

研 究 課 題 名 原子炉压力容器鋼照射脆化機構研究の最近の進展（ワークショップ）

研究代表者名
東北大学・金属材料研究所・永井康介

研究分担者名
東北大学・金属材料研究所・阿部弘亨

1. はじめに

低炭素社会の実現に向けて、原子力はこれまでに増してその重要性が再認識されている。革新炉、核融合炉等の次世代の原子炉は、現実問題として、10年単位での実用化は事実上不可能であり、今社会が最も求めているのは現存軽水炉をあと数十年、いかに安全に高稼働率、高効率で運転するかである。この観点から、原子炉構造材料の劣化、特に非常に高い信頼性を要求される压力容器鋼の照射脆化を材料科学的に解明し、将来の安全性を科学的見地から担保することは、高い社会的要請がある。

压力容器鋼の脆化機構研究は、最近、以下の点で大きな進展を見せている。第一は、ナノスケールの材料解析技術の進展、具体的には、3次元アトムプローブ（3DAP）、陽電子消滅法（PAS）、透過電子顕微鏡（TEM）、中性子小角散乱（SANS）等の最新の手法の進歩によって、脆化の主因と考えられる、不純物Cuの照射促進析出、マトリックス欠陥、不純物P等の粒界偏析、および最近議論されている Late Blooming Phase、Mn-Ni-Si クラスタ等々のナノ組織観察が、可能になってきたことである。第2に、第一原理計算や分子動力学シミュレーション等の計算科学的手法の進歩によって、上記の実験的手法の結果の解釈の高精度化を通して、ナノ組織形成機構が解明されつつあることが挙げられる。これらの進展を踏まえて、ナノ組織変化の概念を取り入れた新しいタイプの我が国発の脆化予測式も開発されてきている。

この分野における我が国の研究は質・量ともに世界を先導しており、大学、公的研究機関の研究者だけでなく、産業界や規制に携わる方々が一堂に会して最新の研究に関して議論することは大きな意義がある。また、本研究分野は、照射損傷の基礎研究やその他関連の材料研究と相互作用することによって発展してきた。狭義の压力容器鋼の研究のみに限定せず、最新の関連研究に関して議論し情報交換することも重要である。これらの目的のために、平成22年7月30、31日の2日間にわたって、東北大学金属材料研究所においてワークショップ「原子炉压力容器鋼照射脆化機構研究の最近の進展」を開催した。

なお、本ワークショップを金属材料研究所にて開催することに関しては、照射損傷研究に関する我が国の研究者コミュニティから強い要望があった。5年ほど前までは金属材料研究所の原子力関連部門が主催していたが、その後の世代交代の間、他機関（京都大学原子炉実験所、電力中央研究所、九州大学応用力学研究所等）で開催されていた。金属材料研究所は当該分野の先導者としての大きな期待を負っており、それに答えるべく本ワークショップを企画した。

2. 研究経過

原子炉压力容器鋼の照射脆化研究に関連する研究者を広く対象にしたオールジャパンのワークショップを開催する。また、個々の研究の詳細な議論はもちろんであるが、それらを統合し脆化の予測に向けた大きな研究の方向性を見いだす議論に広げることが重要である。このため、大学、国研にとどまらず、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る。このため、所内申請者の永井・阿部に加えて、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も参考にした。

その結果、54名の参加者があり、21編の発表がなされた（ちなみに、昨年（九州大学開催）の参加者28名、講演19件）。このうち、大学、公的研究機関以外の参加者：10名であった。

開催日時、場所は以下の通りである。

日時： 2010 年 7 月 30 日（金）・31 日（土）
場所： 東北大学多元物質科学研究所材料物性棟大会議室(7/30)
東北大学金属材料研究所 2 号館講堂(7/31)

経費は以下の通り執行した。

旅費 674,610 円、印刷費 48,720 円：合計 723,330 円
9 月末までに、参加者宛に報告書（講演の要約をまとめた CD-ROM）の配布をおこなった。

以下にプログラムを示す。

7 月 30 日(金)

13：30～13：35 開会挨拶 東北大学金属材料研究所 永井康介

座長 渡辺英雄

13：35～13：55 「BWR における圧力容器脆化予測」
東京電力株式会社材料技術センター 浅野恭一

13：55～14：15 「IVAR program で照射された圧力容器鋼のアトムプローブ測定（仮）」
電力中央研究所狛江研究所 西田憲二

14：15～14：35 「中性子照射された原子炉圧力容器鋼のナノ組織変化と硬化との対応」
東北大学金属材料研究所 蔵本 明

14：35～14：45 休憩

座長 鎌田康寛

14：45～15：05 「原子炉圧力容器鋼熱影響部の微視組織と機械的性質」
日本原子力研究開発機構 勝山仁哉

15：05～15：25 「A533B 鋼のイオン照射硬化の微細組織依存性」
東北大学金属材料研究所 阿部弘亨

15：25～15：45 「低温イオン照射を用いた RPV 鋼の欠陥回復特性」
東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 村上健太

15：45～15：55 休憩

座長 橋本直幸

15：55～16：15 「鉄中の格子欠陥（空孔、格子間原子）と炭素の相互作用：第一原理計算」
日本原子力研究開発機構 山口正剛

16：15～16：35 「照射効果の時間構造」
東京大学 石野 栞

16：35～16：55 「金属の照射損傷の要素過程の TEM その場観察による研究（仮）」
大阪大学超高压電子顕微鏡センター 荒河一渡

16：55～17：05 休憩

座長 関村直人

17：05～17：25 「応力下における原子炉圧力容器モデル合金の損傷形成機構」
九州大学総合理工学府先端エネルギー理工学専攻 関 人史

17：25～17：45 「低合金鋼の照射硬化に対する個別元素の影響」
原子力安全システム研究所 藤井克彦

17：45～18：15 「照射脆化に関する JNES 研究の最新状況について」
（独）原子力安全基盤機構 松澤 寛

18：30～20：30 懇親会（金研会議室）

7 月 31 日(土)

座長 蔵元英一

9:00~9:20 「炭素の影響を考慮した原子炉压力容器鋼における照射誘起粒界リン偏析の数値シミュレーション」

日本原子力研究開発機構 海老原健一

9:20~9:40 「イオン照射した鉄鋼材料における超微小硬さ」

京都大学エネルギー理工学研究所 笠田竜太

9:40~10:00 「イオン照射した Fe 二元系合金の照射硬化挙動」

京都大学エネルギー科学研究所 藪内聖皓

10:00~10:10 休憩

座長 永井康介

10:10~10:30 「タングステン空孔での水素捕獲とその安定構造」

九州大学応用力学研究所 大澤一人

10:30~10:50 「ジルコニウム水素化物に及ぼすイオン照射影響評価」

京都大学エネルギー理工学研究所 大野直子

10:50~11:10 「オーステナイト系ステンレス鋼のボイドスウェリング潜伏期間内の損傷組織」

京都大学原子炉実験所 義家敏正

11:10~11:20 休憩

座長 阿部弘亨

11:20~11:40 「原子炉压力容器オーバーレイクラッドにおける熱時効による微細組織変化の 3 次元アトムプローブ分析」

日本原子力研究開発機構 武内伴照

11:40~12:00 「中性子照射された 304 ステンレス鋼中の Ni-Si 析出物の 3 次元アトムプローブ観察」

東北大学金属材料研究所 外山 健

12:00~12:20 「照射ステンレス鋼の変形挙動に対する固溶水素の影響」

(株) 原子力安全システム研究所 三浦照光

12:20~12:25 閉会挨拶 東北大学金属材料研究所 阿部弘亨

3. 研究成果

多くの興味ある研究成果が発表され、実りある熱心な討論が行われた。

3次元アトムプローブ法、陽電子消滅法、透過電子顕微鏡法等の最新手法を駆使したナノ組織解析や、それらと機械的特性との対応について、特に、照射速度の影響、Cu, Mn 等の不純物・溶質元素の影響、熱影響部等が議論された。また、イオン照射にナノ硬度測定と電気抵抗測定を組み合わせた研究、引張り応力下での照射損傷発達、第一原理計算による粒界脆化評価、なども報告された。

また、压力容器ステンレスオーバーレイクラッドの相分離の研究や、高照射ステンレス中に形成する NiSi クラスター、ステンレスの変形挙動、ボイドスウェリング等の関連材料の研究の他、W の水素捕獲の第一原理計算、転位の一次元運動の TEM 内その場観察等の基礎研究も報告された。

次ページに、これらの抜粋を示す。

4. ま と め

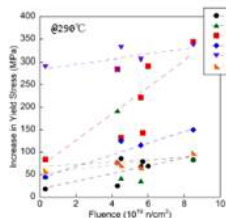
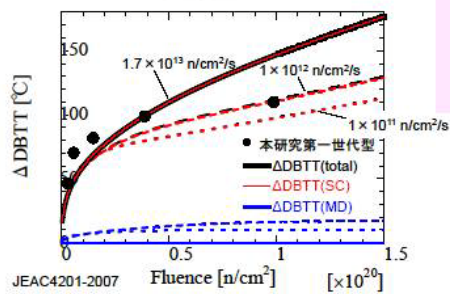
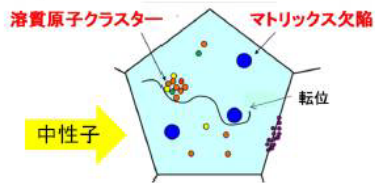
本ワークショップを通じて、金属材料研究所がこれからも我が国の照射損傷研究を先導していくことを国内の研究者に明確に示すとともに、国内の研究者コミュニティの一層の交流・発展にも寄与することができた。また、具体的な研究成果の講演（前述）に加えて、産業界のニーズ、規制側のニーズ等の情報共有がなされ、压力容器鋼の照射脆化機構研究の今後の方向性についての重要な示唆を得ることができた。例えば、60-80 年運転を見据えたより高照射量領域の研究の重要性、実機と試験炉の違いを正しく理解してより高精度の予測につなげること、などである。これらに加えて、関連研究の講演から、压力容器鋼の研究への応用や貴重な示唆も得ることができた。

最後に、来年度以降の開催についても、参加者より強く期待された。

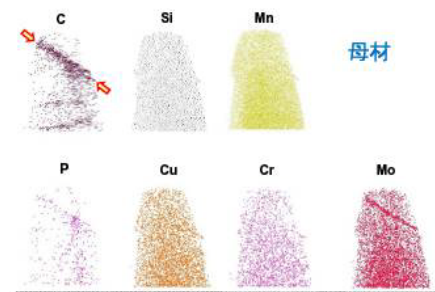
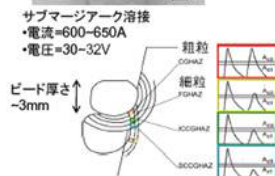
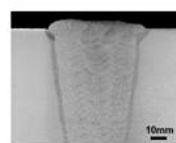
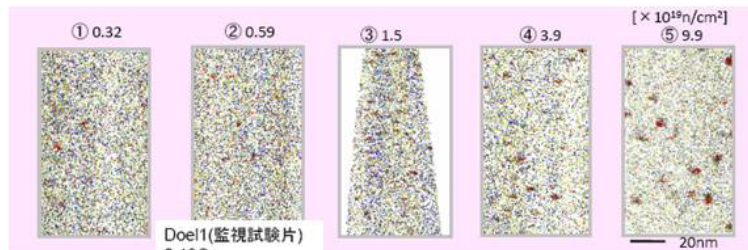
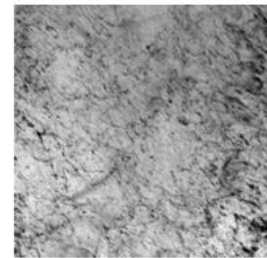
ミクロ組織: 3次元アトムプローブ、陽電子消滅、TEM

機械的特性の対応

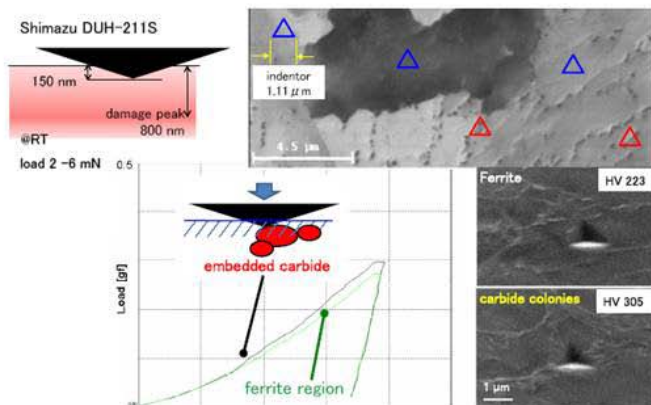
脆化の主因となるナノ組織変化



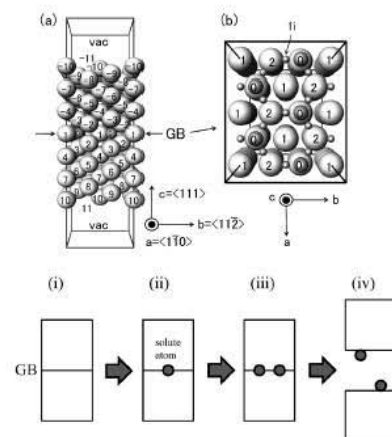
照射速度の影響
Cu, Mn濃度の影響
熱影響部
...



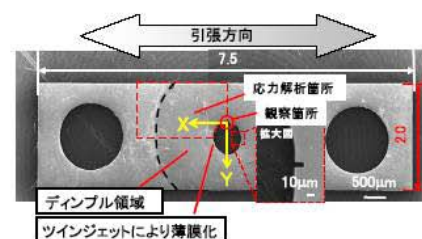
イオン照射+ナノ硬度測定+電気抵抗



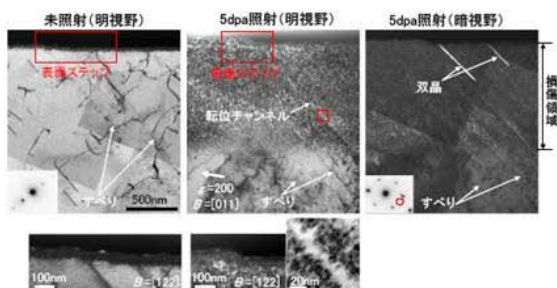
第一原理計算による粒界脆化評価



応力下の照射損傷発達



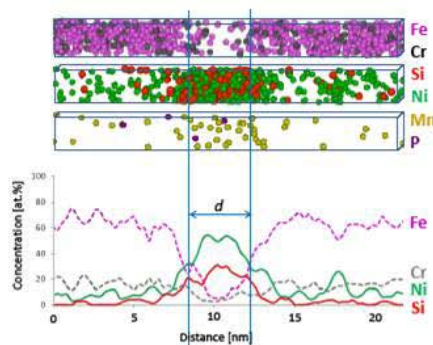
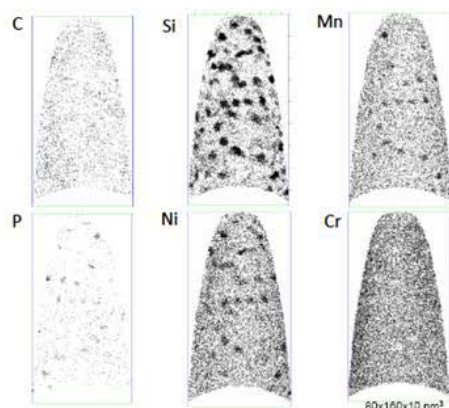
ステンレス変形挙動←→固溶水素 @300°C



ステンレスオーバーレイクラッド



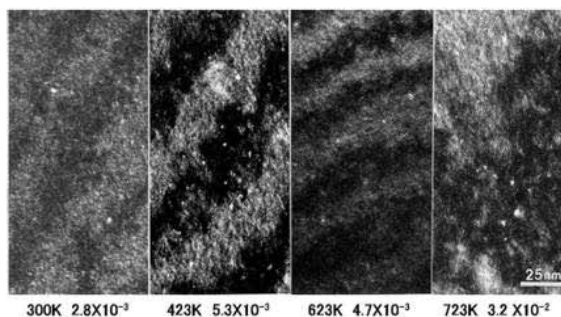
ステンレス高照射量: NiSiクラスター形成



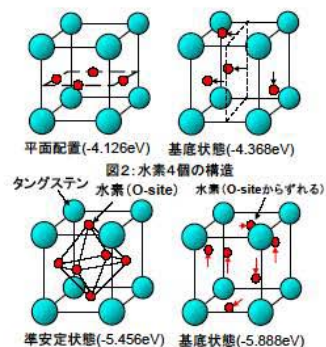
転位の1次元運動のTEM内その場観察



ステンレスのボイドスウェリング潜伏期間の照射損傷



W空孔への水素捕獲の第一原理計算



Zr水素化物の照射損傷

