



小特集 放射線照射環境下における材料物性値のその場測定

2. 材料の物性値に対する放射線照射誘起効果

2. Radiation-Induced Effects in Physical Properties of Materials

2.3 中性子照射誘起熱伝導度

2.3 Radiation-Induced Thermal Conductivity under Neutron Irradiation

四 竈 樹 男, SNEAD Lance L.¹⁾

SHIKAMA Tatsuo and SNEAD Lance L.

東北大学金属材料研究所, ¹⁾米国オークリッジ国立研究所

(原稿受付: 2013年11月5日)

核融合燃焼プラズマ近傍で使用される材料は大きな核加熱を受けるため, 除熱, 温度勾配に伴う局所応力発生などの点から, 適切な熱伝導度をもつことが必要である. 動的照射効果は小さいと考えられる一方, 中性子照射効果により, 特にセラミック系材料では熱伝導度が低温で著しく劣化することが報告されている. ここでは, オンラインで照射初期の熱伝導度を原子炉中で測定した事例を報告する.

Keywords:

radiation-induced effects, thermal conductivity, neutron irradiation, ceramics

2.3.1 はじめに

照射により, 特に低温 (200-300°C 以下) で熱伝導度が恒久的に低下する傾向が多くセラミックス系材料で報告されてきているが, 熱伝導度に対する動的照射効果が存在するかどうかについては, これまでの実験からは明らかにされていない. 電子励起による易動度の高い電子の導入は電子による熱拡散に寄与すると考えられるが, 一般に数 kGy/s (発電用大型原子炉が全出力で稼働している時の炉心中央) 程度での電子励起による寄与は極めて限定的であると評価される. むしろ, 原子空孔, 侵入型原子導入に伴うフォノン散乱効果による, 熱拡散率低下の効果の方が大きいと推定される. 核融合システムでは特にプラズマ加熱に関係した機器に使われる誘電体で熱伝導度の低下による発生熱応力の増大, 結果としての誘電体の破損が大きな問題となる可能性がある. いずれにしても, 1 kGy/s 以上の照射場においてバルクの試料を用いた実験が不可欠であり, 電子励起密度が 10 Gy/s 程度のガンマ線照射場や薄膜しか取り扱えない加速器 (加速電圧が数 MeV 程度までのもの) での実験は現実的ではなく, 高出力原子炉ないしは類似の中性子源でのその場実験が唯一の方策となる.

熱伝導度評価手法としてはレーザー入力による温度変化を測定する手法 (レーザーフラッシュ法) が確立されている. この分野で世界最先端の技術をもっていた通産省工業技術院計測研究所と東北大学とが協力し, 赤外領域で高い耐放射線特性をもち, 光伝送特性に優れた光ファイバをレーザー伝送体とし, 熱電対による温度計測を採用した原

子炉その場測定システムを検討した経緯があるが実現には至らなかった[1]. ここでは, 日米核融合学術協力研究, JUPITER 計画において, 世界最高出力を誇る米国オークリッジ国立研究所 (Oak Ridge National Laboratory) の原子炉 (HFIR; High Flux Isotope Reactor) において実施された, 原子炉内熱伝導度その場測定について概説する.

2.3.2 原子炉内その場測定の概要

HFIR は高濃縮ウラン炉心を最先端の水冷却手法を用いて除熱する混合スペクトル炉としては世界最高の中性子束を誇る研究原子炉であり, 鉄に対する電子励起密度は炉心中心部で 20 kGy/s を超える. 高出力密度を誇る高速炉においてもこのように高い電子励起密度をもつものではなく, 電子励起効果の検証には最適の照射場である. しかし一方, 原子炉炉心計装技術としては 10 kGy/s 程度までの電子励起密度に対応するのが限界であり (電気信号を取り出すケーブルがこれ以上の電子励起密度では過熱してしまう.), その場測定は炉心ではなく反射体領域で実施された. その場の電子励起密度は約 10 kGy/s を多少上回る程度であった. これは ITER のプラズマ最近接領域で想定される最大の電子励起密度程度と推定される.

熱伝導度測定の原理を図 1 に示す. 電子励起により過熱される試料からの熱がヒート・シンクに流れ込むことにより生ずる試料内の温度差 ($T_1 - T_2$) から熱伝導率, K を評価するものである. 直径 20 mm 長さ 1 m 程度のキャプセル内に 100 個近くの試料が装荷される構造となっている. こ

これは本実験には多額の資金が必要であるため極力多くの試料からのデータを取得する必要があるためである。図2に電気伝導度測定用キャプセルと熱伝導率測定用キャプセルの概要を示す。ほぼ同じ程度の大きさのキャプセルに電

気伝導度測定では15個の試料しか装荷できないのに対し、外部入力が必要ない熱伝導度測定では6倍程度の試料装荷が可能となっている。ちなみに、上記、国内で検討されたレーザー光を用いたシステムでは、実験パラメータを制御できるなどの長所がある一方、数個の試料しか装荷できない。

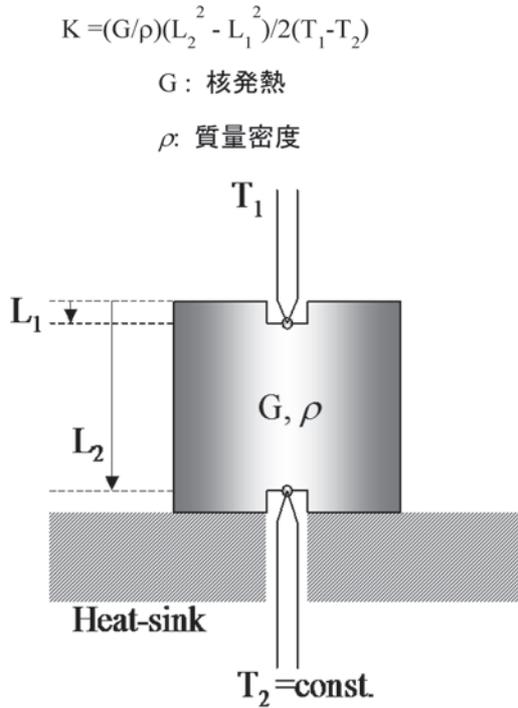


図1 熱伝導率測定の原理。

2.3.3 高熱伝導度窒化アルミニウムの熱伝導度測定結果

図1に示すように核加熱密度（電子励起密度）を別途評価することにより熱伝導度の絶対値測定が可能ではあるが、特に原子炉運転の過渡期に核加熱密度の絶対値を評価することが困難であること、その他の外乱の影響などから、得られたデータに関しては個々の試料の経時的変化のみが信頼おけるデータであると評価した。

図3に、宇部興産㈱が開発した、イットリウム添加の高熱伝導度窒化アルミニウム (AlN) のHFIR照射下での熱伝導度変化を示す。図1に示すように測定は核発熱（電子励起密度）に強く依存するため、原子炉立ち上げ時の測定が困難であることに留意する必要があるが、照射の極初期に電気伝導度が大きく低下していることが解る。これは、同時に評価した炭化ケイ素と比較しても極めて顕著であり、高熱伝導度を謳うセラミックス系材料の特徴を表していると推定される。図3には使用した試料とヒート・シンク構造を併せて示す。照射初期においては試料温度は原子炉出力のほぼ比例して上昇するため、温度上昇と共に熱伝導度が

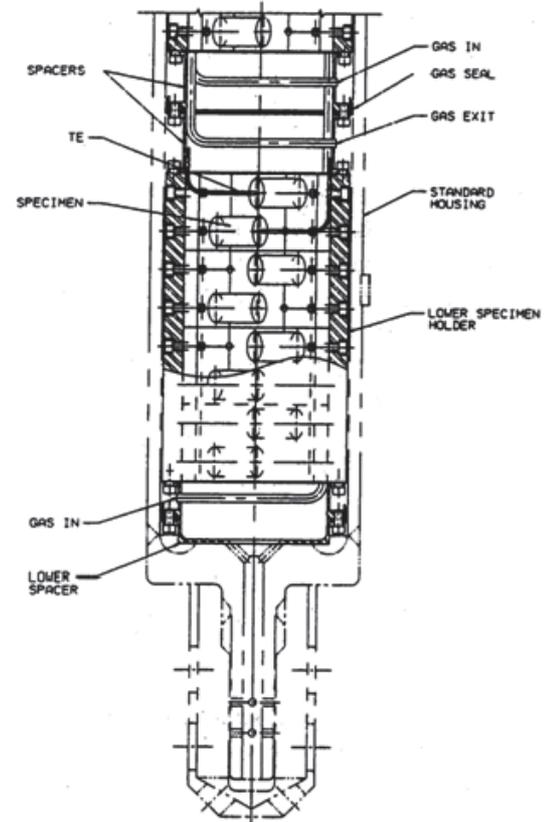
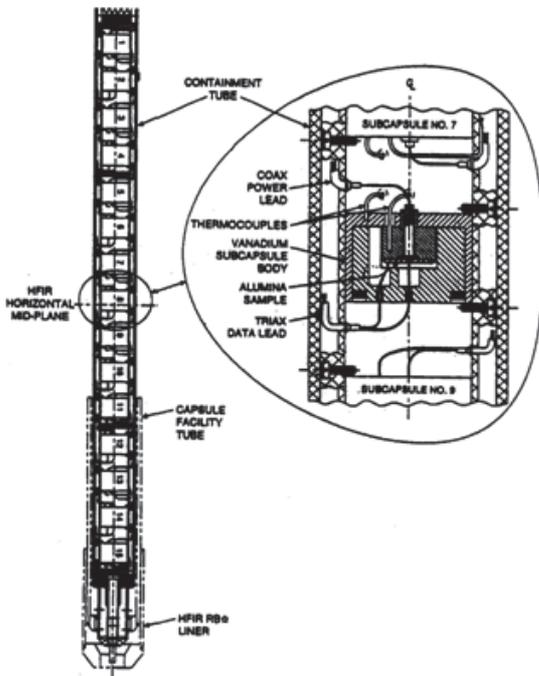


図2 原子内その場測定キャプセル。左：電気伝導度測定用、右：熱伝導度測定キャプセル（いずれも HFIR において使用された。スニード博士の厚意による）。

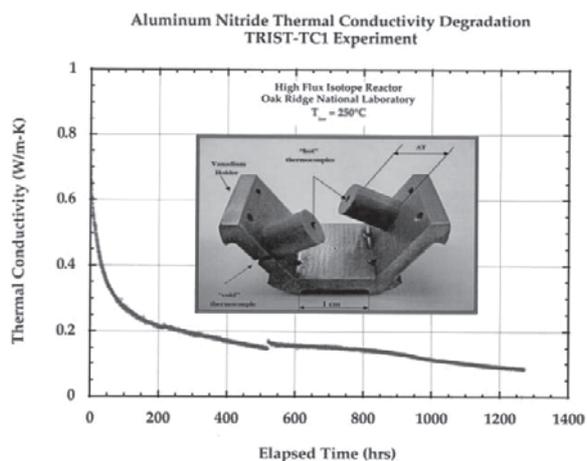


図3 HFIR内で評価された窒化アルミニウムの照射下での熱伝導度変化。試料形状とヒート・シンクを併せて示す(スニード博士の厚意による)。

低下するセラミックス系材料では、この温度による熱伝導率低下も考慮する必要があるが、高熱伝導度を謳うセラミックス系材料は一般に不純物など内部のフォノン散乱中心を低減した材料であり、多数の照射欠陥が導入される照射下ではその効果は限定的にならざるを得ないと推定される。このことは、放射線に曝される場所で使用されるセラミックス系材料の熱伝導率としては、比較的品质の悪い材料の値を採用すべきことを示している。

参考文献

- [1] 四竈樹男, 佐東信司: 核融合研究 67, 519 (1992).