

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

In-Situ Irradiation Measurements on Physical Properties of Materials under Radiation Environments

1. はじめに

1. Introduction

四 竈 樹 男

SHIKAMA Tatsuo

東北大学金属材料研究所

(原稿受付：2013年11月5日)

1.1 核融合炉内に利用される機能候補材料について

国際熱核融合実験炉計画 (ITER 計画) が工学設計活動当時よりはるかに多くの参加国を得て進展する現在、核融合によるエネルギー生産の目標は新たな局面へ入りつつある。そこでは、これまで蓄積されてきた高温高密度プラズマ挙動に関する系統的な知識の上に、燃焼プラズマの挙動 (プラズマそのもの、および、プラズマとプラズマ対向材料との相互作用、熱除去など) 評価と、核融合反応から生ずる中性子に関連した幅広い炉工学知識の蓄積が重要な課題となる。この二つの課題はいずれも、核融合反応から発生する高フラックスの放射線環境が付随した課題であるが、現時点で先行する核分裂技術の中でも経験しなかった工学的挑戦を突きつけている。高フラックスの放射線環境下での工学的作業が如何に難しいものであるかは、いみじくも福島事故により広く実感されることとなっている。一方で ITER 計画においては、関連する課題、具体的には燃焼プラズマ診断・計測、放射化機器・材料取り扱い施設整備などは先送りされる傾向が顕著であり、このままでは核分裂システムの二の舞となることが憂慮される事態である。

本小特集では、放射線が燃焼核融合工学システムの成立ちに及ぼす課題の中で、いわゆる動的照射効果 (Dynamic Irradiation Effects) を中心として話を進める。動的照射効果については後述するが、概略としては放射線照射下において動的に材料 (固体、液体、気体、プラズマを含む) 挙動が変化する現象であり、核融合炉工学において最も注目を集め研究が集中的に進められる積算照射効果 (Accumulated Irradiation Effects) と対比される現象である。積算照

射効果は放射線と相互作用するすべての材料に発現する現象であるのに対し、動的照射効果は特にセンサー素子などに代表される、いわゆる機能性材料に顕著に表れる現象である。

図1に核融合炉の概念図と、そこで使用される機器の中で動的照射効果を受けるであろうものを示す。これらの機器における動的照射効果に関連した課題については、図中に示すように以下の章で個別に論ずる。

1.2 放射線照射環境下における材料物性値の照射誘起効果について

放射線は材料との相互作用により様々な欠陥 (電子欠陥、原子欠陥、複合欠陥) を生成する。生成された欠陥は放射線励起や熱励起などの過程を経て離合集散、消滅・転換し材料の微細構造を変化させる。図2に放射線と材料との相互作用を模式的に示す。微細構造変化はある程度の時間、放射線強度に大きく依存するが、典型的には放射線に強い材料の中では数ヶ月から数年、放射線に弱い材料では数日から数ヶ月をかけて生ずるものであり、材料特性が恒久的に変化する。これが積算照射効果である。一方、放射線に曝されている状態において生成される短寿命の欠陥により材料特性が変化する場合がある。この現象は放射線照射下においてのみ現れ、放射線に曝されなくなると材料特性は元に戻る。これが照射により誘起された動的照射効果である。

動的照射効果の例としては原子空孔生成による体積膨張現象、高濃度照射誘起点欠陥による異常拡散現象なども挙げられるが、多くは照射誘起電子励起に伴う電子的欠陥に

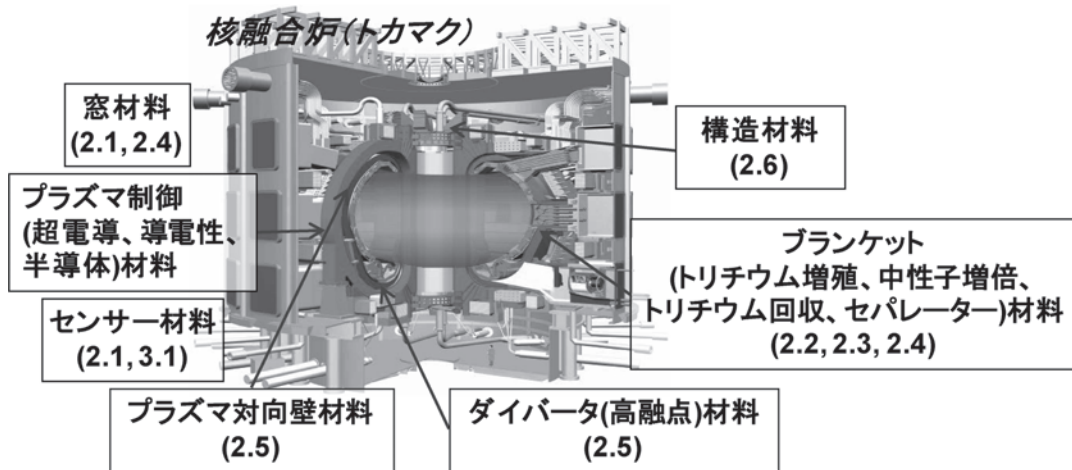


図1 核融合システムにおいて動的照射効果が重要な影響を及ぼすと想定される機器の例. それぞれの部分については図に示す以下の章で記述される.

関係したものである. 構造材料の主要候補材料である金属系材料は基本的に高濃度の自由電子をもち, 励起電子や電子の欠陥の自由電子による緩和が直ちに生ずるのでほとんど問題とはならない (ただし, 金属系材料においても, 内部に金属間化合物, セラミックスなどの異相を含むのが通例であり, これら異相の安定性は照射励起現象により動的に変化する可能性がある.) 一方, 図1に示す機器に使用される半導体, 電気絶縁体では, 電子励起現象がそれら材料の機能特性 (電気伝導度, 光伝送特性など) を大きく変化させることになる. 典型的な動的照射効果として,

照射誘起電気伝導 (Radiation Induced Electrical Conductivity; RIC : ほとんど電気を通さないとみなされる材料である程度の電流が流れてしまう現象)

照射誘起発光 (Radiation Induced Luminescence (Radio-luminescence) ; 放射線励起により材料が光, 特に可視付近の光を出す現象)

などが挙げられ, RIC は電気絶縁材料の絶縁特性劣化, 更には高電圧部での絶縁破壊の促進, 半導体の暗電流増大 (ノイズの増大) など多くの工学的課題を引き起こす. また, 照射誘起発光は放射線計測に積極的に利用される一方, プラズマ窓からのノイズ発光などの問題を生ずる.

1.3 材料物性値を放射線照射場で測定する必要性について

材料・機器に対する放射線の効果を研究する場合, 伝統的で主流の手法は, 対象物を照射場 (ガンマ線照射施設, 原子炉, 加速器) に入れて一定時間照射し, その後, 照射場から取り出して特性変化を別途別の場所で測定するものである. この照射した後での特性評価を照射後試験 (Post Irradiation Examination; PIE) と呼ぶ. 原子炉や中性子源で照射した場合には, 対象物は強い誘導放射能をもつのが普通であり, 法律的に許可された放射線管理区域, 更にはその中で嚴重に放射線遮蔽がなされたホットセル内で実験する必要がある.

一方, 上記のように動的照射効果は照射中に特性が変化するので, 照射中にその場で特性変化を評価する必要がある. これがいわゆるその場測定 (In-situ measurements) で

動的照射効果と積算照射効果

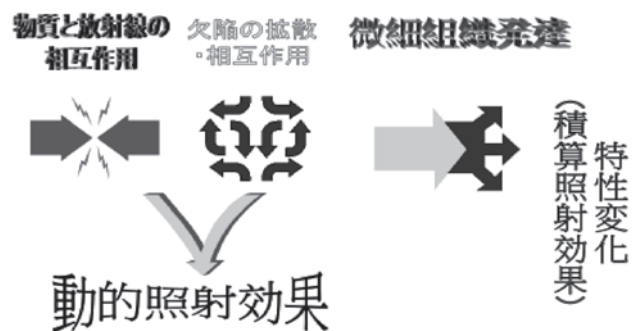


図2 動的照射効果と積算照射効果の模式的関係.

ある. その場測定は強い放射線に曝された場所内に置かれた対象物に対して遠隔で行う必要があり, 大きな制約の中で様々な工夫が必要となる. 例えば電氣的測定の場合には, 計測用のケーブルを10 m以上の長さで引き回す必要があり, ケーブル自身のインピーダンスが, 測定そのものに影響する場合がある. 照射誘起発光でも, 光信号を何らかの形で照射場から取り出す必要があり, 光伝送体として光ファイバを用いる場合は, 光ファイバの光伝送特性をよく検討する必要が出てくる. 一体にその場測定には多大の労力と資金が必要であるのに対し, 近接性が悪いことからパラメータ制御が難しく, データ取得が困難で, いわゆるコスト/ベネフィットが他の実験と比較して悪い. しかしながら, 動的照射効果の検討には不可欠な手法であり, ITER工学設計活動では, 「プラズマ診断に用いる材料・機器の特性評価は基本的にその場測定で行うことが不可欠である.」との答申が出されている[1]. その場測定に関わる課題の克服としては, 加速器, 小型プラズマ・シミュレータなど取り扱い, 近接性が容易な装置と, より現実場に近い原子炉, 大型プラズマ装置との有機的併用が必要である.

参考文献

[1] S.Yamamoto, Radiation Effects on Diagnostic Components, ITER-EDA, Design Description Document, WBS 5.5M, ITER-JWS-Garching, Germany. (1998).