

# モデル・データ・検査技術融合に基づく炉内材料劣化に関する研究開発

Integration of modeling, database and inspection technique  
for the prediction of the material behavior under irradiation

東京大学大学院工学系研究科	沖田 泰良	Taira OKITA	Member
	関村 直人	Naoto SEKIMURA	Member
原子燃料工業株式会社	磯部 仁博	Yoshihiro ISOBE	Member

The recent situation of nuclear power generation gradually requires not only the economic viewpoint but also even greater efforts in accurate evaluations on safety and availability issues. Accordingly, assessments on the integrity of structural components are critical both now and in the future. Structural materials which suffer from age-related degradations especially should have methods to evaluate degradations due to changes in material properties. It is clear that conventionally used extrapolations of phenomena have restrictions and limitations when evaluating the integrity of structural materials. In the age-related process in the future where no proven data exist, we need to evaluate the structural integrities in parallel with the service of the structural materials. In such conditions, it would be expected that the following four technical issues must be solved. (1) To understand behaviors of structural components in service and to make clear new potential problems associated with the further service period. (2) To identify the present states and future tasks of inspection techniques which evaluate the integrity of structural materials and accumulate the database of age-related degradations. (3) Establishing "data model" to apply the existing database to understand the material behavior under the conditions where no proven radiation data exists. At the same time, establishing physical simulation models strategically in the "data model". (4) To show a vision of collaborations for the above technologies.

**Keywords:** structural materials, irradiation, physical model, database, inspection techniques

## 1. 緒言

照射環境におかれる複雑な材料のシステムとしての原子力システムを長期間にわたって利用してゆくために、放射線照射場における材料劣化挙動は、我々が解決しなければならない最大の課題である。特に、革新炉における構造材料の使用環境は、既存の軽水炉材料の使用環境とは大幅に異なるため、現象論的外挿によって材料挙動を予測することは、多くの制限と限界が存在する。実証的データの存在し得ない領域で供用される革新炉構造材料においては、供用と併せて健全性評価を行い、安全性を維持し、信頼性を確保することが革新炉実現への必要条件である。加えて、革新炉構造材料においては、既存の軽水炉構造材料と異なり、未だ供用温度、照射量、核変換生成物ヘリウム生成量、供用期間など材料が供される照射環境が定量的に決まっていないことも特筆すべき事項である。すなわち、

革新炉構造材料においては、現段階では、どのような照射条件下でも適用可能な健全性評価手法を確立することが求められている。

これまで、その評価手法の一つとして、照射損傷の基礎過程からマクロな材料照射効果の物理的メカニズムを明らかにし、これに基づいたシミュレーションから材料挙動予測を行うことの重要性について、我々のグループは立証してきた[1-3]。また、これまで行われてきた照射データを集積し、照射劣化に及ぼす重要な因子を明らかにすることで、モデル化の観点からデータを整理するデータモデルは、従来型のデータベースとは異なり、材料挙動予測モデルの妥当性評価、高度化に対しても不可欠な手法である[4]。一方で、スエリングなど非常に多くの因子が影響を及ぼす照射劣化に関しては、材料の供用開始から寿命末期までを包括的に予測するモデルの構築が試みられてきた。しかし、複合的極限環境で使用される材料の挙動を単一的なモデルのみで予測することは、信頼性に乏しいため、材料挙動予測モデルや照射データモデルと併せて、供用中の材料の劣化具合を非破壊的に検査する手法の開発

連絡先: 沖田泰良、〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1、東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻、電話: 03-5841-6987、e-mail: okita@q.t.u-tokyo.ac.jp

が重要となる。

本研究開発では、以上に示した、材料挙動予測モデル、照射データモデル、非破壊検査技術の3つの技術を個々に開発し、高度化するのみならず、材料劣化予測の観点から融合させる。それにより、実証的データの存在しない領域で使用される材料の照射劣化を評価する手法を構築し、魅力的な革新炉実現のため、炉内構造材料の安全性の維持並びに信頼性の確保に寄与することを目的とする。

本研究開発で構築する照射硬化予測モデルは、従来の計算機能力の発達にのみ依存してきたマルチスケールモデルとは異なり、照射欠陥と転位の長距離相互作用を計算する上で線形弾性論を適用し、近距離相互作用を計算する分子動力学法 (MD 法 : Molecular Dynamics) と組みあわせる手法を用いる。これにより、現段階の計算機能力でも可能で、更に照射硬化の予測に必要な遠距離相互作用も取り入れたモデルを構築することが大きな独創性である。また、これまで行われてきた世界中の照射データを可能な限り集積すること、更に集積したデータから1つのパラメータで整理する

従来型のデータベースを構築するのではなく、データを材料劣化予測モデルの観点から多次元的に見直し、データモデルを構築することに独創性がある。加えて、スエリングの非破壊検査技術は、未だ確立されておらず、革新性のある技術である。

このように、モデル・データ・検査技術の3つの技術を材料劣化予測の観点から相互補完し、融合することによる評価手法は、保全学の概念に基づいたものであり、これにより構造材料の健全性をより高い信頼性で評価する手法が確立できる。

## 2. 研究体制

本研究では、フェライト系ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレス鋼を対象とする。フェライト系ステンレス鋼は、BCC 金属であり、照射硬化に伴う脆化が炉内構造材料の健全性を評価する上で最も重要な因子である。フェライト系ステンレス鋼の照射硬化を評価するため、材料挙動予測モデルと照射データモデルの構築を行い、2つの技術を融合し、評価手法

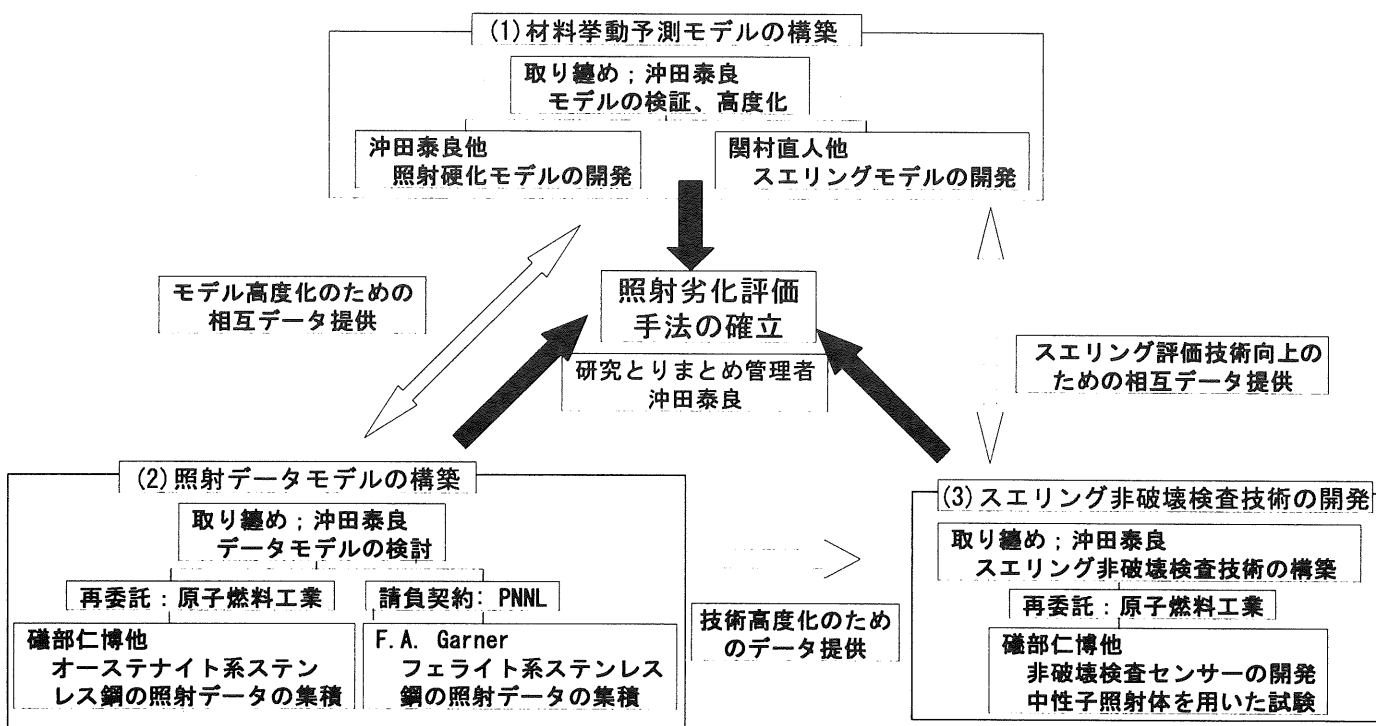


図1 本研究開発の研究体制

の高度化を行う。また、オーステナイト系ステンレス鋼においては、軽水炉炉内構造材料としても使用実績があるが、革新炉においては軽水炉より高温での使用が考えられるため、軽水炉照射条件では問題とならなかったスエリングによる体積膨張が寿命決定因子となりうる。オーステナイト系ステンレス鋼のスエリングを評価するため、材料挙動予測モデル、照射データモデル、非破壊検査の3つの技術構築、開発を行い、更にこれらを融合し、評価手法の高度化を行う。

魅力的な革新炉実現のために、各々の評価技術の構築、高度化のみならず、これらを融合させることで、様々な照射条件下で構造材料の健全性評価に適用できることが期待される。

本研究開発の研究体制を図1に示す。

### 3. 研究の全体計画

#### 3.1 材料挙動予測モデルの構築

##### 3.1.1 フェライト系ステンレス鋼の照射硬化モデルの開発

フェライト系ステンレス鋼を対象として、照射データモデルからマイクロ組織に関する情報の入力を受けて、線形弾性論と分子動力学法を用い、マイクロな観点から転位と照射欠陥の相互作用を評価する。これに基づいて、マクロ特性変化である照射硬化の予測モデルを構築する。更に、材料挙動予測モデルと照射データモデルとの比較により、材料挙動予測モデルの高度化を行う。

##### 3.1.2 オーステナイト系ステンレス鋼のスエリングモデルの開発

オーステナイト系ステンレス鋼を対象として、マイクロな観点からボイド形成、成長、転位組織発達モデル等を構築し、照射データモデルとの比較により、モデルを高度化する。これに基づいて、マクロ特性変化であるスエリングの予測モデルを構築し、照射データモデル、スエリング非破壊検査技術との比較によりスエリング予測技術を高度化する。

#### 3.2 照射データモデルの構築

##### 3.2.1 フェライト系ステンレス鋼の照射硬化に関するデータモデルの構築

フェライト系ステンレス鋼のマイクロ組織データベース、照射硬化データベースを構築し、それらを材料挙動予測モデル化の観点から整理する。

##### 3.2.2 オーステナイト系ステンレス鋼のスエリングモデルの開発

オーステナイト系ステンレス鋼のマイクロ組織データベース、スエリングデータベースを構築し、それらを材料挙動予測モデル化の観点から整理する。

#### 3.3 スエリング非破壊検査技術の開発

オーステナイト系ステンレス鋼を対象として、スエリング非破壊検査を行うための計測技術を構築する。非破壊検査試験で得られる材料物性変化は、ボイドの形成、成長の他、転位組織等にも依存する。そのため、材料挙動予測モデルに基づいて材料物性変化を解析し、様々な条件下で使用可能な検査技術に発展させ、スエリング予測モデル、照射データモデルとの比較により、高度化する。

### 謝辞

本研究は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、国立大学法人東京大学が実施した平成17年度「モデル・データ・検査融合に基づく炉内材料劣化に関する研究開発」の成果です。

### 参考文献

- [1] 関村直人、森下和功、蔵元英一、曾根田直樹、沖田泰良、平谷正人、“講座：核融合材料の照射下挙動に関するマルチスケールモデリング、1. 照射損傷過程の材料モデリング”，*Journal of Plasma and Fusion Research*, Vol.80, 2004, pp.228-235.
- [2] 曾根田直樹、沖田泰良、森下和功、蔵元英一、平谷正人、関村直人、“講座：核融合材料の照射下挙動に関するマルチスケールモデリング、2. 時間スケールの壁をいかに克服するか”，*Journal of Plasma and Fusion Research*, Vol.81, 2004, pp.318-324.
- [3] 蔵元英一、平谷正人、沖田泰良、森下和功、関村直人、曾根田直樹、“講座：核融合材料の照射下挙動に関するマルチスケールモデリング、3. 空間的な大きさのスケールの壁をいかに克服するか”，*Journal of Plasma and Fusion Research*, Vol.83, 2004, pp.492-499.
- [4] T. Okita, W.G. Wolfer, N. Sekimura, to be submitted