

# EBR-II 廃材を用いた高速炉構造材健全性評価に関する研究開発

(受託者) 国立大学法人東京大学

(研究代表者) 沖田泰良 人工物工学研究センター, 大学院工学系研究科

(再委託先) 原子燃料工業株式会社, 株式会社原子力エンジニアリング

(研究開発期間) 平成 21 年度 ~ 23 年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

本研究開発では、液体 Na 冷却高速増殖炉を対象とし、構造材料の健全性評価手法確立に資する技術開発を行うことを目的とする。研究開発全体像を包括する図 1 に基づいて具体的実施事項を示す[1]。米国液体 Na 冷却高速実験炉 EBR-II において約 12 年間反射材として使用されたオーステナイト系ステンレス鋼照射ブロック材を用いて、構造材の照射下マイクロ組織変化を検出する非破壊検査技術開発を行う (図 1(2))。また、同一試料に対して、マイクロ組織観察と機械的特性試験を行い (図 1(3))、非破壊検査で得られる信号と物性変化の関係についてマイクロレベルで明らかにする (図 1(4))。その結果に基づいて、マクロ特性とマイクロ組織を結びつけるモデル、長期間照射による材料劣化を予測するモデルの構築を行う (図 1(5))。更に試験炉で得られてきた照射下マイクロ組織、機械的特性変化データを集積し (図 1(1))、照射ブロック材データとの比較により、その相違の要因について明らかにする (図 1(6))。これらに基づいて、高速炉構造材の健全性評価手法確立に資する (図 1(7))。

本研究開発で得られる非破壊検査技術や材料劣化予測モデル、微小試験片とブロック材の照射挙動相違に関する知見等は、高速炉炉心材料、既存軽水炉や次世代軽水炉、他型革新炉の照射下における構造材料の健全性評価法確立にも資する要素技術であることが期待される。

## 2. 研究開発成果

以下には平成 22 年度迄に得られた主な結果を示す。一部には平成 23 年度の成果も含む。

### (a) 照射材に関する調査

本研究開発で使用する二つの照射ブロック材に関して得られた情報を表 1 に纏める。EBR-II の反射体は、5 つのブロックから構成され、ブロック 3 が炉心中央部、ブロック 5 が上端に位置する (図 1)。ブロック 3 は測定により最大で約 33dpa、ブロック 5 は外挿により最大 5dpa 程度上端では 0dpa に近い照射量であることがわかった。これらの照射条件と試験炉で微小試験片を用いたデータベースから類推し、ブロック 3 ではボイドスエリングが、ブロック 5 では炭化物形成が支配的であると考えられる。

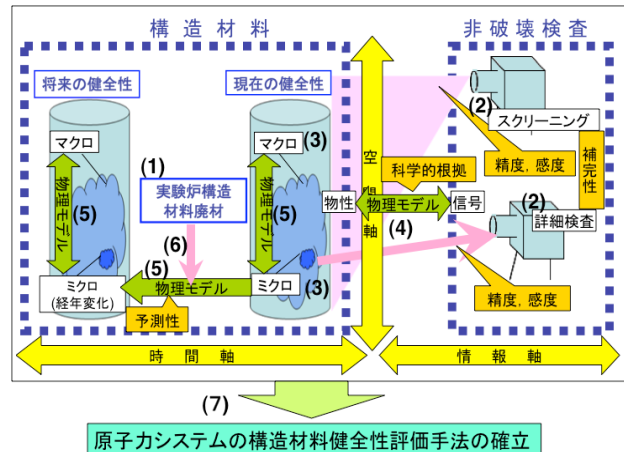


図 1 構造材料健全性評価に資する検査のあり方に関する全体像

表 1 ブロック材のサイズと照射条件

	ブロック 3	ブロック 5
サイズ, mm	幅 52.4 長さ 243	幅 52.4 長さ 217
照射量, dpa	(flat1) 14 ~ 33 (flat 4) 11 ~ 23	0 ~ 5
温度, °C	370 ~ 410	~ 415

これらの照射条件と試験炉で微小試験片を用いたデータベースから類推し、ブロック 3 ではボイドスエリングが、ブロック 5 では炭化物形成が支配的であると考えられる。

(b) 非破壊検査信号と材料物性変化を記述するモデルの構築

試験材中に超音波が入射した際に得られる反射波(底面波、後方散乱波)には、照射下で形成するボイド、炭化物、転位などマイクロ組織を反映した信号が含まれている。マイクロ組織と超音波の相互作用を定量化し、特に後方散乱波の減衰、周波数分布等に注目することで、マイクロ組織の深さ分布を非破壊的に検出するためのモデルを構築した。

超音波は、材料中のマイクロ組織との相互作用により、散乱あるいは吸収され、散乱成分の一部は後方散乱波として観測される。深さ  $x$  の位置から得られる後方散乱波スペクトル  $P(x, \omega)$  は以下の式で与えられる[2,3]。

$$P(x, \omega) = CP_0(\omega) \sqrt{\left(\frac{d\gamma}{d\Omega}\right)_{L, \pi}} \exp(-2\alpha x) \left(\frac{d\gamma}{d\Omega}\right)_{L, \pi}$$

$P(x, \omega)$ : 各周波数  $\omega$  成分の音圧,  $\alpha$ : 減衰係数,  $C$ : 材料に依存する定数  
 $\left(\frac{d\gamma}{d\Omega}\right)_{L, \pi}$ : 散乱体の微分断面積 ( $\pi$  は散乱角,  $L$  は縦波成分)

パラメータを定量化するために必要な物性値は、未照射アーカイブ材より求めた。

照射下マイクロ組織が複合的に一様分布する場合のマイクロ組織検出検討の一例として、(1) 転位密度  $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 、(2) 炭化物生成による 0.6% 体積減少、(3) ボイドスエリングによる 1.3% 体積増加、が発生した場合について解析を実施した。底面波、深さ 16~30mm より得られた後方散乱波の周波数解析結果を図 2 に示す。各々のマイクロ組織に依存する信号の相違は、超音波検査で測定可能である。また、図 3 には、(1)~(3) に示したマイクロ組織が生じた試料に対して、10MHz をピーク周波数とする超音波を入射させた場合の信号変化を示す。図では、7MHz と 13MHz のみを示したが、マイクロ組織の複合変化を検出しようとするパラメータを複数抽出し、その変化を解析することにより、各々のマイクロ組織について定量化できうと考えられる。

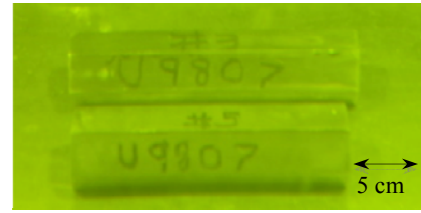


図 1 照射ブロック材外観 (上:ブロック 3, 下:ブロック 5)

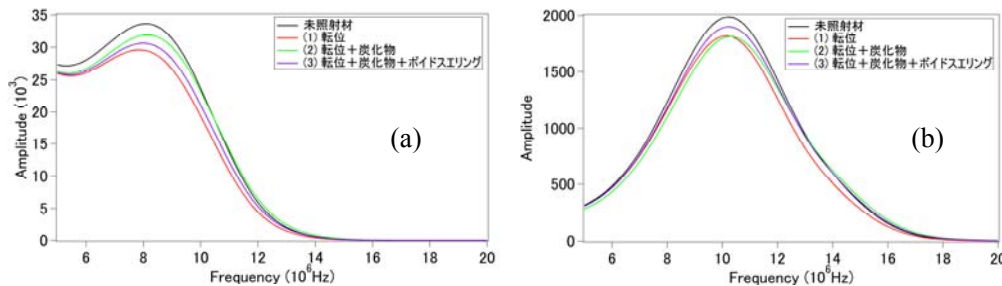


図 2 種々の照射下マイクロ組織による周波数分布シミュレーション (a) 底面波, (b) 後方散乱波

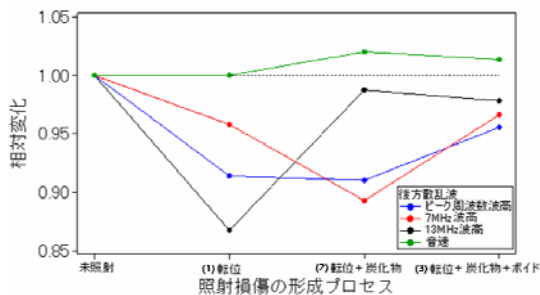


図 3 ミクロ組織の複合変化による各超音波パラメータの推移

構造材料では、マイクロ組織が深さ方向に不均一である場合も検討する必要がある。一例として、厚さ 50mm のブロック試料中に、平均ボイドスエリングを 1% で一定として、(a) 均一スエリングの場合、(b) 上部 1/3 に 3% スエリングが発生し他部分 2/3 が 0% スエリングである場合、(c) 中央部 1/3 に 3% スエリングが発生し他部分 2/3 が 0% スエリングである場合、(d) 上部 1/3

に3%スエリングが発生し他部分2/3が0%スエリングである場合について、表面から18mmを基点として深さ3mm毎の後方散乱波周波数分布積分強度(積分範囲6-9MHz)について図4に示す。スエリングが深さ方向に勾配を持つ場合、後方散乱波周波数分布積分強度は、均一スエリングの場合と比較して有意に変化するため、本解析を用いることでマイクロ組織の深さ方向を非破壊的に検出しうることが明らかとなった。また、同様の解析は、炭化物・転位に対しても適用可能であることがわかった。

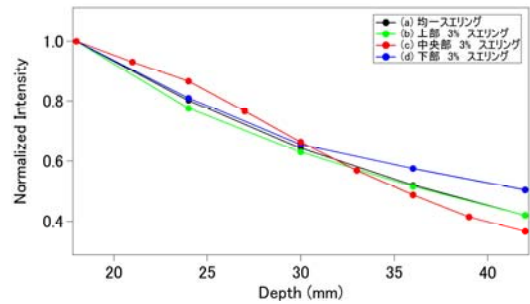


図4 後方散乱波周波数分布積分強度の深さ依存性に関する理論計算

### (c) 照射ブロック材を用いたホットセル試験

照射ブロック材に対して米国ペンシルバニア州ピッツバーグの Westinghouse Electric Company ホットセルにおいて超音波検査並びにマイクロ組織観察・機械的特性検査を実施した。図5にホットセルにおける超音波検査のために製作した計測器具を示す。超音波の入射点、入射角度を適切に制御することにより、六角柱ブロック材の各々の面に対して20mm毎に超音波を入射し、底面波、後方散乱波を取得することが可能となった。

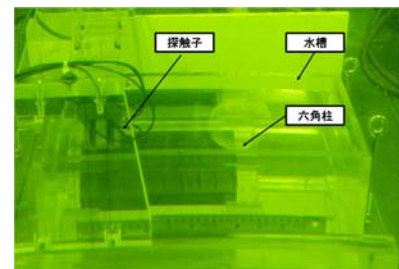


図5 ホットセル用超音波試験装置

超音波信号の解析により、音速、減衰係数の他、後方散乱波の散乱強度、周波数分布等を求めた。一例として図6には二つのブロック材における音速測定結果を示す。ブロック3においては、全域で1%以上の低下、中央位置で最大1.5%程度の音速低下が観測され、ボイドスエリングにより最大1.5%の体積増加が生じていることが示唆される。一方、ブロック5では音速変化が小さいが、炉心に近い部分では低下傾向、上端部で照射量が極めて低い部分では増加傾向が観察され、それぞれボイドスエリングによる体積増加、炭化物形成による体積減少が示唆される。

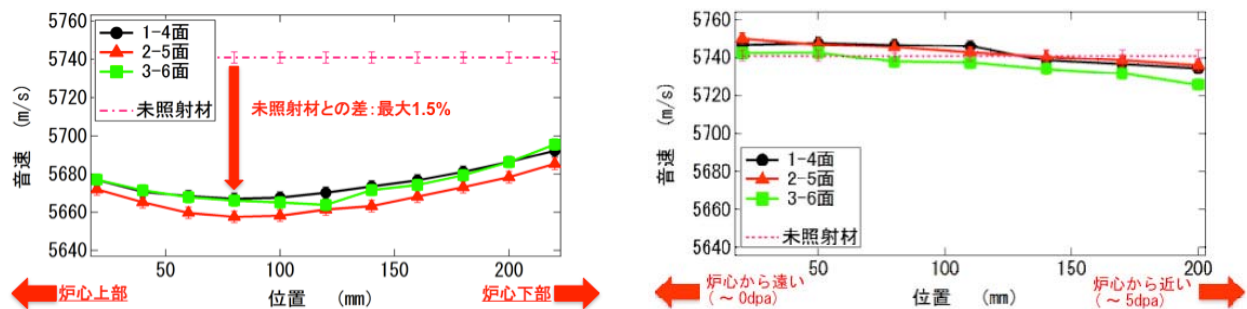


図6 超音波検査により測定した音速 (左) ブロック3、(右) ブロック5

図7には、ブロック3に対して、透過型電子顕微鏡(TEM)で観察されたボイド組織、及び密度測定によって求めた体積増加を示す。ブロック3においては、ボイドスエリングは深さ方向に分布を持ち、中央部で体積増加が最大となることが観察された。図8に示す超音波後方散乱波周波数分布積分強度も中央部でスエリングが大きくなることを示唆しており、後方散乱波周波数分布積分強度測定がマイクロ組織深さ分布を測定する技術として有用であることがわかる。

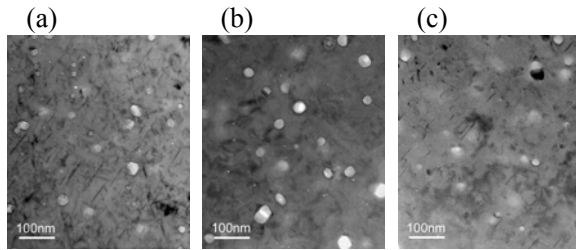


図7 ブロック3で観察されたボイド組織  
(a)上部(2.25%体積増加), (b)中心部(2.63%体積増加),  
(c)下部(2.29%体積増加)

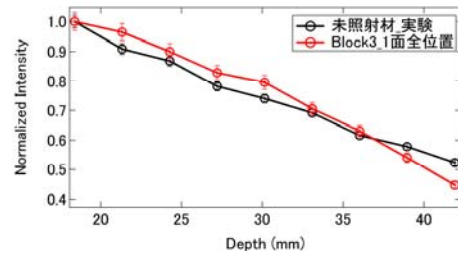


図8 後方散乱波周波数分布積分強度の  
深さ依存性 (積分範囲 6-9MHz)

図9には、ブロック5に対するTEM観察結果を示す。炭化物・転位ループとともに、ボイドが観察された。更に総照射量も極めて低いブロック5上端部においても、ボイドが観察される驚くべき結果が得られた。これは、低照射速度によるボイド形成の促進によると考えられる[4]。

これらの実験結果を受けて、応力付加環境における照射欠陥形成過程の解明、ボイド形成が延性低下に及ぼす影響等について、計算科学による定量化を行っている。

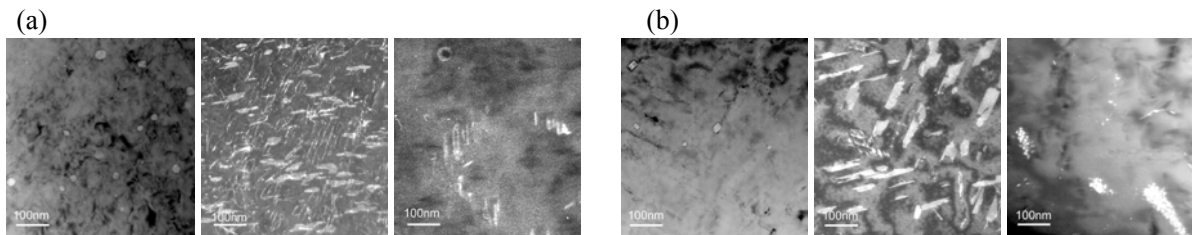


図9 ブロック5で観察されたTEM像 (a) 照射量~5 dpa, (b) 照射量: ~0 dpa  
それぞれ左からボイド像、転位ループ、炭化物の順に示す。

### 3. 今後の展望

これまで、超音波後方散乱波により照射下マイクロ組織を深さ方向に検出する世界で初めての非破壊検査技術を構築し、その有用性について実証してきた。今後は、信号処理方法の改善・測定方法の適正化により、検出精度の向上を目指す。特に、低照射速度で長期間供される炉内構造材料についても、ボイド・炭化物生成による体積変化が懸念されることが本研究開発により明らかとなったため、これを検出する非破壊検査技術を目指す。また、オーステナイト系ステンレス鋼を対象とし、ボイド形成による延性低下を記述するモデルの構築等も併せて行っていく。

### 4. 参考文献

- [1] 「平成20年度高経年化機器の状態監視のための新技術適用性に係る研究報告書」平成21年2月 NPO法人日本保全学会状態把握新技術適用性研究分科会
- [2] K. Goebbles, Structural Analysis by Scattered Ultrasonic Radiation, Research Techniques in Nondestructive Testing IV, Academic Press, 1990.
- [3] A.B. Bhatia, Journal of Acoustical Society of America, 31, 1, 1959.
- [4] T. Okita, T. Sato, N. Sekimura, L.R. Greenwood, F.A. Garner, J. Nucl. Mater., 307-311 (2002) 322.