dimensional examination, fractography examination and so on. It was concluded that the main cause of the crack is the neutron-induced swelling of graphite in the reflector element. We tested radiographically the other reflector elements. As the result, we determined that many of them were not in a suitable state to be used because of swelling of graphite. Based on the relation between the irradiation dose and swelling rate, the design of the new reflector elements has been carried out. We decided to test radiographically all the new reflector elements as the future maintenance.

**Keywords:** Research Reactor, Radiographic Testing, Reflector, Graphite, Irradiation Growth, JRR-4

### 1. 緒言

JRR-4 (Japan Research Reactor No.4) において、平成 19 年 (2007 年) 12 月 28 日に、1 体の反射体要素の溶接部に割れが確認された。このため、JRR-4 では平成 20 年 (2008 年) 1 月 8 日から予定していた運転を延期して、割れの原因調査を行った。割れの原因調査の進捗により、内蔵された黒鉛反射材が設計段階の予想を上回り膨張したことが、割れの主たる要因と推定されたため、割れの生じていない他の反射体要素について放射線透過試験を実施し、その結果を今後の反射体に関する保全に反映させることとした。

本報告は、JRR-4 反射体要素の割れ事象の原因調査と、今後の反射体要素における管理についてまとめたものである。

### 2. 概要

#### 2.1 JRR-4 の概要

JRR-4 は、濃縮ウラン軽水減速冷却スイミングプール型の熱出力 3,500kW の研究用原子炉である。JRR-4

は、中出力炉の特性を活かした小回りの利くディリー運転形態 (1 日の中で起動・停止を行う運転) とし、広範囲な利用に対応している。主な利用目的として、医療照射、原子炉技術者養成、放射化分析、ラジオアイソトープの製造等が挙げられる。

原子炉の炉心部は、炉心ブリッジから吊り下げられた炉心タンク内に納められ、水深約 9.8m のプール中に置かれている。炉心部は燃料要素、反射体要素、格子板、制御棒等から構成され、反射体領域には照射筒が設置されている。図 1 に JRR-4 の炉心配置図を示す。

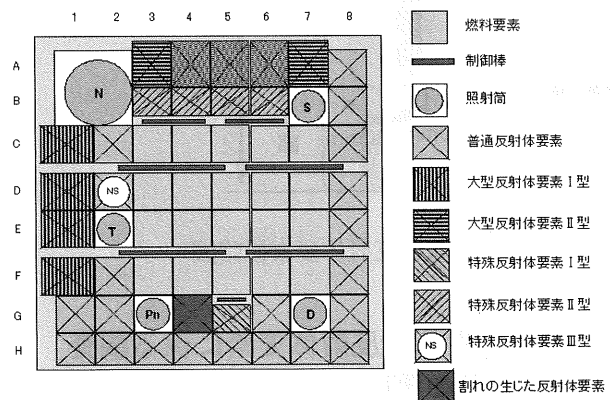


図 1 JRR-4 炉心配置図

連絡先：坂田茉美、〒319-1112 茨城県那珂郡東海村  
白方白根 2-4、日本原子力研究開発機構、電話：  
029-282-6517、e-mail : sakata.mami@jaea.go.jp

## 2.2 反射体要素

JRR-4 では、36 体の反射体要素を使用している。反射体要素は、材質で分類すれば、黒鉛をアルミニウム合金で被覆したもの及びアルミニウム合金のみからなるものの 2 種類がある。形状で分類すれば、普通反射体要素、大型反射体要素 I 型、大型反射体要素 II 型、特殊反射体要素 I 型、特殊反射体要素 II 型及び特殊反射体要素 III 型（中性子源）の 6 種類に分けられる。

割れが生じた反射体要素（SD-86-04）は普通反射体要素であり、被覆材ケース、吊手部、継手部及びプラグ部からなり、黒鉛反射材を内蔵する構造である。被覆材ケースの材質は、A6063S-T5 であり、吊手部、継手部及びプラグ部の材質は、A5052 である。被覆材ケースと継手部の溶接には、溶加棒として A4043 を使用している。反射材である黒鉛には、等方性黒鉛 IG-110 を用いている。反射体要素の組立寸法は、1025×80×80 mm、被覆材ケースの寸法は、695×74×74mm、黒鉛反射材の寸法は 691×72×72mm であり、黒鉛反射材と被覆材ケースのギャップは、上部で 4mm、側面で 1mm、下部は、被覆材ケースと黒鉛反射材が接している構造である。図 2 に普通反射体要素の概略図を示す。

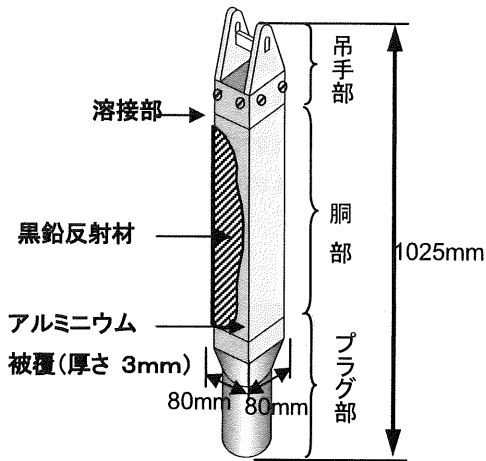


図 2 普通反射体要素概略図

## 3. 割れが生じた反射体要素に係る調査

### 3.1 破断部の調査

破断部分の調査として、被覆材ケースを切断し、破断面の腐食、損傷等の状況を目視観察した。また、被覆材ケースを 13 分割して破断面マイクロ観察用の試験片を作製し、13 個の試験片について走査型電子顕微鏡

を用いた破断面のマイクロ観察を行った。さらに、光学顕微鏡を用いて破断面金属組織観察を行った。

破断面の観察結果から、破断の主原因は、過大な応力による延性破断と判断した。

### 3.2 黒鉛反射材の調査

黒鉛反射材の調査として、始めに寸法測定を行った。測定は黒鉛反射材の全長（691mm）及び黒鉛反射材幅（72mm）について行った。また、割れの生じた反射体要素の内部には、水が入っていたことから、割れの発生に対する水の影響を調べるために、比較用反射体要素として外観上健全な特殊反射体要素 I 型（RR-85）を切断し、内部の黒鉛反射材の寸法測定を行った。

割れが生じた反射体要素の黒鉛反射材に対する寸法測定の結果、黒鉛反射材は、軸方向に約 7mm、径方向に最大 2.1mm 伸びていることが明らかとなった。高速中性子（>0.183MeV）照射量と寸法変化率の関係を調べたところ、高速中性子照射量の増加とともに黒鉛反射材の寸法変化率が大きくなっており、黒鉛反射材の成長は高速中性子の照射による影響と判断した。比較用に解体した特殊反射体要素 I 型の黒鉛反射材の寸法測定からも同様の結果が得られた。なお、特殊反射体要素 I 型は平成 19 年（2007 年）に使用を終了して取出し保管していた反射体要素である。図 3 に高速中性子照射による黒鉛の寸法変化率を示す。

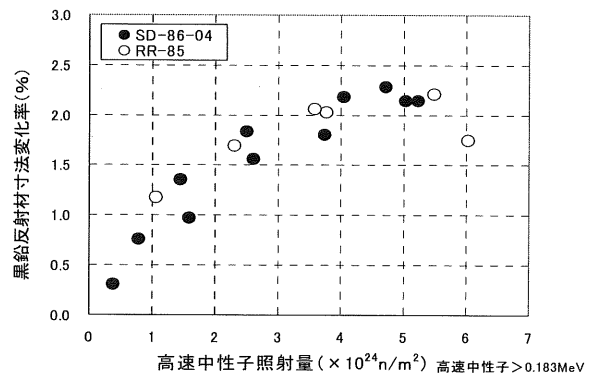


図 3 高速中性子照射による黒鉛の寸法変化率

## 4. 他の反射体要素に係る調査

### 4.1 放射線透過試験

反射体要素溶接部の割れは、黒鉛反射材の照射成長によるものと推定されたことから、保管品を含め継続使用を予定していた黒鉛反射材を内蔵する反射体要素33体について放射線透過試験を実施し、黒鉛反射材上面と被覆材ケース上面のギャップを測定することにより、中性子照射量と黒鉛反射材の成長量の関係を調査した。図4に放射線透過試験装置を示す。

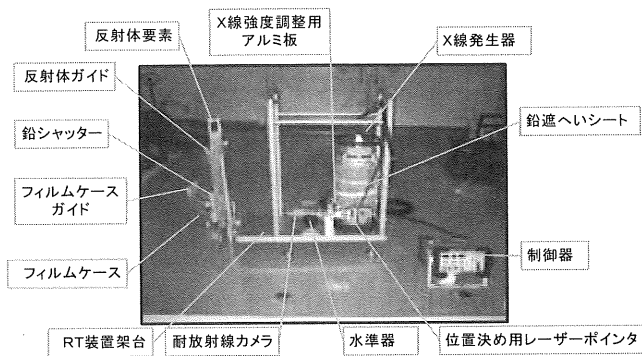


図4 放射線透過試験装置

33体の黒鉛反射材はすべて照射成長が認められた。このうち15体の黒鉛反射材については、照射成長により反射体要素内の軸方向に設けられた初期ギャップが無くなっていた。調査により照射量が概ね  $1.5 \times 10^{24} [n/m^2]$  を超えると上部ギャップがなくなることが分かった。ギャップのない反射体要素に関しては、ギャップ量を超えて黒鉛が成長し、溶接部には応力がかかっていると推測できる。図5に反射体要素の高速中性子照射量及び放射線透過試験で得られた黒鉛反射材上面と被覆材ケースとのギャップ測定値の調査結果を示す。なお、高速中性子照射量の計算には汎用核計算コードシステム (SRAC) を使用し、高速中性子のエネルギー範囲を  $0.183\text{MeV} \sim 10\text{MeV}$  として計算をした。

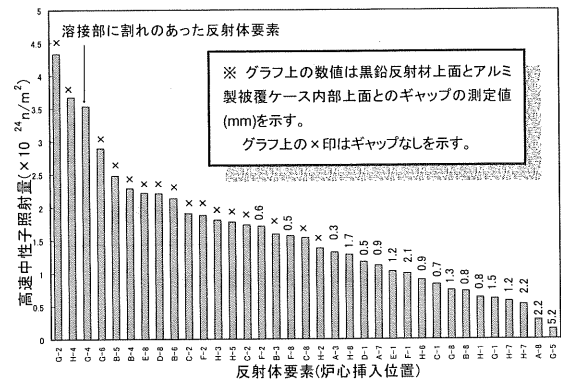


図5 反射体要素の高速中性子照射量とギャップ寸法

### 4.2 黒鉛の照射成長挙動

JRR-4 照射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13体をさらに分解し、黒鉛反射材の寸法変化と高速中性子照射量の関係について詳細に調査した。

本調査により、特に黒鉛長手方向の寸法が被覆材ケース内寸法の  $695\text{mm}$  より大幅に成長していなかった反射体要素の場合、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を確認できた。また、黒鉛長手方向の成長が  $695\text{mm}$  より大きかったものほど、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。図6に高速中性子照射による黒鉛の寸法変化率を示す。

原子炉級黒鉛は、 $600^\circ\text{C}$  以上の照射温度場において中性子照射量の増加とともに収縮することが示されているが[1]、JRR-4 のような低温照射環境において黒鉛反射材は顕著な膨張を示した。黒鉛の寸法変化率と高速中性子照射量の関係を評価した結果、高速中性子照射量  $2.5 \times 10^{24} n/m^2$  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  $7.13 \times 10^{-25} \% m^2/n$ 、最低  $4.21 \times 10^{-25} \% m^2/n$ 、平均  $5.71 \times 10^{-25} \% m^2/n$  であった。

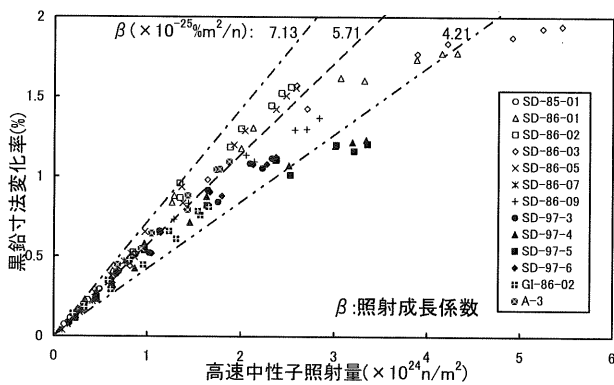


図6 高速中性子照射による黒鉛の寸法変化率

## 5. 反射体の管理

### 5.1 今までの保全

JRR-4 では、原子炉の中性子束と運転時間からの照射量によって反射体要素の管理が行われてきた。

従来の反射体要素の設計にあたっては、黒鉛反射材の成長は、ほとんどないものとして製作されていた。そのため、反射体要素の管理は、起動前点検に行う炉心タンク上からの目視点検や、施設定期検査ごとに行う外観検査によって管理されてきた。

また、黒鉛に高速中性子を照射することで生じる、照射欠陥によるエネルギーの蓄積を考慮した照射量制限値 ( $1 \times 10^{25} \text{n/m}^2$  以下) で反射体要素を交換してきた。

### 5.2 今後の保全

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、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分かった。よって、JRR-4 では、原子炉の安全安定運転の観点から、本新知見を反映した反射体要素の設計変更を行うこととした。設計にあたっては、①反射体要素の組立寸法を変更しないこと、②原子炉の照射性能を維持すること、③可能な限り反射体要素交換時期を延長すること、等を念頭に置き、4.2 項で述べた照射係数の最大値である  $7.13 \times 10^{25} \text{n/m}^2/\text{n}$  を用いて、黒鉛の寸法を決定した。その結果、上面ギャップを 15mm に広げるとともに、中性子束の分布の差から生じる反りも考慮して、側面ギャップを広げ、かつ、反転ができるものについては、反射体要素の構造を変更させることとした。表 1 に変更前後のギャップ寸法を示す。

表 1 変更前後のギャップ寸法

反射体要素名	ギャップ(mm)			
	上面	側面		
		燃料側	燃料反対側	横側
普通反射体要素	4→15	1→2		
特殊反射体要素Ⅰ型	4→15	1.5→2		
特殊反射体要素Ⅱ型	4→15	1→2		
特殊反射体要素Ⅲ型	5→15	1.5→2		
大型反射体要素Ⅰ型	5→15	1.5→4	1.5→2	
大型反射体要素Ⅱ型	5→15	1.5→4	1.5→2	1.5→3

(従前のギャップ) → (今回のギャップ)

また、黒鉛反射材の蓄積エネルギーについては、JRR-4 での使用環境下において、エネルギー蓄積量が多い反射体要素の炉心挿入位置を、照射温度がより高温となる位置に変更した場合、変更前の挿入位置における照射温度より  $50^\circ\text{C}$  以上に加熱されると、蓄積エネルギーが放出され、自己過熱を生じる可能性がある。照射温度以上の加熱による蓄積エネルギーの放出を防止するため、初期挿入位置から、より高温となる挿入位置への移動は行わないこととする。

これらの設計変更のもと、反射体要素の今後の管理としては、従来どおりの検査を実施するとともに、今回新たに反射体要素毎に定めた照射成長に関する照射量制限値に基づき交換計画を計る。さらに、定期的に放射線透過試験を行い、ギャップの有無により反射体要素の健全性を確認するとともに、今後の取り扱いに資するため照射成長の度合いも確認する。

## 6. 結言

割れが生じた反射体要素の原因調査の結果、黒鉛反射材の高速中性子照射による照射成長により、被覆材ケースに応力がかかり、溶接部において延性破断が発生した。設計段階では考えていなかった黒鉛の照射成長が原因であるため、設計を変更するとともに、今までの管理手法を変更する必要性が生じた。

今後の保全としては、黒鉛反射材の照射成長という、新たな技術的知見を反映した取り替え用反射体要素を製作し、黒鉛の照射成長の健全性を確認するため、定期的に放射線透過試験を行っていくこととする。

## 参考文献

- [1] 高温ガス炉炉心黒鉛構造物の構造設計指針：平成 2 年 12 月科学技術庁原子力安全局