

鉄鋼材料照射影響機構研究の最近の進展

研究代表者

東北大学、金属材料研究所 阿部弘亨

研究分担者

東北大学、金属材料研究所 永井康介

1. はじめに

低炭素社会の実現に向けて、現行の原子炉（軽水炉）の長寿命化、高効率運転のための評価や補修に係る技術開発、および革新炉核融合炉等の次世代原子炉の開発研究は非常に重要な意義を有する。これらの発電システムにおいて、鉄鋼材料は原子炉容器、炉内構造物、燃料被覆管、ブランケット等様々な部位で利用される基幹材料である。これら原子炉材料は主に高温、高圧、冷却材に曝され、また部位によっては放射線照射という特殊な条件に置かれる。このような環境下では、照射損傷組織の形成に伴う硬化や脆化現象、また応力腐食割れや照射誘起応力腐食割れ現象等が発現する。そのため、適用環境下における当該材料の劣化モードとその度合いを明確に把握し、科学的合理性のある保守管理技術および規制評価に反映させ、将来の安全性を科学的見地から担保することには高い社会的要請がある。

一方、最近の各種分析技術の向上により原子炉材料の劣化機構解明研究は大きく進展している。その一つは nm スケールの材料解析技術である三次元アトムプローブ、陽電子消滅法、透過電子顕微鏡、中性子小角散乱等の進歩であり、例えば照射脆化の主因と考えられる不純物クラスターの照射促進析出等を明らかにしてきた。また、第一原理や分子動力学等の計算科学的手法の進歩によって、実験的に取得される複雑事象を的確に解釈し、劣化を高精度予測できるようになった。これらの科学的知見の中には規制技術としてエンドースされたものもあり、我が国の研究は質、量ともに世界を先導する水準にある。

そこで本ワークショップの目的として、原子炉に適用される鉄鋼材料の照射効果の機構解明に係る最新研究成果を収集し、照射脆化や照射誘起応力腐食割れといった重要かつ特殊な事象についての今後の研究方向性を明らかにすることとした。

2. 研究経過

原子炉圧力容器鋼の照射脆化研究、照射誘起応力腐食割れ、燃料被覆管開発、核融合炉材料開発研究に関連する研究者を広く対象にしたワークショップを平成 23 年 9 月 29、30 日の 2 日間で開催した。開催にあたり、所内申請者の阿部、永井に加えて、東京大学の関村直人教授、京都大学の義家敏正教授、木村晃彦教授、九州大学の渡辺英雄教授、日本原子力機構の鈴木雅秀博士、鬼沢邦雄博士、民間からは、電力中研の曾根田直樹博士、原子力安全システム研究所の福谷耕治博士等を中心とした組織委員会を立ち上げ、ワークショップの具体的なプログラム案を策定した。また金属学会、原子力学会等の関係者の意見を参考にした。さらに、個々の研究領域の深化を図るだけでなく、工学研究としての成果や発展を図るため大学、研究所だけでなく電力会社や関連の民間研究所からの参加者を積極的に受け入れた結果、口頭 23 件、ポスター 13 件の発表がなされた。その後、発表資料をまとめた DVD を参加者に配布した。以下に本ワークショップの詳細を示す。

日時: 2011 年 9 月 29 日 (木)、30 日 (金)

場所: 東北大学 片平キャンパス

9 月 29 日 東北大学多元物質科学研究所 材料物性棟大会議室

懇親会およびポスター発表会場 片平さくらホール 1階ラウンジ

9 月 30 日 東北大学電気通信研究所ナノ・スピン総合研究棟 カンファレンスルーム

(登壇者の所属のみ記載)

口頭発表

9 月 29 日(木) 会場 東北大学多元物質科学研究所 材料物性棟大会議室

13:00~13:05 開会挨拶

東北大 阿部弘亨

座長 北大 大貫惣明

13:05~13:25 「熱時効された鉄モデル合金のアトムプローブ観察 (仮題)」

東大 西田憲二、野本明義、土肥謙次、曾根田直樹、劉 莉、関村直人

13:25~13:45 「A533B 鋼粒界破面直下からの 3 次元アトムプローブ観察」

東北大 外山健、野沢康子、松川義孝、畠山賢彦、永井康介、西山裕孝

- 13:45~14:05 「中性子照射した原子炉压力容器オーバーレイクラッドの3次元アトムプローブ分析」
JAEA 武内伴照、西山裕孝、勝山仁哉、鬼沢邦雄、野沢康子、松川義孝、外山健、永井康介、
亀田純
- 14:05~14:25 「応力下における压力容器鋼の照射欠陥挙動」
九大 進 崇一郎、關 人史、平金晶憲、渡辺英雄、吉田直亮
- 14:25~14:45 「ナノインデンテーション法によるイオン照射材料の強度評価の新展開」
京大 笠田竜太、坂本雄太、高山嘉幸、藪内聖皓、木村晃彦
- 14:45~15:00 休憩

座長 九大 渡辺英雄

- 15:00~15:20 「再稼動する JMTR での軽水炉材料の照射試験（概要）」
JAEA 西山裕孝、笠原茂樹、知見康弘、埴悟史、中村武彦
- 15:20~15:40 「純鉄および鉄クロム合金照射試料の磁区・磁壁の直接観察」
岩手大 鎌田康寛、渡辺英雄、村上武、菊池弘昭、小林悟
- 15:40~16:00 「BCC 金属中の空孔への水素捕獲とその安定構造」
九大 大澤一人
- 16:00~16:20 「クラスターダイナミクスによる照射下微細組織変化（仮題）」
JAEA 阿部陽介、實川資朗
- 16:20~16:40 「SUS316 鋼中の格子間原子集合体の 1D 運動における熱処理の影響」
東北大 佐藤裕樹、阿部弘亨、金思雄、松永哲也、荒井重勇、田中信夫
- 16:40~16:50 休憩

座長 京大 義家敏正

- 16:50~17:10 「鉄系材料における転位ループ形成・成長挙動の照射温度依存性（仮題）」
北大 橋本直幸、朴範守、大貫惣明
- 17:10~17:30 「核融合低放射化材料のナノ粒子分散による強化」
核融合研 室賀健夫、長坂琢也、李艶芬、鄭鵬飛
- 17:30~17:50 「イオン照射手法を用いた低放射化フェライト鋼の He 効果に関する研究（仮題）」
JAEA 濱口大、谷川博康、安堂正巳、酒瀬川英雄
- 17:50~18:10 「ナノ組織から照射硬化まで（仮題）」
北大 大貫惣明、岡 弘、橋本直幸
- 18:20~20:20 懇親会+ポスター発表（会場：片平さくらホール 1階ラウンジ）

9月30日(金) 会場 東北大学電気通信研究所 ナノ・スピン総合研究棟カンファレンスルーム

座長 核融合研 室賀健夫

- 9:00~9:20 「先進燃料被覆管材料 ZrNb 合金のアトムプローブ分析」
東北大 松川義孝、齋藤健、村上有美、外山健、永井康介、金思雄、佐藤裕樹、阿部弘亨、岩井岳夫、
関村直人、篠原靖周
- 9:20~9:40 「照射 304 系ステンレス鋼のアトムプローブ観察（仮題）」
電中研 曾根田直樹、西田憲二、野本明義、土肥謙次、Peter Chou
- 9:40~10:00 「オーステナイト系ステンレス鋼の低照射領域での照射損傷」
京大 義家敏正
- 10:00~10:20 「オーステナイト系ステンレス鋼の SCC 感受性に及ぼす溶存水素・酸素濃度の影響」
京大 中川雄仁、中島徹也、濃野真広、岩間万里明、笠田竜太、木村晃彦
- 10:20~10:30 休憩

座長 東大 石野 菜

- 10:30~11:10 特別講演「鉄鋼のナノ析出利用による高強度化」
東北大 古原 忠
- 11:10~11:20 休憩
- 座長 京大 木村晃彦
- 11:20~11:40 「2 相ステンレス鋼の脆化に対する熱時効と照射の相乗効果」
INSS 藤井克彦、福谷耕司
- 11:40~12:00 「超臨界圧水冷却炉材料の開発」
NFD 鹿野文寿
- 12:00~12:20 「高速炉用高クロム鋼の高温熱時効による析出過程」
福井大 福元謙一
- 12:20~12:40 「ODS 鋼被覆管の照射後引張特性評価」
JAEA 矢野康英、山下真一郎、大塚智史、皆藤威二、小山真一、田中健哉
- 12:40~12:45 閉会挨拶

東北大 永井康介

ポスター発表

日時 平成 23 年 9 月 29 日 (木) 18:20~20:20

会場 片平さくらホール 1階ラウンジ

「原子炉圧力容器鋼の微視組織に及ぼす溶接熱及び中性子照射の影響 (仮題)」

JAEA 勝山仁哉、鬼沢邦雄、蔵本明、野沢康子、外山健、永井康介

「JMTR での軽水炉材料の照射試験 (1) 原子炉圧力容器鋼のマスターカーブ法による破壊靱性評価」

JAEA 西山裕孝、笠原茂樹、勝山仁哉、鬼沢邦雄

「JMTR での軽水炉材料の照射試験 (2) 0.5T-CT 試験片を用いた照射下き裂進展速度評価」

JAEA 笠原茂樹、知見康弘、埴悟史、西山裕孝、中野純一、中島甫

「He バブルが形成した結晶粒界の強度測定」

INSS 三浦照光、藤井克彦、福谷耕司

「9Cr-ODS 鋼酸化物粒子生成現象のその場観察」

東北大 金思雄、阿部弘亨、佐藤裕樹、松永哲也、菖蒲敬久、大塚智史、皆藤威二、山下真一郎、井上賢紀

「中性子照射した原子炉圧力容器鋼の溶質クラスターとマトリックス欠陥の硬化との対応 (仮題)」

東北大 蔵本明、外山健、武内伴照、永井康介、長谷川雅幸、義家敏正、西山裕孝

「Characterization and aging effects of 9Cr-ODS for fusion application」

核融合研 李艶芬、室賀建夫、長坂琢也、鄭鵬飛

「オーステナイトステンレス鋼における微細組織と機械的特性の相関」

北大工 岡 弘、C.X.Liu、橋本直幸、大貫惣明、N.SU、N.Jiang、山下真一郎

「Fe-Ta-C 合金による Ta 析出物の析出挙動の熱処理温度依存性」

東北大 叶野 翔、松永哲也、金思雄、佐藤裕樹、阿部弘亨、酒瀬川英雄、野際公宏、近藤啓悦、谷川博康

「ジルコニウムニオブ系合金の水素吸収挙動」

東北大 円山健志、金 思雄、松永 哲也、佐藤 裕樹、阿部 弘亨、篠原 靖周

「原子炉圧力容器鋼モデル合金の欠陥挙動の研究」

東大 村上健太、岩井岳夫、片野吉男、岩田忠夫、阿部弘亨、関村直人

「低放射化フェライト鋼の衝撃・疲労特性に及ぼすヘリウムの影響」

東北大 高橋 学、野上修平、長谷川晃

「タングステン及びタングステン合金の電気抵抗率と硬さ変化に及ぼす中性子照射の影響」

東北大 福田 誠、長谷川晃、野上修平、丹野敬嗣

3. 研究成果

圧力容器鋼の照射脆化機構研究、核融合炉材料第一壁材料研究、高速増殖炉用燃料被覆管材料研究などにおいて、電子顕微鏡法、陽電子消滅法、三次元アトムプローブ法、XAFS等を駆使し、超微小Cu析出物の検出方法の確立、可動欠陥クラスターの発見、発電炉監視試験片の初めて学術研究による照射速度効果の研究などにおいて成果を挙げている。

これらは国内のみならず海外からも高く評価されており、圧力容器鋼分野では最も重要な国際会議(IGRDM: International Group on Radiation Damage Mechanism of Reactor Vessel Steels)のTechnical Advisory committeeとして指導的立場になるなどの成果を挙げている。

4. まとめ

2011年3月11日に起こった東京電力福島第一原発の事故以降、原子力発電に対する安全性の確保は強く社会から要請されている。これに資する圧力容器鋼の照射脆化機構研究、核融合炉材料第一壁材料研究、高速増殖炉用燃料被覆管材料研究に果たす本ワークショップの役割は大きく、先導的立場にある金属材料研究所の重要性が増すばかりである。

しかし、照射脆化や照射誘起応力腐食割れといった重要かつ特殊な事象については、原子炉の高燃焼度化に伴う照射量の増加、照射されるもの(電子、中性子等)の特性の違いを正しく理解し、より詳細なメカニズムの解明が今後期待される。