

Nuclear Materials Letters

(2011 年 2 月)

(部会ホームページ <http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/division/material/>)

目次

I.	巻頭言 部会長新任の挨拶	3
	東北大学 四竈樹男	
II.	特集「新しい JMTR を活用した材料研究」	4
1.	緒言	4
	(株)東芝 鹿野文寿	
2.	新しい JMTR	5
	日本原子力研究開発機構 河村 弘	
3.	JMTR の軽水炉への適用 (高経年化対応)	10
	日本原子力研究開発機構 鈴木雅秀	
4.	JMTR の次世代炉への適用	14
	京都大学 木村晃彦	
5.	JMTR を利用した基礎研究	19
	東北大学 四竈樹男	
6.	JMTR へのユーザからの要望	22
	京都大学 笠田竜太	

III.	第9回「材料」夏期セミナー報告	24
	日本原子力研究開発機構 安堂正己、若井栄一	
IV.	Nuclear Materials 2010（第1回原子力材料国際会議）報告	27
	京都大学 笠田竜太	
V.	研究室紹介	29
	八戸工業大学 佐藤研究室	
VI.	行事等のお知らせ	31
VII.	運営委員会名簿	32
VIII.	寄稿のお願い	32
IX.	編集後記	32

I. 巻頭言

東北大学 四竈樹男

平成 22 年度材料部会長への就任にあたりましてご挨拶申し上げます。

世界が大きな変曲点の中にあり，日本はその中で波間に漂う小舟のように漂っているような感覚がありますが，客観的には，日本は私の感覚よりはるかに大きな存在でそれになり慣性を保持しつつ行方を定めているのだと思います。原子力も過去 50 年にわたる蓄積を今から積極的に活かしていく時期に差しかかっているのだと確信しております。



材料部会もその長い歴史の中で新たな局面を迎えようとしております。先日，はからずも部会を設立する経緯を最もよく知る先達お二人の先生とご一緒する機会に恵まれ，今更ながら，材料部会の三世代にわたる歴史を実感いたしました。材料科学工学は工学のクイーンテクノロジーと言われますが，その中には原子レベルのディテールにわたる部分から複数の巨大システムにまたがる普遍的な現象まで非常に幅広い概念を縫合する分野であります。その意味で，他の部会との相互作用が最も強く感じられるところでもあると自覚しております。基本的には，部会の存在意義を尊重し部会の健全な発展に貢献する努力をしつつ，より広い立場から原子力全体の発展に部会として貢献できればと祈念しております。部会活動は学会活動の基本を支えるものであることを実感しつつ，これまでの受動的で不動態的な自身の活動を老いの身で深く自省し，若い方々からの支援に支えられ一年間の活動に資することが出来ればと祈念しております。

2011 年 2 月

II. 特集「新しい JMTR を活用した材料研究」

1. 緒 言

(株)東芝 鹿野文寿

原子力プラントに対しては、常に高い安全性が求められ、それには材料の健全性の確保と高精度な寿命評価技術が不可欠である。そのためには基礎となる材料照射データの蓄積、照射損傷のメカニズムに基づく評価技術の確立とその後の実証が必要である。これらの要求を満たすためには、照射量、照射速度、照射温度、中性子スペクトル等を制御した照射試験技術を確立、維持しておくことが重要である。

これらの期待に応えるべく、JMTR の再稼動計画が進められている。JMTR は燃料、材料の耐久性、健全性の試験や基礎研究、RI の製造等に国内外の機関から広く活用されてきたが、施設の老朽化対策や幅広い分野のニーズに応えるべく、設備の更新と改良が行われている。新しい JMTR の利用については、核燃料、水化学、核融合等、様々な分野から大きな期待が寄せられ、多くの研究者や運営者がその利用や運用に対して検討を進めている。

材料研究分野では、原子力学会の材料部会活動の中で、産・官・学の研究者が共存する場として、JMTR のあり方について議論が行われ、それぞれの立場から意見が寄せられてきた。これらの意見をまとめておくことは意義があることと考え、材料部会編集小委員長(当時)として提案し、部会報に特集記事が組まれることとなり、部会員の各関係者の方々に寄稿をお願いした。本報告は、新しい JMTR の特徴、種々のプラントへの適用、基礎研究への適用、ユーザーからの要望から構成されている。

今後、部会を横断した学会全体で JMTR のあり方について議論が進められ、更なる有効活用につながることを期待している。

2. 新しい JMTR

日本原子力研究開発機構 河村 弘

1. はじめに

日本原子力研究開発機構が保有する JMTR (Japan Materials Testing Reactor, 50MW)は、国内最大の熱出力を誇る軽水減速・軽水冷却型の照射試験炉であり、これまで国内の発電用軽水炉燃料や材料の中性子照射試験を中心に高速炉、高温ガス炉、核融合炉等の燃料・材料照射試験や医療用ラジオアイソトープの製造等に活用されてきたが、1968 年の臨界から 38 年が経過し、施設の高経年化も進んできたこと等から、2006 年 8 月までの運転完了をもって一旦停止した。

その後、多くの照射利用者から国内唯一の照射試験炉としての JMTR の運転再開についての強い要望を受け¹⁾、さらに、原子力委員会、原子力安全委員会、総合科学技術会議等において、幅広い分野の利用ニーズに応えるべく早期に JMTR を再稼働すべきであるとの提言を受け、日本原子力研究開発機構は、JMTR を改修し、再稼働することを 2006 年 12 月に決定した。

JMTR は 2007 年度から原子炉施設の改修を開始しており、図 1 に示す改修後の JMTR に期待される役割であると共に世界共通の研究課題でもある軽水炉の長期化対策、産業利用の拡大等の照射ニーズに対応していくため、2011 年度から再稼働を行う計画である。

再稼働後は約 20 年間利用し、2030 年度頃まで運転を行う計画である。現在は原子炉施設の改修を計画通り進めていると共に、再稼働の準備として、原子炉稼働率 50%~70%を目指した運転、早く結果が得られるようターンアラウンドタイムの短縮、照射手続きを簡素化し技術支援体制を充実させる等、利用性の向上のための取組み、アジアの中核試験炉として国際協力体制を構築する等、国際的拠点化を達成するための活動を実施している。更に、JMTR 及び隣接するホットラボ施設群での次世代軽水炉の開発や医療用ラジオアイソトープ製造技術の開発等「グリーン・イノベーション」や「ライフイノベーション」を支える研究環境整備を実施するため、2010 年度から 3 年間で、JMTR に最先端照射設備を整備するための取組みを実施している。

2. 改修の現状

JMTR の改修は図 2 に示すように更新箇所が原子炉施設の多岐にわたっているため、効率的な改修工事が実施できるよう、改修工程は、表 1 に示すように、最



図 1. 新しい JMTR に期待される役割



図 2. 原子炉機器の更新状況

表 1. 原子炉機器の更新工程

項目		年度	H19	H20	H21	H22	H23	進捗状況(9月24日現在)
原子炉本体	ベリリウム棒、ガンマ線遮蔽板、等			設計、製作、据付				更新完了
計測制御系統施設	核計装、プロセス計装、安全保護回路			設計、製作、据付				製作中 (H23年3月完了予定)
原子炉冷却系統施設	一次冷却設備、二次冷却設備、等			設計、製作、据付				製作中 (二次冷却系統設備は完了)
放射性廃棄物廃棄施設	炉室給排気系統排水設備			設計、製作、据付				更新完了
電源設備	高圧電源盤、変圧器、ケーブル等		設計、製作、据付					更新完了
ボイラー等	ボイラー、冷凍機		設計、製作、据付					更新完了
純水製造設備	脱気純水系統、一般純水系統		設計、製作、据付					更新完了

初に電源設備、炉室給排気系統等の原子炉のユーティリティ設備の更新工事を行い、その後、計測制御系統等、原子炉建家内の更新工事を行うよう計画した²⁾。これまでに原子炉のユーティリティ設備の更新を計画通り完了させ、現在、計測制御系統、原子炉冷却系統等の更新工事を計画通り実施している。

3. 魅力的な照射試験の提案

新技術の開発、近隣の照射後試験施設群の活用等により、技術的価値の高い照射データを提供していくための取組みを実施している。図 3 に JMTR が有する照射技術と新たに開発している計測技術の例を示す。特に、針のように細い熱電対で最大 7 点の測定を可能とする技術^{3,4)}は、世界初の技術であり、軽水炉用の燃料試料の照射試験に関して、これまで実施することができなかった、照射中の燃料ペレットの温度分布が測定可能になる等、JMTR を利用

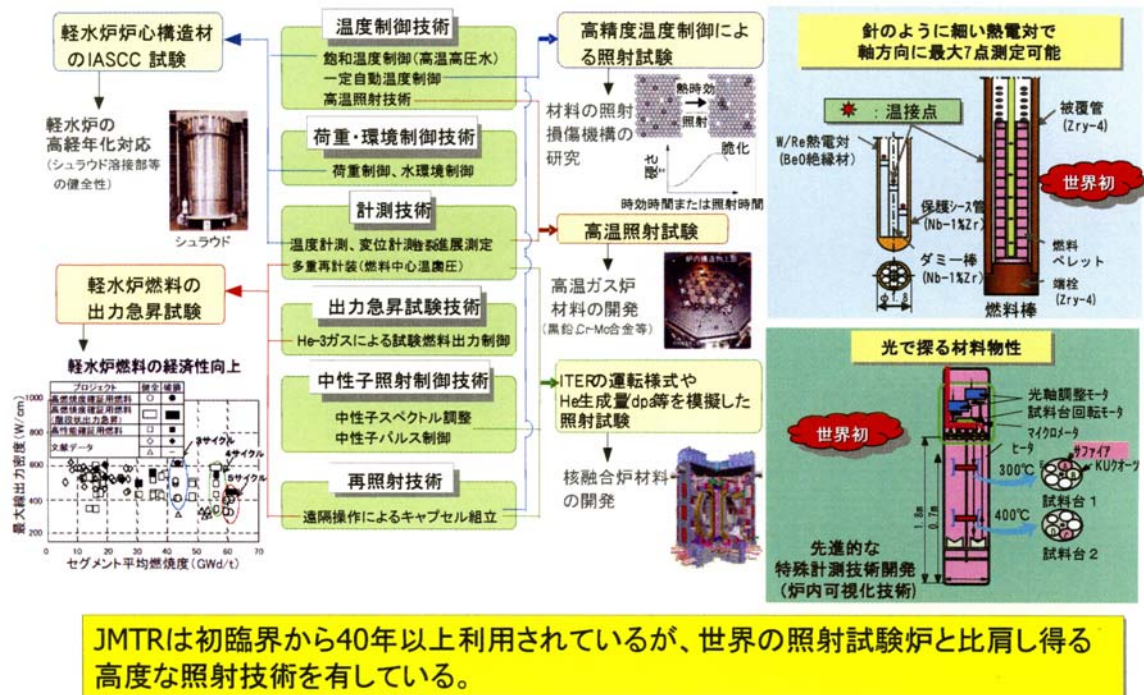


図3 JMTRが有する高度な照射技術

した軽水炉関連の研究開発の大きな進展が期待されている。

4. 最先端照射設備の整備

文部科学省の行う最先端研究基盤事業の補助対象事業に「世界最先端研究用原子炉の高度利用による国際的研究開発拠点の整備」事業が選定され、図4に示す最先端照射設備等の整備を2010年度から開始した。これら整備は、2012年度までに完了し、2013年度からは、照射試験炉を利用した世界共通の研究課題である現行軽水炉の長期化対策、次世代軽水炉開発、将来社会に向けた新たなる原子力エネルギー開発、医療用 ^{99m}Tc の増産による国民の医療福

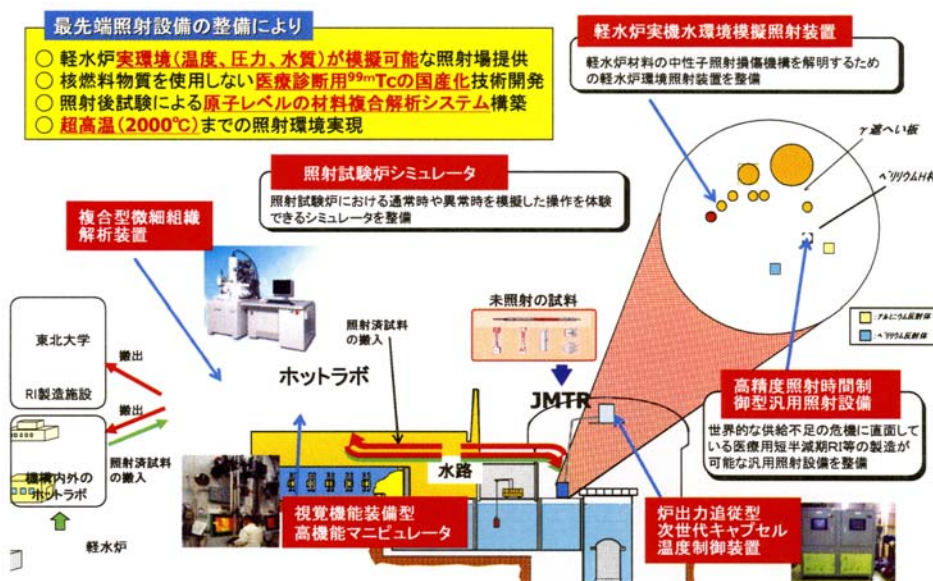


図4. 「グリーン」と「ライフ」を支える最先端研究基盤の構築

祉等に貢献していくと共に、人材育成にも貢献していく予定である。

5. 国際的拠点化に向けた取組

JMTR の国際化に際しては、図 5 に示すように、世界の照射試験炉がユーザを奪い合うような狭い視点ではなく、世界のユーザが最適照射試験炉を利用できるための世界的な中性子照射試験に関する標準場の創成により海外の需要を喚起するという広い視点に立つとともに、照射スケジュールの調整など照射利用の相互補完的な国際協力関係の構築を目指している。日本原子力研究開発機構が世界各国に呼びかけて汎用照射試験炉に関する国際会議⁵⁾ (International Symposium on Material Test Reactors) を組織し、第 1 回は 2008 年 7 月に日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターで開催した。第 2 回は 2009 年 9 月に米国 Idaho National Laboratory、第 3 回は欧州チェコの Nuclear Research Institute で 2010 年 6 月に開催され、第 4 回は南米アルゼンチンのバリローチェで開催予定である。この国際会議の枠組み等を通じ、照射試験炉のワールドネットワークを構築するための活動は定着しつつある。

具体的には、欧米原子力先進国との関係を強化し、中性子ドジメトリー、照射技術等の標準化により、統一性のある「世界的な中性子照射試験に関する標準場」の創成を行う。また、「照射利用の相互補完的な国際協力関係の構築」を目指して、欧州諸国との連携強化を進めている。

一方で、アジアには、既に原子力発電を導入している国、これから導入しようとしている国、全く導入計画の無い国など、様々な国がある。アジアの動力炉導入国において、動力炉が安全に運用されてゆくためには、各国が安全に係わる基盤施設を整備することが必要である。

しかしながら、全ての国において安全に係わる研究基盤施設を整備することは困難と考えられることから、アジアネットワークを構築し、JMTR が、アジア諸国の安全規制等に必要

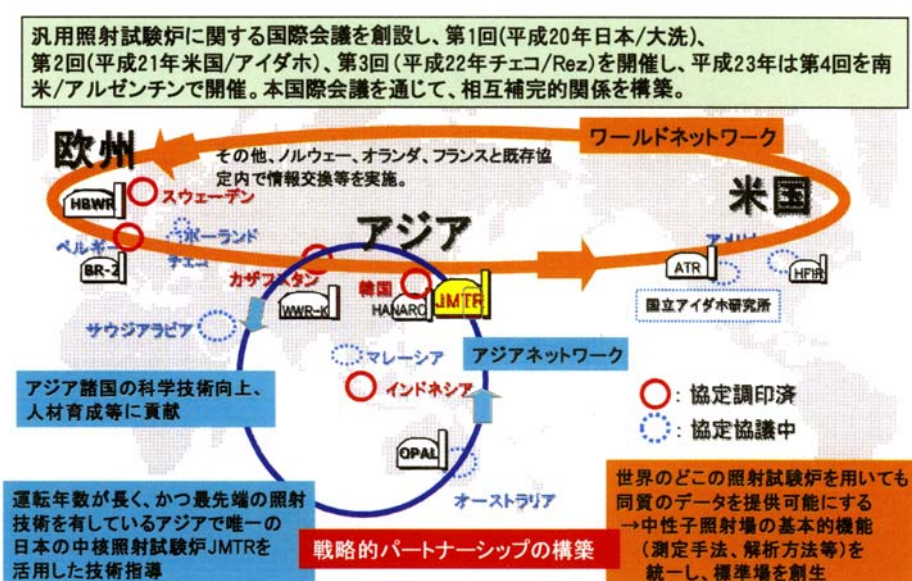


図 5. 国際的拠点化に係る取組み

なデータ取得のためのアジア共通の中核照射試験炉となることを目指した活動を実施している。

6. まとめ

平成 23 年度の再稼働に向け、現行軽水炉の高経年化対策等に対応するための新たな照射試験設備の整備を実施すると共に、再稼働後に魅力的な照射試験を提案していくための準備として、照射計装機器、照射後試験設備の開発、技術的価値の高い照射データを提供していくために必要な中性子照射場評価技術の開発を実施している。

また、JMTR の産業利用の拡大を目指し、現在その全てを輸入に頼っている放射性医薬品の原料である ^{99}Mo の国産化に関する技術検討も実施している。2010 年度からは、再稼働に向けた本格的な準備を開始している。

さらに、最先端照射設備等の整備を行い、軽水炉の長寿命化等に係る安全研究や原子力人材育成を行うとともに、アジア諸国の原子力ニーズに対応した研究開発協力を実施し、国際的な研究開発拠点を構築する。

参考文献

- 1) JMTR 利用検討委員会：“我が国における材料試験用原子炉の役割と JMTR のあり方等に関する検討報告書”，2006.
- 2) 河村弘：“汎用照射試験炉 JMTR の改修状況と国際的拠点化を目指した取組み”，保全学 Vol.8 No.4, 2010.
- 3) K. Tsuchiya, H. Kawamura, Y. Nagao : “Breeding Blanket Development - Tritium Release from Breeder -”, JAEA-Technology 2005-003, 2005.
- 4) 綿引俊介, 斎藤 隆, 土谷邦彦, 小原浩史, 飯村光一：“高温用 N 型多対式熱電対の開発”，JAEA-Technology 2008-044.
- 5) M. Ishihara, H. Kawamura, (Eds.), “Proceeding of the International Symposium on Materials Testing Reactors”, JAEA-Conf 2008-011, 2008.

3. JMTR の軽水炉への適用（高経年化対応）

日本原子力研究開発機構 鈴木雅秀

1. 高経年化対応と照射試験施設

我が国の軽水炉は現在 54 基が運転中であるが、平成 22 年現在、運転開始後 40 年に到達したプラント 2 基も含めて、30 年以上のプラントは総数 20 基となっており、軽水炉プラントはまさに高経年化の時代を迎えている。数 10 年と言う長期に渡って原子力発電プラントの安全を確保していくためには、高経年化対策に関連する規制、規格基準、安全基盤研究などのリンクが極めて重要であり、合理的なリンクの仕組みが様々な局面や観点に対して構築しないと行けない。その中で、JMTR を含めた施設基盤は、高経年化に伴い発生する様々な課題に対する安全基盤研究を支えるものであり、高経年化対策の中で不可欠な構成要素となる。一方で、最新知見に基づいて高経年化を評価していく上でも、関連する保全活動ともリンクさせていくことが重要であって、これが 2008 年度からスタートした新検査制度の重要な考え方であり、法令上の要求にも既に取り入れられている。規格基準も連動して進展しており、例えば、高経年化対策に関する学会標準¹⁾（原子力発電所の高経年化対策実施基準 2008、(社)日本原子力学会）では、2008 年版で高経年化対策という用語の再定義を行い、30 年という供用期間に拘らず、運転初期にまで遡り一連の活動を高経年化対策としている。

高経年化対策に関連してどういう経年劣化事象が必要かを見てみると、上述の実施基準では、プラント構造材料等に対して 30 年運転時に高経年化技術評価の対象とすべき経年劣化事象として次の 8 事象を挙げている。①中性子照射脆化、②照射誘起応力腐食割れ (IASCC)（照射下クリープ、照射スウェリング含む）、③低サイクル疲労、④高サイクル熱疲労（温度ゆらぎ）、⑤電気・計装品の絶縁低下、⑥ 2 相ステンレス鋼の熱時効、⑦コンクリートの強度低下及び遮へい能力低下、⑧ フレッチング疲労。これらのうち、原子炉圧力容器に生ずる中性子照射脆化 (①) と炉内構造物で生じる IASCC (②) の二つは、中性子やガンマ線などの放射線の影響が大きい事象であり、その他、ケーブルの絶縁低下 (⑤) やコンクリート (⑦) も放射線の影響評価が課題のひとつになっているが、今後、60 年を超えたさらなる長期供用等を考えていく上でも、引き続き重要な課題と考えられている。

高経年化技術評価では運転開始後 30 年時を前に、60 年までの供用を仮定して構築物や機器の健全性を評価するので、予測の外挿性が科学合理的に裏付けられていることが必要である。また、これから先に起こりうる未知の現象への迅速な対応を可能にするためにも、試験研究による経年劣化のメカニズムの把握が極めて重要である。特に放射線の影響下で生ずる現象は、影響因子も多くメカニズムが複雑なため予測は高精度な試験研究に基づいて行う必要がある。実際、放射線影響を調べるための試験研究を実施しようとする、材料試験炉やガンマ線の照射試験施設とともに高度な測定・分析機器等を備えた照射後の試験施設が必要となる。安全規制においても単なる実証試験でなく、このような基礎に裏付けられたデータが求められていることは昨今の特徴と言える。

このような前置きの下に、平成 23 年度の JMTR の再稼働に合わせて、照射試験装置の整

備を進めている、高経年化に係る JMTR を用いた材料照射試験について、その概要を紹介する。なお、高経年化に関わる技術課題については役割分担、試験施設なども含め、産官学によって毎年検討され高経年化対応技術戦略マップとして纏められている²⁾。

2. 高経年化に係る JMTR を用いた研究計画の概要

(1)中性子照射脆化

圧力容器に使用される低合金鋼は、炉心からの中性子を受けると、シャルピー衝撃試験における延性脆性遷移温度 (T_{41J}) が上昇するとともに、上部棚吸収エネルギー (USE) が低下する。このような中性子照射脆化については、関連報告も多いので内容の説明は割愛するが、照射脆化の進行については、脆化予測式が作成されており、電気技術規程の最新版では、脆化の原因となるマイクロ組織等の最新の知見を取り入れた機構論的な予測式を採用している³⁾。脆化予測式の検証や更なる信頼性向上を図るためには、高照射量側のデータを拡充するばかりでなく、中性子束、照射温度、化学成分、熱処理・熱履歴、初期マイクロ組織の効果についての十分な知見が必要である。今後とも脆化機構解明からの研究は重要であり、これらの個別効果を把握するための JMTR を始めとする材料試験炉の役割は大きい。

一方、構造健全性を確認する上で最も厳しい想定事象は、PWR の原子炉圧力容器では加圧熱衝撃 (PTS: Pressurized Thermal Shock) になる。PTS は事故時の安全対策として炉心への大量の冷却水が注入されることにより生じる過渡事象であり、圧力容器内面には過大な引張応力が熱応力により生じる。健全性評価には、圧力容器内面にき裂の存在を仮定し、照射脆化、PTS 事象時に発生する過大応力を考慮し、破壊力学的解析が行われる。破壊力学的解析で最も重要な材料特性は、延性脆性遷移領域での破壊靱性値(KIC)である。中性子照射を受けた圧力容器鋼材に対する KIC は、通常シャルピー衝撃試験結果を用いて間接的に評価されるが、シャルピー衝撃特性と破壊靱性の脆化に関する等価性がその前提となる。KIC が直接評価できれば、信頼性が一層向上できるが、評価には大型試験片が必要である。これに対し最近の大きな進展として、

マスターカーブ法の開発が挙げられる (図 1 参照)。これは、最弱リンク理論に基づく寸法補正とワイブル分布を仮定した統計手法等を用い、標準サイズとして 1 インチ厚さのコンパクトテンション型破壊靱性試験片 (1T-CT 試験片) でかつ比較的少数の試験片で破壊靱性 (遷移曲線) を求められる。監視試験等に適用するためにはさらに小型化が必要であり、

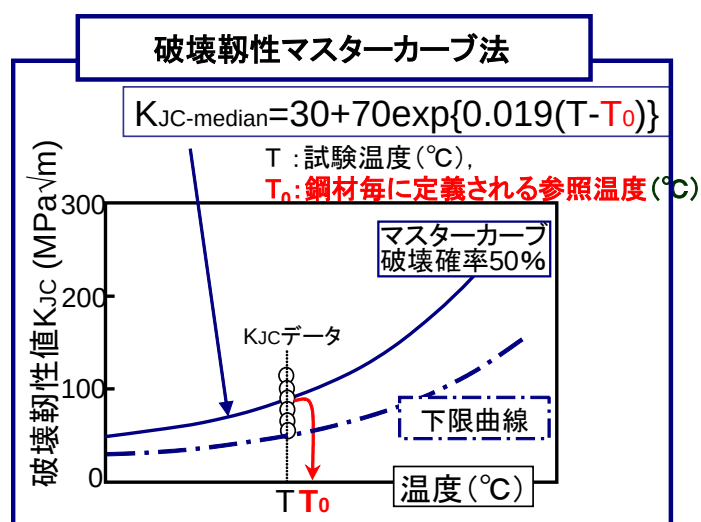


図 1. 破壊靱性マスターカーブ法による評価

国内でも検討が進められている。

これまでの JMTR では、照射孔の寸法の制約から、1T-CT 試験片は大きすぎて装荷できなかった。一方で、照射試験片体積が大きくなると、ガンマ発熱により目標の照射温度の設定が困難になる。このため、1T-CT 試験片で、供用 60 年以上に相当する照射量が達成でき、かつ照射温度が制御可能であることを付帯条件として、新たに外径 110mm の照射孔の整備を進めている。現在までに、技術的に可能であるとの見通しを得ており、これにより照射による破壊靱性曲線の変化（シフトや形状）を検討し、より小型化した破壊靱性試験片から得られる破壊靱性評価手法の妥当性の確認を行っていく計画である⁴⁾。

(2)照射誘起応力腐食割れ(IASCC)

IASCC とは、中性子照射を受けたステンレス鋼が高温高压水中で粒界型応力腐食割れを生ずる現象であり、SCC の 3 要素、材料、環境、応力に、さらに中性子、ガンマ線の照射影響が重畳した経年変化事象である（図 2 参照）。複雑な事象であることも相俟って、機構に関してはまだ確定されたとと言える状況にはない。その中で今後どのように、IASCC 発生・進展データを取得・整備し、IASCC メカニズムを解明し、評価技術としてまとめ、規制基準に反映していく必要がある。

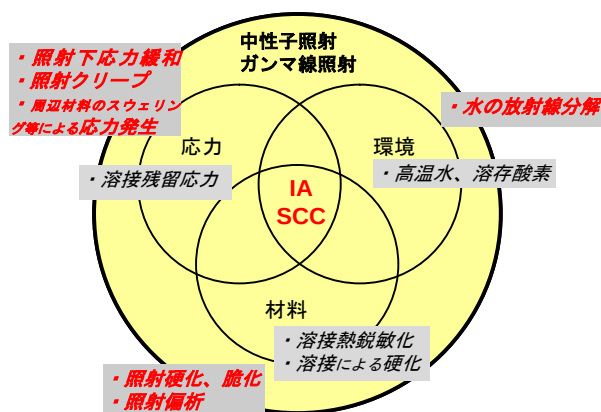


図 2 IASCCに影響する因子

材料特性として中性子照射に伴う蓄積的な変化が本質的に重要であるため、ミクロ組織の変化（及びそれに伴う硬化などの機械的性質の変化）、粒界性状の変化（照射誘起偏析等）など、損傷組織の基本的な把握と理解が重要である。また、健全性評価にもつながる応力への照射影響（照射下応力緩和、応力発生源としてのスウェリング特性）、さらには脆化特性の把握が重要になる。これらは、照射速度の効果、重畳効果など、実機との相関が課題ではあるが、基本的には材料試験炉に期待されるものと言える。また、IASCC 評価体系全体を見たとき、き裂発生・進展に関する信頼性の高い IASCC データ取得は根幹の部分となる。炉内水質の効果を明確化する上でも、材料試験炉における照射下試験は、炉外データの検証、実炉との相関のための橋渡しとして、IASCC という複合事象の評価手法の確認に必要なものと考えられる。

図 3 は、JMTR で計画中の照射下 SCC 試験について、中性子照射量とガンマ線量率の関係を他の IASCC 試験研究との関係が分かるように図示したものである。ガンマ線量率から見た場合、JMTR での試験は

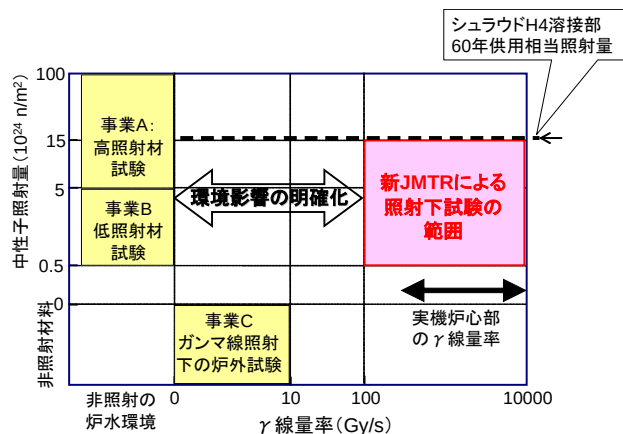


図 3 各IASCCにおける照射環境の範囲

実機炉心部と同等である。現在、炉水環境を模擬するために、高温高压水を照射キャプセルに供給できる水環境調整設備を整備しており、照射下き裂 SCC き裂進展試験を、水質評価技術のこれまで以上の高度化と合わせて、計画中である。

3. まとめ

現在、燃料及び材料を合わせ、整備を進めている照射試験設備の構成模式図を図4に示す⁵⁾。上記で紹介した以外に、材料試験としては制御棒用ハフニウムの照射試験も計画している。これらは平成23年度のJMTR再稼働に合わせて、国の安全研究のニーズに応えられるよう、照射試験設備を整備して照射試験を行うものであるが(*)、JMTRの活用は今後官側のいわゆる安全研究だけでなく、学・産の安全基盤研究へ、各種の奥深い照射研究の課題解決へと広がっていく契機になることを期待したい。

*経済産業省原子力安全・保安院からの委託「軽水炉燃材料詳細健全性調査」として実施している。

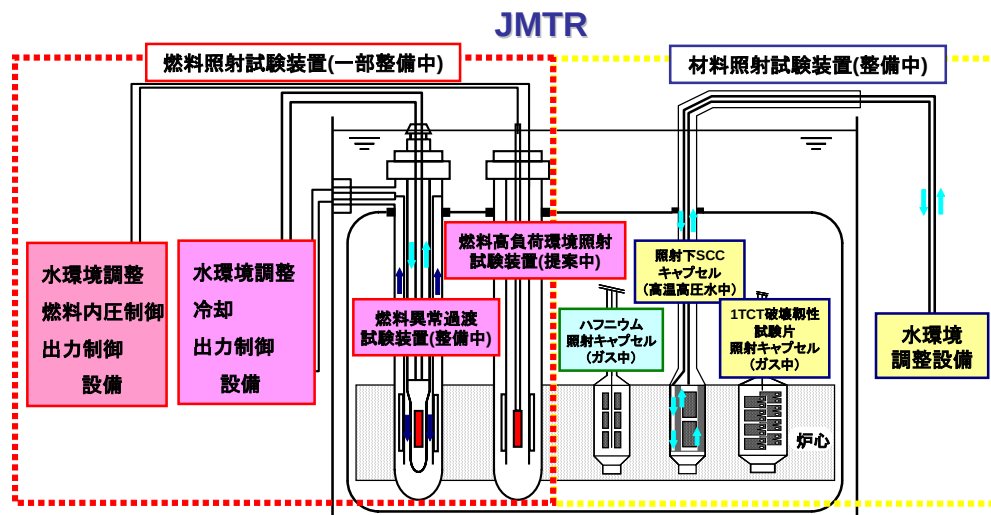


図4 軽水炉材料・燃料関係の照射設備の全体

参考文献

- 1) (社)日本原子力学会標準「原子力発電所の高経年化対策実施基準」2008、日本原子力学会、2008.
- 2) 高経年化対応技術戦略マップ 2009、平成21年7月 (独)原子力安全基盤機構
- 3) 電気技術規程 原子力編「原子炉構造材の監視試験方法」JEAC 4201-2007.
- 4) 西山裕孝、知見康弘、伊勢英夫、中村武彦、石塚悦男、塚田隆、日本原子力学会秋の大会要旨集 N48、2008年9月、高知
- 5) T.Nakamura, S.Hanawa, J.Ogiyanagi, H.Sasajima, J.Nakamura and H.Kawamura, “Fuel Irradiation Test Plan at the Japan Materials Testing Reactor”, 2008 Water Reactor Fuel Performance Meeting, October, 2008, Korea.

4. JMTR の次世代炉への適用

京都大学 木村晃彦

1. はじめに

JMTR の重要なミッションの一つとして、原子炉プラントの高経年化に向けて、原子炉を高効率にしかも安全に利用するための原子炉材料照射試験研究を位置付けることに関しては、議論の余地は無いと思われる。一方、燃料の高燃焼度化や運転温度の高温化に対応する原子炉材料開発研究における最大の関心事は、材料の耐照射性能であろう。その意味において、次世代炉材料の開発とそれをターゲットとする照射研究においては、中性子フラックスの低い JMTR を用いた研究の重要性は、一見、低いように思われる。しかし、JMTR 照射研究には、材料科学的に重要な意義があると認識されており、ここではそこに焦点を当ててみる。

2. 材料開発における照射研究

次世代炉材料の要件の中で最も重要視される耐照射性能の付与のための技術開発においては、高い照射量までの照射効果挙動を確認しておく必要がある。具体的には、対象となる照射環境下での照射効果の照射量依存性および照射温度依存性を明らかにしておくことがあげられる。照射効果は、照射前後における材料特性や性能の変化によって示される。照射前の熱影響評価においては、一般に温度が低い場合は、材料組織変化は小さいが、温度が高くなると、熱時効に伴う組織変化と材料のマクロ挙動変化が生じるようになる。場合によっては、熱的影響が照射影響を凌駕する場合も当然あり得る。

通常、照射効果は、熱的平衡状態への組織変化を促進する場合と非平衡組織を創成する場合の二つに分類される。前者は、照射により、組織変化の担い手である空孔（あるいは格子間原子）が多量に導入されることによる。このことは、(1)式を見れば明確である。(1)式は熱的な組織変化の速さの度合いを示す固体中の原子の拡散係数を表している。拡散の活性化エネルギー (E) は、空孔の形成エネルギー (E_F) と移動のエネルギー (E_M) の和で表され、(1)式を変形すると、拡散係数は、空孔濃度と空孔移動頻度の積に比例することが判る。非照射の場合は、空孔濃度はその温度における熱平衡濃度であるが、照射下では照射による原子の弾き出し損傷として形成される空孔の濃度が熱平衡濃度に比べ、格段に大きくなるため、拡散係数が大きくなり、組織変化が促進されることになる。格子間原子も組織変化に貢献する。

$$D = D_0 \exp(-E/kT) \quad \text{-----(1)}$$
$$E = E_F + E_M$$

熱平衡組織に漸近する過程は、ある程度の予測が可

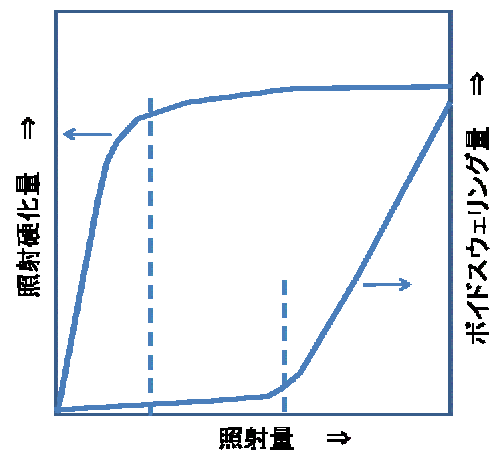


図 1：照射硬化量及びボイドスウェリング量の照射量依存性の模式図

能である。一方、非平衡組織の創成においては、形成される組織は照射により誘起されて非平衡の条件下で生成されるものであり、多くの場合、予測不能の現象を伴う場合が多い。全く新しい材料の実用化に際しては、後者の現象を確認しておく必要性が高くなる。材料の特性や性能に関する確証を得るためには、想定される照射条件下における材料挙動を確認しておく必要がある。

3. 照射量依存性

前述したように、照射効果の照射量依存性は材料開発における最大の関心事であるが、照射効果の種類により、その重要性は異なる。図1は、照射硬化およびボイドスウェリングの照射量依存性を模式的に示している。照射硬化に関しては、低照射領域における変化は急激に生じているが、ある照射量において飽和する傾向を示している。これに対し、ボイドスウェリングの場合は、低照射量域においてはほとんど変化が認められないが、ある照射量を超えると変化量が顕著になる。この照射量依存性の挙動は、照射温度が異なると変化し、照射硬化の場合、照射温度の低下に従い、飽和する照射量は小さくなる傾向を示している。照射硬化のように、低照射量のデータから高照射量における飽和レベルの値を予測できる場合は、高照射量までの照射データを取得する意義はそれ程高くは無い。一方、ボイドスウェリングは、高照射量の領域において急激に上昇するため、高照射量域における照射データの重要性は高い。核変換生成物の影響などに関しても、高照射量における挙動が重要となる。

4. 燃料被覆管開発研究における JMTR 利用の例

高速炉の開発においては、高燃焼度燃料被覆管の開発が重要視されている。高速炉の炉心環境は高温であり、高い照射量の中性子照射を受けるため、高温高強度、高温耐食性および耐照射性能に優れた燃料被覆管として、高クロム酸化物分散強化鋼（スーパーODS 鋼）の開発研究がおこなわれている。ここでは、JMTR を用いて実施した照射影響評価研究を紹介し、その意義について考えてみたい。

1) 照射硬化

酸化物分散強化鋼に限らず、高クロム鋼においては Fe と Cr の二相分離による脆化が懸念されている。Na 冷却高速炉の燃料被覆管としては、クロム量が 9 ないし 12 wt.% のマルテ

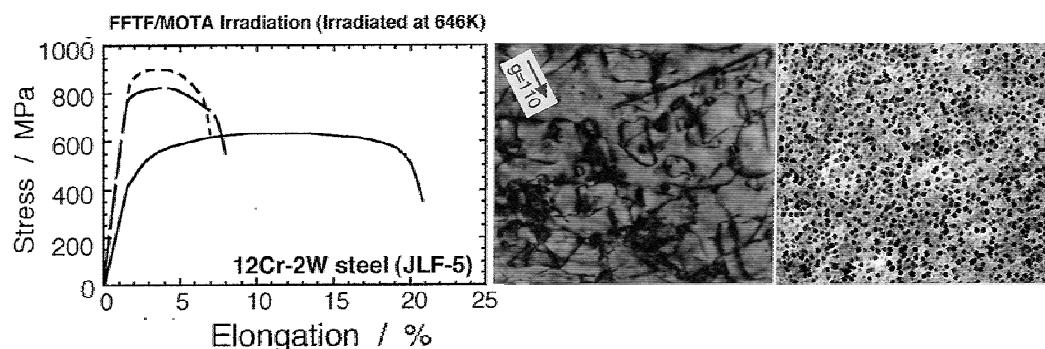


図2：12Cr フェライト鋼における高速炉（FFTF/MOTA）中性子照射の影響

ンサイト/フェライト系の ODS 鋼が開発されているが、これらの材料を超臨界圧水 (SCPW) や鉛ビスマス共晶 (LBE) 中で使用する場合は、その耐食性に大きな難点を抱えており、それを克服するための高クロム化が望まれる。一方、高クロム化は二相分離による熱時効脆化を起こし易くするため、脆化の許容できる範囲での高クロム化を行う必要がある。

米国の FFTF/MOTA を用いた照射実験において、12wt%Cr を含んだフェライト鋼 (ODS 鋼では無い) においては、二相分離が中性子照射により促進されることが確認されている。図 2 は、FFTF/MOTA で 373°C において、約 10-15 dpa まで照射した場合の室温における引張変形挙動と TEM 組織を示している。中央図は格子間型転位ループであり、右図の黒い斑点模様は Cr-rich 相である。Cr-rich 相は、格子間型転位ループと同様に、左図に示す顕著な照射硬化を引き起こす原因となっている。転位ループと Cr-rich 相の区別が可能であるため、観察された照射硬化におけるそれぞれの寄与を評価すると、ほぼ同等の寄与であることが判っている。照射量依存性に着目し、10 dpa と 15 dpa の場合とを比較すると、15 dpa の方が照射硬化は大きくなっているが、その差は小さく、図 1 から予想されるように照射硬化は飽和の傾向にあると言える。

12Cr-ODS 鋼を JOYO で照射した場合 (450°C、14dpa) は、約 50MPa の照射硬化が見られている。RAFS に比べ、照射温度はやや高いが、硬化量は RAFS の約 200MPa に比べ、かなり小さく、ODS 鋼は耐照射性能に優れていることが判る。米国の HFIR (水冷却、熱中性子炉) において、300°C で 3 dpa 照射した ODS 鋼の照射硬化量は約 100MPa であり、照射温度を考慮しても、ODS 鋼は RAFS 鋼に比べ、耐照射性能が良い。中性子スペクトルや flux の相違もあるが、JOYO と HFIR を用いた中性子照射実験における照射硬化挙動に顕著な差はみられていない。

ODS 鋼と RAFS 鋼の照射影響を比較した場合、最も特徴的なのは、引張伸びに及ぼす照射の影響である。RAFS の場合は照射硬化に伴い、引張伸びは顕著に低下し、照射後の伸びは照射前の 20%程度まで減少するが、ODS 鋼の場合は伸びの低下が非常に小さいことが特徴である。その一例を図 3 に示す。この図は、RAFS (12Cr Ferritic steel) と ODSS (12Cr-ODS steel) の室温における引張挙動

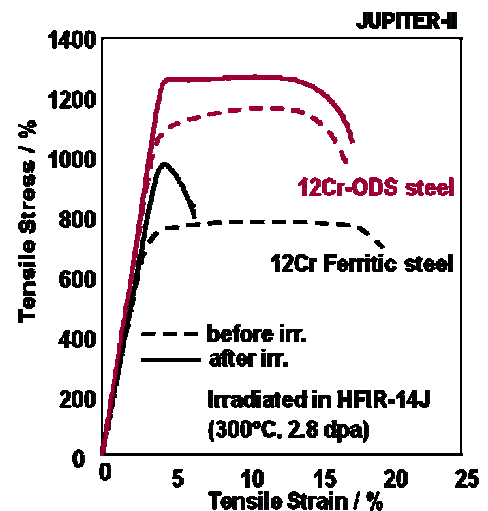


図 3: RAFS および ODSS の引張変形挙動に及ぼす HFIR 照射の影響

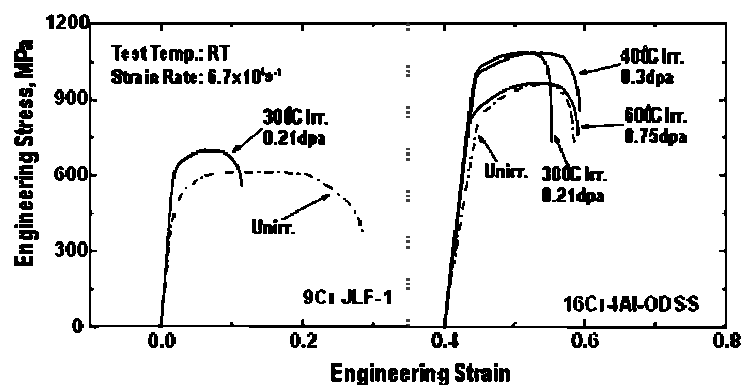


図 4: RAFS および ODSS の引張変形挙動に及ぼす JMTR 照射の影響

に及ぼす FHIR 照射 (300℃、2.8dpa) の影響を示しており、照射により RAFS の伸びが顕著に低下しているが、ODSS の伸びはほとんど変化していない事が判る。一般に、材料は硬くなると脆くなることが知られているが、ODS 鋼の照射硬化においてはそれが当てはまらない。この現象は、照射影響が延性破壊の促進であることに起因すると考えられる。通常、伸びの減少が認められれば、脆化が生じたと表現される。しかし、脆化はあくまでも破壊挙動から判定されるべきであり、単純に伸びの減少から脆化が生じたとは言い難い。延性破壊の促進は、くびれ現象の促進であり、そこでは塑性変形が局所的に生じている。この理解に基づくと、照射脆化は「局所的な塑性変形の促進による伸びの減少」と説明される。ODS 鋼においては、ナノサイズの微細な酸化物粒子が局所的な塑性変形を抑制することで、伸びの低下がほとんど見られなかったと解釈することができる。以上の考察は、照射影響のメカニズムに関するもので、JOYO (450℃、14dpa)、HFIR (300℃、2.8dpa) のいずれにおいても観察されている現象に共通するものである。

この現象は、照射量が 1dpa に満たない JMTR 照射においても観察されている。図 4 は、各温度において RAFS(9Cr-JLF-1)および ODSS(16Cr4Al-ODSS)を JMTR で照射した場合の引張変形挙動の変化を示したもので、ODSS の場合は照射による伸びの減少の小さいことが判る。特に、400℃においては、顕著な照射硬化が認められるが、伸びの減少はほとんど認められない。

2) ODS 鋼の JMTR 照射後組織

次世代炉用の高 Cr-ODS 鋼の開発研究において最も懸念されたのは、二相分離の照射促進である。非照射の状態では、二相分離の最も生じやすい温度は 475℃であることはよく知られており、この温度をピークにして低温側および高温側では二相分離は生じにくくなる。一方、照射下では図 2 に示す様に、373℃においても二相分離が生じており、照射影響が明確にみられる。図 5 は、19Cr-4Al-ODS 鋼における JMTR 照射 (400℃、0.3dpa) 後の TEM 組織を示したもので、黒い斑点状の組織が観察されている。これらは、Cr-rich 相であり、わずか 0.3dpa の照射でも、照射促進による二相分離の生じることを示している。

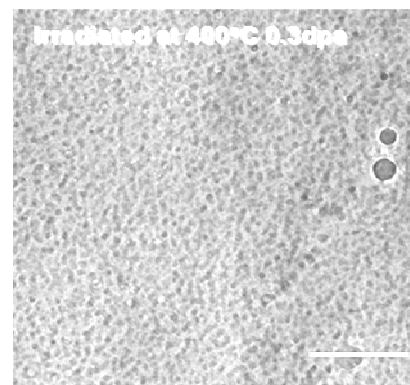


図 5: 19Cr-4Al-ODS 鋼の JMTR 照射による二相分離の様子

5. JMTR への期待

JMTR の特徴は、温度制御照射や途中引き抜き照射が可能であることに代表されよう。JMTR 温度制御照射に御尽力された先達に敬意を表し、その恩恵を受けられることの有り難さを再認識したい。表 1 は、低放射化フェライト鋼 (RAFS) における照射効果および組織変化を纏めたものである。照射温度 400℃付近を境にして、中性子照射の影響は低温側での硬化から高温側での軟化に転ずる。また、同じ鉄鋼材料でも、酸化物分散強化鋼 (ODSS) では、照射温度の影響は低放射化フェライト鋼とはその様相を異にしている。照射効果の理

解において、照射温度の正確さは絶対的なものであり、照射温度の精度の向上無しに、科学的根拠に基づいた材料の照射効果の理解は不可能であると言っても過言では無い。JMTR の最大の特徴となっている温度制御照射技術は、まさに、材料照射研究における根幹の技術であり、先端技術を駆使した照射後試験機や観察・分析装置、測定機器の存在価値を左右する技術である。この照射技術を効果的に利用することで JMTR の存在意義は飛躍的に向上する。さらに高精度の照射温度制御技術の開発を期待したい。

6. 終わりに

原子炉の高経年運転においては、原子炉材料の健全性を確認することが不可欠であり、JMTR は科学的な根拠に基づいた健全性予測を可能にするために必要である。科学的根拠に基づいた材料挙動予測が可能になれば、そこから耐照射性能に優れた新材料の開発の指針が見えてくるであろう。次世代炉用の材料開発においては、確証試験として高照射量までのデータベースが不可欠であるが、原子炉を用いた高照射量の照射実験に要する研究期間はあまりに長い。必要なデータベースの性格をよく理解し、低照射量および高照射量で取得すべきデータの意義を明確にして、照射実験を行うことが肝要である。

表 1：照射温度の違いによる照射効果の変化

Temperature	300°C		400°C		500°C	
Materials	RAFS	ODSS	RAFS	ODSS	RAFS	ODSS
Displacement damage	Hardening >I-loops >high # density of small voids >precipitates	Hardening >I-loops >high # density of small voids >precipitates	not changed >large I-loops >Void swelling	Hardening >I-loops >very small voids >precipitates	Softening >large precipitates >Dislocation recovery	Hardening with no-loss-of-elongation >I-loops >small voids >precipitates

5. JMTR を利用した基礎研究

東北大学 四竈樹男

広範な領域にまたがる原子炉を用いた基礎研究では、研究が有効かつ効率的に実施出来るには原子炉に様々な特性が要求される。JMTR は材料試験炉として設計された研究炉であり、HANARO, OPAL, CARR など代表される多目的型研究炉(Multipurpose Research Reactor)と比較して、ユニークな特徴を有している。ここでは、基礎研究の立場から、JMTR の持つ特徴の得失を他の代表的な研究炉、HBWR (Halden Boiling Water Reactor; Norway), BR-2 (Belgian Reactor - 2; Belgium), HFIR (High Flux Isotope reactor)と比較しつつ検討する。これら原子炉の特徴の一部を表 1 に、また出力、フラックスを他の代表的な世界の原子炉と比較しつつ図 1 に示す。

a. 炉の設置状況

基礎研究のためには原子炉炉心への計装のためのアクセスが重要である。一般的には計装は炉上部よりなされるのが通常であり、炉頂部へのアクセスの難易が重要である。研究炉の多くは日本の JRR-3 に代表されるように、地上面に基底部を持ち、そこから 10m 程度そびえ立つ構造となっている。BR-2 は代表的なものであり、他にも特に中性子ビーム利用炉では、この構造が一般的である。具体的には、FRM2, グルノーブル炉, HFBR(ブルックヘブン), JRR-3, HANARO などがこれに属する。この場合、炉頂部での作業性は悪くなり、例えば炉運転中での作業はかなり制限される。一方、水平方向の炉心へのアクセスは非常に良く、中性子ビーム利用には最適な構造である。BR-2 ではこの水平方向からのアクセス性の良さを利用して、複数の水ループを実現している。

一方、炉全体を地下に設置する構造は高出力密度研究炉では安全上、遮へい上、もう一つの設置方法であり、HBWR と JMTR はこの構造を採っている。HFIR は地形を利用して上記二つの中間構造を採っている。この構造の欠点は、炉側面からの炉心へのアクセスが制限されることであるが、HBWR では炉側面に大きな地下空間を確保し、この欠点を補っている。HFIR では、地形の斜面を利用して、炉の片側に大きな解放空間を確保し中性子ビーム利用に利しているが、炉心計装のための空間確保には難があるのが現実である。JMTR は炉側面からのアクセスが制限されており、水ロープなどのユーティリティの艀装に困難を抱えているのが実際問題であるが、一方で、炉頂部からアクセスは非常に良く、また、炉頂部に非常に広い空間を確保しており、炉心計装に比類ない利点を有している。

b. 減速材

重水減速と軽水減速では様々な得失があるが基礎研究の立場からは、中性子束あたりの随伴ガンマ線束の強さの違いを挙げることができる。軽水減速より重水減速ではこの強さが 1/2-1/3 程度であり、中性子フラックス当たりの核加熱率が非常に小さく抑えられる利点がある。これは複雑な炉心計装には極めて有利である。HBWR はこの利点をフルに利用している。

JMTR では、いわゆる燃料領域では核加熱率が鉄換算で 10W/g を超すため、信頼ある計装が困難となっているが、一方で反射体領域やガンマ遮へいの外側では核加熱率は比較的小さく抑えられており、最先端の計装が実現出来る。

c. 圧力隔壁

ここに比較する四基の試験研究炉はすべて圧力隔壁をもっており、高度計装照射ではいかに圧力隔壁を再構成するかが重要な技術課題となる。これは HANARO など一部の特殊な原子炉を除いて高出力密度試験研究炉共通の課題である。各原子炉は様々な工夫を行っている。例えば圧力隔壁を貫通する照射位置の確保が挙げられるが、BR-2 では ROBIN という照射設備があり、計装を許した照射が可能である。HFIR や JMTR ではいわゆるラビット照射が行える構造となっているが、一般的に計装は極めて困難であり、かつ照射体積に大きな制限がある。

計装計装リグの装荷では圧力境界をいかに担保するかが極めて重要になるが、照射リグ開発を含めて各試験研究炉は個々の工夫をしている。少なくとも HBWR, HFIR, BR-2 は優れた照射経験を蓄積してきており、技術支援部門が充実しているのは事実である。HBWR が軽水炉燃料照射で高い評価を享受している一つの理由はここにある。

d. 関連周辺施設

キャプセル開発に関して、HFIR, BR-2, HBWR は未だに過去の技術蓄積を活かす技術私有団組織を維持している。一方、JMTR は照射後施設が最も充実している。照射後試験施設の維持は四基の試験研究炉共通の課題である。

c. 運転の柔軟性

この問題は国の規制と大きく関わっているところであり、日本にある JMTR は最も不利な状況にある。BR-2 では炉心構成すら柔軟に変更できるし、HBWR や HFIR では利用者の準備状況に合わせ、炉の運転日程を変更できる。一方、炉の運転の詳細を見ると欧米炉では予想以上にスクラムが多い。その多くは壊変毒が臨界に影響する前に立ち上がっているようであり、公式には炉は停止していないことになっている。JMTR の運転モードの柔軟化は規制当局とのより緊密な協議が今後必要と考える。

以上、基礎研究の立場から、JMTR の持つ得失を他の原子炉と比較検討した。JMTR は日本に特有の厳しく細部にわたる規制およびそれからくる様々な制約の中で運転せざるを得ない著しい不利を持っているが、一方で他の原子炉にない優れた特性を有している。今後、厳しい国際競争環境の中で JMTR がその特徴を活かして活躍するためには、自身の得失を厳しく認識しつつ、自身の利点を積極的に活用、発展させる必要がある。

表 1 比較する試験研究炉の概要

Reactor	affiliation	Power	Moderator	Cycle duration	Cycle number /year
HFIR	ORNL/USA	85	H2O	About 30days	About 7-8
BR-2	SCK/CEN/Belgium	80-100	H2O	About 30days	About 5
HBWR	HRP/Norway	40	D2O	About 30days	About 7
JMTR	JAEA/Japan	50	H2O	About 40days	About 5-8

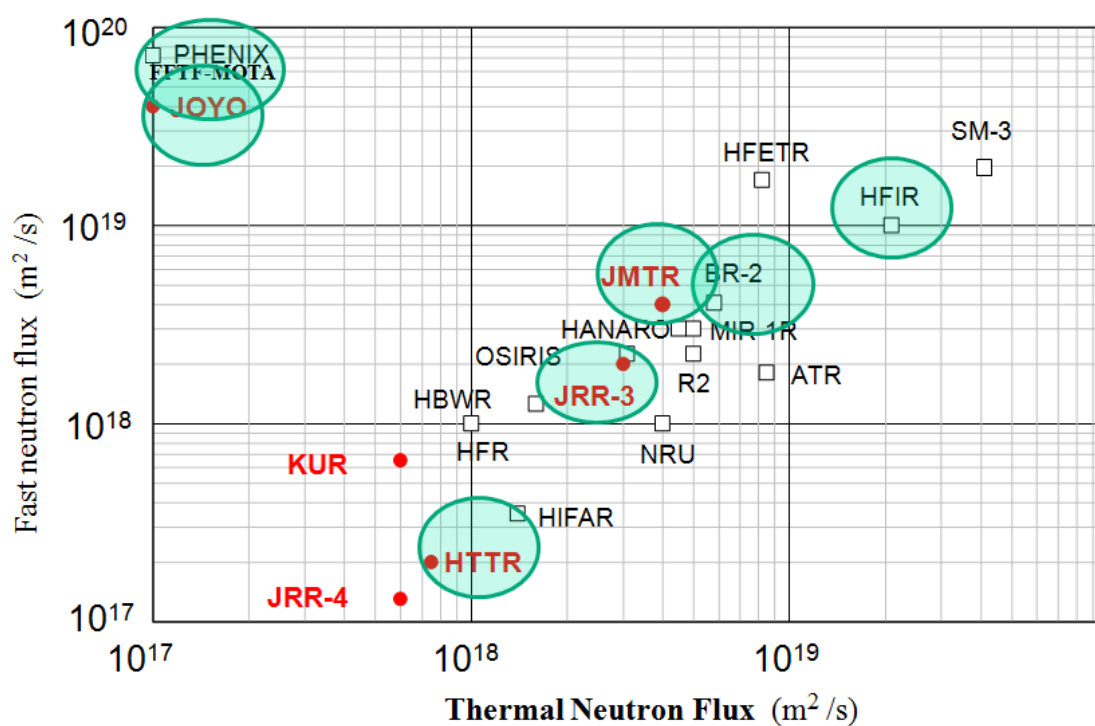


図 1 世界の代表的な試験研究炉の熱中性子束と高速中性子束($E>0.1\text{MeV}$)

6. JMTR へのユーザからの要望

京都大学 笠田竜太

東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター（以降、大洗施設）の全国共同利用の枠組みにおいて、ユーザとして約 15 年前より JMTR の照射材料と向き合ってきた。JMTR の初臨界が 1968 年 3 月ということは、私よりも年度なら 5 年先輩に当たることになる。私が修士課程の学生として、実際に研究で用いた最初の照射材量の照射番号が 94M-13U あたりであるから、まさに大先輩に指導して頂いたようなものであり、先ずはこの場を借りて感謝の意を表したい。

JMTR が停止していたこの数年間は、耐照射性材料の開発プロジェクト等によって糊口をしのいできたが、元来照射効果研究を主軸としてきた私にとって、新たに開発した材料の照射効果研究の必要性という観点からのみならず、蓄積した照射研究課題の解決に役立つであろう JMTR の再稼働は待ちに待った出来ごとである。言うまでもなく、我々のような原子力材料の研究者にとって、決して多くは無い利用可能な照射場の動向は、生き様に关わる問題である。よって、JMTR が再稼働し、以前のように良く制御された照射実験を実施出来るというだけでも、新たな研究課題に対応可能となる喜ばしいことである。この数年間の間にも、材料評価技術の高度化は進んでおり、ホット実験施設の充実によって、かつては「見えなかった」ものが「見えてくる」という期待感もある。これによって、研究者の興味を起点とする照射に関わる学理の開拓のみならず、社会的に重要性の高い課題、例えば原子力発電技術の安全・安心に関わる課題、の解決に寄与する学術・技術基盤の構築も一層進展するであろう。

ユーザとしての JMTR への要望は、改修前に行われていたような、良く制御・計測された照射場において、安定的に照射実験が行われることが第一である。特に、大洗施設における共同利用を通じた照射研究では、原子力人材育成も見据えた中長期的視点に基づいた照射計画の策定が益々重要になるであろう。我々の研究グループでは、JMTR を用いた照射研究によって、従来あまり着目されていなかった Fe-Mn 二元系モデル合金が著しい照射硬化を示す場合があることを示した。更に、その原因がマトリックス損傷の形成過程と関連があることを明らかにしつつあり、高経年化 RPV 鋼の脆化・硬化メカニズムを論じる上で、極めて重要な示唆を与えていると考えている。このような現象は、良く制御計測され、良く計画された照射実験を実施することにより、一層の理解が進むものと考えられる。特に大洗施設には、特徴的な材料構造・組成解析装置が揃っているため、良い照射場と、良い照射後試験施設の組み合わせは、国際的な競争力という観点においても魅力的なものである。ユーザとしての要望を更に加えると、照射試料の詳細位置における中性子フラックスや中性子エネルギースペクトル、dpa、照射温度等の計測データ、解析データをより幅広く Online で閲覧可能になると有り難い。

JMTR は、核融合炉材料の照射効果、照射損傷の基礎過程に関連する学術研究や工学研究にもニーズが多く存在している。例えば、低放射化フェライト鋼の照射脆化評価のために検

討されているマスターカーブ法の検証のためには、そもそも照射条件が良く制御されて、破壊に関わる確率論的評価を乱さないような照射実験が必須であり、JMTR 照射は有効に活用され得るであろう。また、核融合中性子源の将来的な Availability を考慮すると、ブランケットシステムのコンポーネント照射実験については、中性子エネルギースペクトルや損傷量の核融合炉環境との相違は極めて大きいものの、JMTR を含めた既存中性子照射施設も活用する必要性は高いと言えよう。

さて、JMTR は「材料試験炉」という存在の本質として、研究者サイドにおけるシーズと、社会からのニーズが会う交差点たる位置付けを有していると言えよう。特に、原子力エネルギーの安全・安心利用という最大ニーズに対して、われわれ研究者からの新しいアプローチを可能にする「反応場」としての機能の重要性を、今後も広く力強く社会にアピールすることは大切であろう。このために、自らも JMTR によって得られた特徴的な成果の発信を心がけて研究を進めたい。

Ⅲ. 材料部会主催 第9回「材料」夏期セミナー 報告

日本原子力研究開発機構 安堂正己、若井栄一

平成22年度の「材料」夏期セミナーは、Na 漏れ以降停止していた「もんじゅ」が第一段階の性能試験のため、本年5月より運転を再開し、高速炉の実用化へ向けた重要な年となったことから、「高速炉開発」をひとつの大きなテーマとし、さらに「軽水炉、核融合炉、J-PARC等の様々な原子力分野での材料研究の現状」についても分野を超えて活潑な議論ができるよう企画され、日本三名瀑のひとつである袋田の滝に近い久慈郡太子町余暇活用センターやみぞにて、材料部会の主催の下で開催された。

参加者は、学生8名を含む44名であった。セミナーは2部構成とし、前半は「高速炉開発の現状と今後の展開」に関するテーマとして、もんじゅの概況の紹介（此村氏）、FaCTプロジェクトの概要・世界の高速炉開発の動向などの概略説明（青砥氏）、FaCT炉システム成立のための革新技術とその適用評価について（小竹氏）の説明に加え、数ヶ月前にビル・ゲイツ氏来日で話題になった小型高速炉4Sの開発についても紹介されるなど（碓井氏）非常に充実した内容となった。引き続き、高速炉炉心・構造材料の開発状況（矢野氏、永江氏）に関する講演や、EBR-II 廃材による照射劣化評価（沖田氏）の紹介など、着実な技術開発の積み上げ・工夫がよくわかる講演であった。

後半は「原子力材料研究の最近のトピックス」に関し、JMTR（西山氏）やJ-PARC（菊地氏）、イオン加速器（岩井氏）やHVEM（荒河氏）などの照射施設利用に関するテーマが概説された。実際の実験などに役立つ部分が多く盛り込まれ貴重であった。最終日は、まず水化学と材料のテーマを中心に、水化学のねらい・プラント水化学の基礎について（内田氏）、



材料夏期セミナー参加者の集合写真（18日）

また軽水炉における腐食損傷課題と水化学ロードマップ等について（塚田氏）の説明が行われた。また放射線分解と材料腐食への影響に関する評価例や（佐藤氏）、流れ加速型腐食（FAC）の事例とその評価方法について（内田氏）の紹介があった。水化学部会との協調についての議論では、近々合同勉強会を立ち上げ、①構造材料と水の相互作用に関する理解の現状を調査・整理したのち、今後必要な研究・開発課題・方向性を検討し、関係者の知識と交流を深めていくこと。②さらに軽水炉で得られている経験、知識を他のシステムにも生かし、効果的利用に資することを目指していくとする方向で意見がまとめられた。最後にブラケット構造材料開発を中心とした核融合材料研究に関する最近の話題についての講演が行われ（谷川尚氏、谷川博氏、田辺氏）、最近の開発状況等がコンパクトに理解しやすく好評であった。セミナーの合間では、袋田の滝の観瀑・昼食会が催され、懇親会と共に、参加者の交流が深められる良い機会となった。

最後にご多忙の折、講師、座長をご快諾いただきました先生方に心から感謝申し上げます。また本セミナーの運営にご協力いただきました皆様方にもこの場を借りまして深く御礼申し上げます。

（運営委員 原子力機構 安堂正己、若井栄一）

第9回「材料」夏期セミナープログラム

2010年8月18日（水）～20日（金）

茨城県久慈郡大子町 余暇活用センターやみぞ

8月18日（水）

開会の挨拶

材料部会長 四竈 樹男（東北大）

I部：高速炉開発の現状と今後の展開

座長：青砥 紀身&小竹 庄司（JAEA）

セッション 1-1 もんじゅ

もんじゅの概況

此村 守（JAEA FBR プラント工学研究センター）

セッション 1-2 次世代炉開発

(1) FaCT プロジェクト

青砥 紀身（JAEA 次世代原子力システム研究開発部門）

Coffee Break

座長：笠原 茂樹（日立(JAEA)）

(2) FaCT 炉システム

小竹 庄司（JAEA 次世代原子力システム研究開発部門）

(3) 小型高速炉 4 S の開発

碓井 伸彦（東芝原子力開発設計部）

集合写真

懇親会

8月19日（木）

座長：福元 謙一（福井大）

セッション 1-3 燃料被覆材料と構造材料等

(1) 高速炉炉心材料の開発状況

矢野 康英（JAEA 次世代原子力システム研究開発部門）

- (2) EBR-II 廃材を用いた高速炉材料照射劣化予測・評価に関する研究開発
 沖田 泰良 (東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻)
- (3) 高速炉開発 (FaCT プロジェクト) における構造材料の研究開発の現状
 永江 勇二 (JAEA 次世代原子力システム研究開発部門)

昼食&休憩

宿のバスで袋田の滝へ移動。袋田の滝付近で昼食

II 部：原子力材料研究の最近のトピックス

座長： 石野 栞 (東大名誉教授)

セッション 2-1 照射施設と各種材料研究等

- (1) JMTR を利用した軽水炉構造材料の中性子照射試験

西山 裕孝 (JAEA 安全研究センター)

- (2) 加速器を利用した原子力材料研究

岩井 岳夫 (東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻)

Coffee Break

座長： 川合 将義 (KEK)

- (3) J-PARC における材料研究

菊地 賢司 (茨城大学・フロンティア応用原子科学研究センター)

- (4) HVEM/TEM による照射損傷の要素過程の研究

荒河 一渡 (大阪大学超高压電子顕微鏡センター)

8 月 20 日 (金)

座長： 四竈 樹男 (東北大)

セッション 2-2 水化学と材料研究

- (1) 原子炉水化学

内田 俊介 (JAEA 原子力基礎工学研究部門)

- (2) 材料・冷却水相互作用

塚田 隆 (JAEA 原子力基礎工学研究部門)

Coffee Break

座長： 山脇 道夫 (東大名誉教授)

- (3) 放射線分解と電気化学

佐藤 智徳 (JAEA 原子力基礎工学研究部門)

- (4) 腐食と流動の連成解析

内田 俊介 (JAEA)

- (5) 特別討論 「材料部会と水化学部会との協調について」

塚田 隆 (JAEA)

セッション 2-3 核融合材料研究

座長： 安堂 正己 (JAEA)

- (1) 固体増殖水冷却方式の核融合炉ブランケットと ITER におけるテストブランケット試験

谷川 尚 (JAEA 核融合研究開発部門)

- (2) 核融合炉構造材料の開発 <低放射化フェライト鋼の開発>

谷川 博康 (JAEA 核融合研究開発部門)

- (3) DT 燃焼炉におけるトリチウム燃料とプラズマ対向壁

田辺 哲郎 (九州大学総合理工学研究院)

閉会の挨拶

IV. Nuclear Materials 2010（第1回原子力材料国際会議）報告

京都大学エネルギー理工学研究所 笠田竜太

Nuclear Materials (NuMat) 2010 が、平成 22 年 10 月 4~7 日、ドイツのカールスルーエにて開催された。第 1 回の開催となる本会議は、学術雑誌である「Journal of Nuclear Materials (JNM)」をメインスポンサーとして企画され、核燃料サイクルを含む核分裂炉のための材料科学に関する国際会議の「傘」として役立てることが意図されたとのことである。具体的には、核燃料、構造材料および溶融塩のトピックをカバーする次の 6 つの国際会議を統合して開催された。

- a) Thermodynamics and Thermophysics of Nuclear Fuels (TNF-2)
- b) Materials Modeling and Simulation of Nuclear Fuels (MMSNF-9)
- c) Radiation Stability of Complex Microstructures (RSCM-2)
- d) Molten Salts for Nuclear Applications (MSNA)
- e) Structural and Functional Materials for Fission Reactors (SFMFR)
- f) Structural Materials Modeling and Simulation (SMMS)

これらの 6 つの会議が 3 つの平行・セッションとして進行するとともに、単独セッションとして基調講演や、招待講演が行われる形式であった。これらのオーラルセッション終了後には、ポスターセッションも実施された。ちなみに、バンケット或いはレセプションを開かない代わりに、ポスターセッションでは軽食が供され、オーラルセッション以上に活発な議論が交わされた。

会議に参加した約 260 人の地域別内訳は、開催地であるヨーロッパから 45%、ついでアジアから 26%、北アメリカから 12%とのことである。アジアの内訳については、公表されていないが、我が国以外では中国、インドから、特に若手の参加が多く見られたのが印象的であった。

事前に WEB 上において、Robert Cahn 賞の設立と、あわせて第 1 回受賞者として米国オ



ークリッジ国立研究所の S. Zinkle 氏が受賞したことが告知されており、初日には受賞記念講演が行われた。また、招待講演者として 6 名が事前に決定されており、我が国からは京都大学エネルギー理工学研究所の森下和功氏より、マルチスケールモデリングに関する講演があった。

NuMat2010 では、35 歳以下の研究者を対象とする若手研究者賞が設定され、ポスターセッション、オーラルセッションからそれぞれ一名ずつ表彰された（惜しくも我が国は選出されなかった）。また、会場の ZKM（カールスルーエ芸術メディアセンター）にちなんで、NumArt という原子力材料に関連する芸術作品のコンペもあり、第 1 回の会議ならではの工夫が多く見られた。また、会議独自のプロシーディングス（JNM のサプリメント等）を発行せず、通常の JNM 誌に投稿する際に、NuMat2010 発表論文であることを示せば、通常よりも早い査読プロセスに乗るとのことであり、編集面でも新しい試みが為されている。筆者の経験上、ボランティアである編集委員の負担が会議を繰り返すごとに（会の発展とともに）増加していることや、例えば本誌掲載でもプロシーディングスに対する業績評価は低い場合が多いということを考えると、このような取組みは評価すべき点であると思う。

筆者がこれまでに定期的に参加して来た原子力材料関連の国際会議と言えば、ICFRM（核融合炉材料国際会議）や ASTM E10 の International Symposium on Radiation Effects in Solid（固体材料照射効果国際会議）で有るが、NuMat2010 では燃料あるいは燃料被覆管材料関連といった分野の研究者とも、時にはドイツの地ビールを片手に持ちつつ、議論や交流を持つことが出来た。今後、原子力材料に関連する代表的な国際会議のひとつに成長することが期待される会議であり、2012 年に大阪で開催される予定の次回の会議にも是非参加し、より良い成果を発信したいと思い、帰国の途についた。

V. 研究室紹介

八戸工業大学 工学部 機械情報技術学科 佐藤研究室

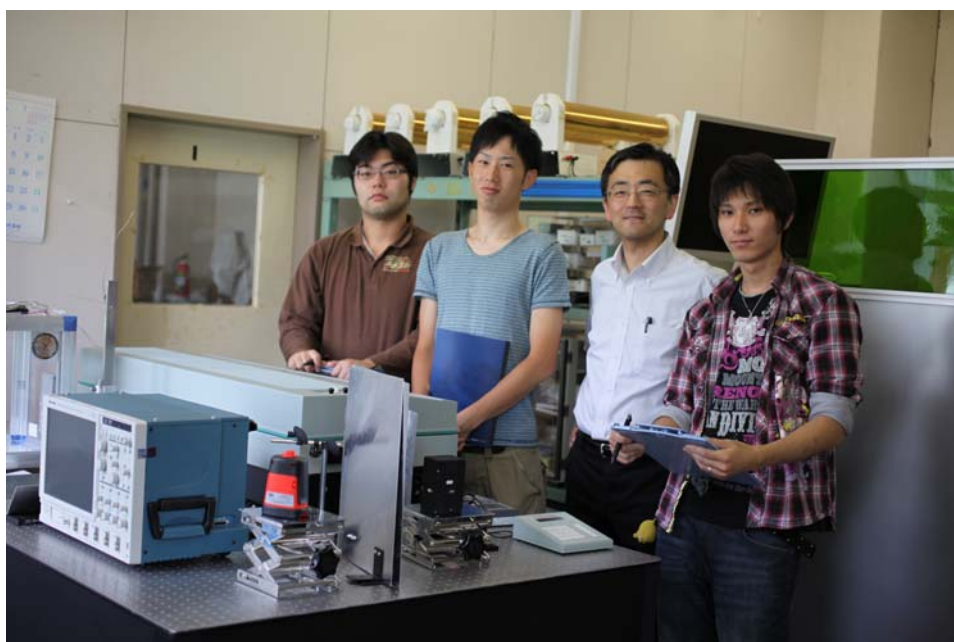
<http://www.mech.hi-tech.ac.jp/kikai/kenkyuu/k.satomanabuken.htm>

2010年4月より八戸工業大学工学部機械情報技術学科に所属し原子力教育研究担当しております。加えて、基礎教育研究センターとエネルギー環境システム研究所を併任しております。

八戸工業大学では教授から助教まですべての教員はそれぞれ独立した研究室を構えており、機械情報技術科の今年度の標準的な場合では、数名の大学院生と7、8名の4年生が配属されています。当研究室は4名の4年生とともにスタートしています。

研究内容としては「レーザーを使ったミクロな機械特性の研究」を中心に進めているところです。原子力の種々の分野でも異種材料の界面強度に関する知見は技術開発における重要なポイントと考えております。具体的なテーマは以下に例示するように、いくつかの外部資金他、共同研究等に加えて頂き進めています。

- レーザー衝撃法を用いたヘリウム粒界脆化直接測定（科学研究費補助金基盤研究(B)H21-23)
- 液滴衝撃エロージョン(LDI)による配管減肉予測技術の高度化に関する研究（経済産業省 H22「高経年化対策強化基盤整備事業（経年劣化事象の解明等）」）
- 低放射化構造材料のW被覆プロセス技術開発研究（核融合科学研究所 H21-23LHD 計画共同研究）
- レーザー衝撃法を用いた第一壁コーティング皮膜の機械強度の評価（核融合科学研究所 H22 一般共同研究）
- 低放射化フェライト鋼の微小硬さと引張挙動相関に関する研究（日本原子力研究開発機



構幅広いアプローチ活動における原型炉工学研究開発に係る共同研究)

八戸工業大学では H22 原子力人材育成プログラム（原子力地域人材プログラム）に採択されています。大学院生に対する放射線実習などを環境科学技術研究所をはじめとした地域の原子力関連機関のご協力を得て実施します。

原子力専門の学科はありませんが、県内原子力施設での研修を含めた工学部学科横断型原子力履修コースを開講し、大学院原子力工学専修コースを開始しております。原子力基盤研究テーマとして、機械工学関連では軽水炉保全技術（齋藤研究室）、微小試験片試験技術（阿部研究室）、電気工学関連ではプラズマ・材料相互作用（根城研究室）、センサー用薄膜作製技術（藤田研究室）、バイオ環境関連では微量放射線分析（村中研究室）、微生物による微量元素回収技術（鶴田研究室）など原子力・核融合に深く関連する活動もあります。また、車で1時間強の六ヶ所村では原子燃料サイクルの要の施設や ITER-BA 関連施設も本格稼働が間近となっている他、東北大学サイクロترونセンター六ヶ所村分室も設置されたところです。地理的にも便利で、青森県内で唯一工学研究科を有する大学です。志をもつ全国の学生の皆さんには活躍の場の一つとなるよう整えたいと考えております。

佐藤 学

VI. 行事等のお知らせ

- 1) **Microstructural Processes in Irradiated Materials
Embedded 2011 TMS Annual Meeting & Exhibition**
February 27 - March 3, 2011
San Diego, California, USA
<http://www.programmaster.org/PM/PM.nsf/UpcomingSymposia/88CBEB64A33788BF8525758F004B80A5?OpenDocument&ParentUNID=6A6933B363A6AE63852574B900410EAA>
- 2) **19th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE19)**
May 16 - 19, 2011.
Makuhari, Chiba, Japan
<http://www.icone19.org/>
- 3) **25th Symposium on Effects of Radiation on Nuclear Materials**
June 15 - 17, 2011
Anaheim, California, USA
http://www.astm.org/SYMPOSIA/filtrexx40.cgi?+-P+EVENT_ID+1800+/usr6/htdocs/astm.org/SYMPOSIA/callforpapers.frm
- 4) **10th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-10)**
September 11 - 16, 2011
Portland, Oregon, USA
<http://www.isfnt-10.org/>
- 5) **15th International Conferences on Fusion Reactor Materials (ICFRM-15)**
October 16 - 22, 2011
Charleston, South Carolina, USA
<http://www.ms.ornl.gov/ICFRM15/index.shtml>

VII. 運営委員会名簿（2010 年 4 月～2011 年 3 月）

部会長	：	四竈 樹男	（ 東北大学金属材料研究所	）
副部会長	：	青砥 紀身	（ 日本原子力研究開発機構	）
財務小委員長	：	笠原 茂樹	（ ㈱日立製作所日立研究所	）
編集小委員長	：	野上 修平	（ 東北大学大学院工学研究科	）
編集小委員会委員	：	森下 和功	（ 京都大学エネルギー理工学研究所	）
広報小委員長	：	遠藤 慎也	（ 日本原子力研究開発機構	）
広報小委員会委員	：	安堂 正己	（ 日本原子力研究開発機構	）
国内学術小委員長	：	若井 栄一	（ 日本原子力研究開発機構	）
国内学術小委員会委員	：	福元 謙一	（ 福井大学附属国際原子力工学研究所	）
国際学術小委員長	：	檜木 達也	（ 京都大学エネルギー理工学研究所	）
国際学術小委員会委員	：	土肥 謙次	（ 電力中央研究所	）
庶務幹事	：	村瀬 義治	（ 物質・材料研究機構	）
庶務幹事	：	井上 利彦	（ 日本原子力研究開発機構	）
庶務幹事	：	牟田 浩明	（ 大阪大学大学院工学研究科	）
庶務幹事	：	橘内 裕寿	（ 日本核燃料開発㈱	）

VIII. 寄稿のお願い

材料部会は、部会員の皆様からの部会報へのご寄稿を歓迎いたします。原子力関連材料についての最近の研究や研究機関・施設・研究会の紹介、会議の案内や報告、国際交流など、学会誌よりも気軽に話題提供してみたいという方は、ぜひご検討ください。以下の電子メールアドレスあるいはお近くの運営委員までご連絡ください。

材料部会運営委員会メールアドレス：z-unei@nuclear.jp

IX. 編集後記

春に出版予定でしたが、JMTR 特集の執筆者の人選、編集などにおいて時間がかかり、発行が大幅に遅れてしまいました。編集小委員として、ここにお詫び申し上げます。

ご寄稿頂いた皆様、ご協力有難うございました。