

1. 研究課題名：先端ナノ材料学による原子炉鉄鋼材料の脆化・劣化機構の解明と制御・予測

2. 研究期間：平成17年度～平成21年度

3. 研究代表者：長谷川 雅幸（東北大学・金属材料研究所・教授）

4. 研究代表者からの報告

(1) 研究課題の目的及び意義

我が国電力の30%強を担い、高経年化時代を迎えている原子力の安全性確保に関し、最重要の課題として原子炉圧力容器(RPV)の照射脆化などが挙げられる。本研究では、最先端の陽電子消滅、新方式アトムプローブなどを開発・応用し、脆化・劣化の原因となる照射誘起の超微小(ナノ)析出物および欠陥の形成・発展を原子レベルから解明し、それらの予測・制御へ繋げることを目的とする。

具体的には、RPV鋼やそのモデル合金中のナノCu富裕析出物(CRNP)、MnやPが関わるナノ析出物、マトリックス欠陥(MD)やPなどの粒界偏析などを明らかにする。さらにはRPV鋼やモデル合金について、これらナノ組織と照射による劣化・脆化との関係を明らかにするとともに、実機材料の機械的性質の劣化・脆化予測、次いでそれらの制御法(既存の原子炉に対しては熱処理、新規の原子炉に対しては不純物制御)の提案を行う。

特に本研究では、現在稼働中原子炉の実際のRPV鋼監視試験片(ベルギーDoe1炉(加圧水型)やアルゼンチンAtucha炉(加圧重水型)など)の解析も進め、現実の原子力発電炉圧力容器で起こっていることを調べることを第一の目的としている。これら発電原子炉で実際に起こっているナノ組織変化、欠陥形成を最先端のナノ材料学手法で解明するとともに、機械的性質との関連を明らかにすることは、材料科学の発展のみならず、原子力の安全を願う国民の期待に応えるという意義を持つ。

(2) 研究の進展状況及び成果の概要

RPV鋼中のナノ析出物の3次元アトムプローブ(3D-AP)検出効率を飛躍的に向上させるために、最新の局所電極型アトムプローブ(LEAP)システムを導入した。この装置および最先端の陽電子消滅測定装置を用い、ナノ析出物および照射欠陥の解析を行っている。なお、我が国の学術機関としては始めて(欧米でも極めて稀れ)、商用炉の監視試験片を入手したことは、特筆すべきことであり、主な成果として以下を得ている。

- a) コルダーホール炉：照射線量率が極めて低いこの炉のRPV鋼では、マトリックス欠陥よりもCuナノ析出物が優先的に生成するのに対し、それよりも照射線量率が4桁高い材料試験炉での照射では、逆にCuナノ析出物よりもマトリックス欠陥が生成する。
- b) ベルギーDoe1-1, -2炉(3~30年間の照射)：CRNPが極初期(3年間)に形成し、その後粗大化する。しかし母相に残っているCu不純物濃度は極僅かに減少するだけである。CRNP形成後、照射量とともにマトリックス欠陥が蓄積していく。この間の照射による機械的性質の変化は、脆化・劣化の予測式の範囲内に収まっているものの、そのナノ組織的な機構は、照射量によって大きく異なる。さらにLEAPの導入によって粒界近傍の元素原子分布測定に成功し、C, P, Mo, Si, Mn, Asの偏析およびCuの粒界析出を示した。また粒界Cuナノ析出物では、バルクとは異なり、MnやPなど他元素の濃縮が起こらない。

5. 審査部会における所見

A (現行のまま推進すればよい)

原子炉鉄鋼材料の脆性・劣化機構の解明は社会的にも強力な推進が期待されている重要な研究課題である。入手困難な試料を用いる実験であるにもかかわらず、局部電極型三次元アトムプローブ検出器システムを用いた原子レベルからの解析と陽電子消滅法による解析により、材料の強度低下の要因となる照射誘起欠陥の微視的構造に関する多くの有用な成果が得られている点は、高く評価できる。ただし、今後は、理論計算・材料強度学などの分野の研究者との連携を検討し、微視的レベルの現象解明と巨視的レベルの材料脆化・劣化の関係を明らかにすることが重要であり、脆化予測・制御に結びつく学理的知見の獲得に向けた研究の展開を期待する。