

Nuclear Materials Letters

(2012年3月)

(部会ホームページ <http://www.aesj.or.jp/~material/>)

目次

I. 巻頭言	第4世代原子力システム開発からの材料研究開発への期待 GIF政策グループ議長	佐賀山 豊	・・・1
II. 特集「軽水炉高経年化対策における取り組みー材料に関わる活動を中心としてー」 (2012年春の年会材料部会企画セッションから)			
	企画セッションの趣旨	国内学術小委員会委員長 福井大学	福元謙一 ・・・3
	高経年化対策の概要と今後の取り組み	東京大学工学系研究科	関村直人 ・・・4
	原子炉圧力容器鋼の照射脆化 SCC (IASCC含む)	(財)電力中央研究所 東北大学未来科学技術共同研究センター	曾根田直樹 ・・・5
		庄子哲雄	・・・6
	配管減肉	東北大学工学研究科	渡邊 豊 ・・・9
	座長サマリー	原子力安全システム研究所	福谷耕司 ・・・11
III. 第3回材料部会奨励賞受賞者のよろこびのことば	奨励賞受賞の意味を改めて考えて	京都大学エネルギー科学研究科	
		藪内聖皓	・・・13
	材料部会奨励賞を受賞して	日本核燃料開発株式会社	坂本 寛 ・・・14
IV. 国内会合報告			
	第2回材料-水化学部会合同「構造材-水相互作用」勉強会 報告	日本原子力研究開発機構	若井栄一 ・・・16
		塚田 隆	
V. 国際会議報告			
	第15回核融合炉材料国際会議 (ICFRM-15) 報告	日本原子力研究開発機構	渡辺淑之 ・・・19
		小沢和己	
		濱口 大	
	第12回国際原子炉級黒鉛専門家会議 (INGSM-12) 報告	日本原子力研究開発機構	柴田大受 ・・・22

VI. 研究室紹介			
	大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻		
	環境エネルギー材料工学領域（山中研究室）	・・・	24
VII. JNM エディターだより			
	Journal of Nuclear Materials のエディターを退くにあたって		
	元 JNM エディター		
	東京大学名誉教授	石野 栞	・・・26
VIII. 材料部会 最近の動向			
	新たに日韓セミナーを開始するにあたって		
	国際学術小委員会委員長		
	電力中央研究所	土肥謙次	・・・29
IX. 行事等のお知らせ			・・・31
X. 寄稿のお願い			・・・31
XI. 編集後記			・・・32

I. 巻頭言

第4世代原子力システム開発からの材料研究開発への期待

第4世代原子力システムに関する
国際フォーラム(GIF)政策グループ議長
佐賀山 豊



第4世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF: Generation IV ^{※1} International Forum)は、次世代炉開発の国際協力に関する枠組みとして2000年に米国により提唱され、2001年7月にアルゼンチン、英国、カナダ、韓国、日本、ブラジル、フランス、米国及び南アフリカがその理念を定めた憲章を作成、署名したことで正式に発足した。その後、スイス、欧州原子力共同体(ユーラトム)、中国、ロシアもGIF憲章に署名している。GIF憲章は昨年7月に10年の期限が来たことから、当初の国全てが再署名を行い、今後10年の活動が約束された。研究及び開発に関する協力の実効的な国際約束(「第四世代の原子力システムの研究及び開発に関する国際協力のための枠組協定」)は、2005年2月に日本、米国、フランス、カナダ及び英国が署名(後に英国は署名を撤回)、その後、スイス、韓国及びユーラトムが参加、2007年12月に中国、2008年4月に南アフリカ、2011年7月にロシアが加入している。

このようにGIFの活動には我が国は草創から常に中核的な役割を担ってきており、その最高意思決定組織である政策Grの第3代議長国として、米国、フランスに次いで2010年から活動をけん引している。

2002年7月、GIFは、その理念(安全性、経済性、持続可能性(資源有効利用と廃棄物の最小化)、核拡散抵抗性について他のエネルギー源に対して十分な優位性を持ち、2030年頃に基幹エネルギーを担い得る)に基づき、6つのシステム^{※2}、を選択した。現在、これらの選択されたシステム毎に開発意欲や興味を持つ参加国による研究協力が進められている。選択6システムの中には、VHTRやSFRのように既に複数の国で実験炉や原型炉が建設されているシステムもあれば、GFRやMSRのように構想段階に留まるシステムもあり、その開発現況はシステム毎に異なる。

しかし、多くのシステムに共通する課題も少なくない。その1つに適切な特性を備える新たな材料開発あるいは特性改善があり、当該システムの実現、商用化の要件とされている。例えば、LFRやMSRの場合、前者では冷却材である液体鉛ビスマス^{※3}環境での材料腐食耐性確保が、後者ではトリウムとウランのフッ化溶融塩環境耐性のほか、照射脆化耐性と高温強度特性を併せ持つ材料開発、仕様の最適化が鍵となっている。LFRについては、冷却材の質量が大きいことによる壊食(エロージョン)も課題とされている。SCWRについては照射環境耐性と良好な高温特性を合わせ

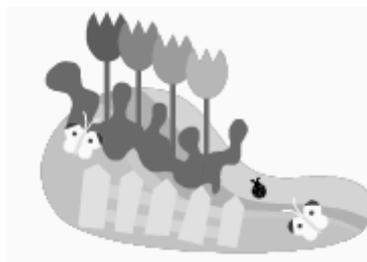
持つ被覆管材料、VHTR については超高温環境 (900~1000℃以上) で期待する強度特性を有する構造材料の開発が課題とされている。既に複数の原型炉が稼働している SFR においても、商用炉に向けてより高温強度特性、照射耐性の優れた構造材料や燃料被覆管材料の開発が続けられている。また、仏国が SFR の先の概念として研究を行っている GFR についても同様に材料開発が進められており、その研究開発段階は既述の VHTR と同等レベルにあるというのが現状である。

他方、我が国の原子力分野における第 4 世代炉を対象にした材料開発、特性改良に関する研究開発成果の報告や活動の紹介は必ずしも活発ではなく、むしろ低調と言えるのではないかという印象を持っている。昨春の東北太平洋大地震の津波被害による福島第一原子力発電所の事故を受け、我が国では、現在、なお国レベルで原子力利用に関する議論が続き、その方針が定まらないという状況の中で、研究者や技術者の意欲はさらに減退するのではないかという懸念を持つ。しかし、目を海外に転じれば、GIF 参加国は当然としてインドなどの非加盟国でさえも第 4 世代炉開発の速度を落としてはおらず、むしろロシアや中国などでは加速の気配さえ認められる。既述

したように、これまで日本は選択 6 システムの MSR を除く 5 システムについて、常に活動の中心にあり、課題解決の取り組みについても主導する立場を占めてきた。そうした国際的な貢献を行ってきた主要国の 1 つであるとの思いからは、福島事故を経験した今だからこそ、GIF が理念の 1 つとする至高の安全性を追求するため、基盤技術である材料開発、特性改善に力を発揮すべきと考える。いやむしろ今だからこそ、もう一段の努力を材料分野の研究者、技術者に望むものである。

- ※ 1) Generation IV とは、黎明期原子炉 (第 1 世代)、現行軽水炉等 (第 2 世代)、現在導入が開始されている改良型軽水炉等 (第 3 世代) に続く次世代原子力システム概念の総称
- 2) ガス冷却高速炉 (GFR)、鉛冷却高速炉 (LFR)、熔融塩炉 (MSR)、ナトリウム冷却高速炉 (SFR)、超臨界水冷却炉 (SCWR)、超高温ガス炉 (VHTR)
- 3) LFR は鉛系液体金属冷却高速炉の総称であり、冷却材としては鉛単独や鉛ビスマス共晶合金が採用されている

(平成 24 年 3 月 16 日受理)



Ⅱ. 特集

軽水炉高経年化対策における取り組み—材料に関わる活動を中心として— (2012年春の年会材料部会企画セッションから)

2012年春の年会2日目(平成24年3月20日(火)13:00~14:30)、福井大学文京キャンパス総合研究棟I J会場(総合研究棟I-1F大講義室1)において、標記の材料部会企画セッションを行いました。以下に、趣旨、プログラム、アブストラクト、座長サマリーを掲載します。

企画セッションの趣旨

国内学術小委員会委員長
福井大学 福元謙一



軽水炉の高経年化については、高経年化対応技術戦略マップ、水化学ロードマップ等において研究が行われており、安全を保つための様々な側面からの研究が行われています。しかし、広範にわたる研究課題及び要素技術開発であるため、関係者がすべての情報に触れることが難しく、最先端の知見について必ずしも共有化されていません。軽水炉高経年対応技術としては、照射脆化、応力腐食割れ、配管減肉などの課題で研究が行われておりますが、それらが相互に理解され連携することが可能になれば、

高経年化対応の研究活動は一層効果的かつ効率的になると考えられます。

本セッションでは、まず軽水炉高経年化の各研究課題の研究者による研究課題のレビューを行い、高経年化対応研究の果たす役割と課題について議論しました。特に照射脆化、応力腐食割れ、配管減肉についてのレビュー講演を通して、各研究課題の現状について議論し、原子力材料の高経年化問題についての共通の理解を深める場となるよう配慮しました。

関係者の皆さまに深く感謝いたします。

プログラム

座長 (INS S) 福谷耕司

- 1) 高経年化対策の概要と今後の取り組み (東大) 関村 直人
- 2) 照射脆化 (電中研) 曾根田直樹
- 3) SCC (IASCC含む) (東北大) 庄子哲雄
- 4) 配管減肉 (東北大) 渡邊 豊

(敬称略)

1. 「高経年化対策」とは

巨大な複雑系システムである原子力発電プラントでは、広範で複合的な経年劣化事象に関する技術的知見の獲得とシステムの全体像を踏まえた実効性のある対策を同時に進める必要がある。保全プログラムを基礎とする検査制度は、高経年化技術評価の制度を取り込んで、2009年1月より国による原子力安全規制の枠組みとなってきた。この中では多様な経年劣化を、1) 運転初期からの保守管理、2) 10年毎の中期的視点からの傾向監視、3) 30年以降の高経年化技術評価の3種の時間軸に分類し、保守管理を実施することを事業者に求めている。

国際原子力機関（IAEA）においては、「軽水炉の高経年化対策に関する安全指針」（NS-G-2.12）が、2009年に発行されている。この指針では、機器構造物の経年劣化管理のための運転経験、安全研究成果等を蓄積しつつ、保全計画立案、運転、検査、メンテナンスのPDCAサイクルを廻すことによる経年劣化管理プログラム（AMP）の最適化が必要であるとしている。このように安全を最優先して、プラントの供用期間に関係なく一定の安全水準を確保し継続的に向上させるため、プラントの長期間の供用に伴う経年劣化の特徴を把握して、これに的確に対応した保守管理を実施してゆくことが「高経年化対策」である。

2. 安全基盤研究と今後の課題

高経年化対策には最新の安全研究の成果を取り入れることが必須である。高経年化対策のための様々な基盤を俯瞰的にみると、「安

全基盤研究の推進」のみならず、その成果も生かした「技術情報基盤の充実」に加えて、「規格基準類の体系的な整備」及び「国際協力の推進」を4本柱とする戦略が必要となる。原子力安全のための技術戦略マップについては、改めて全体的な検討を進め、安全研究が継続的に推進されることが重要であると考えている。

日本の高経年化技術評価制度では、安全上重要な機器について60年間の運転を仮定して、交換、検査等を含む追加的な保全計画を策定することを求めている。膨大な数の機器とその環境条件を踏まえた部位・材料ごとの経年劣化事象のまとめ表は、高経年化対策実施基準 AESJ-SC-P005 が原子力学会標準として策定され、継続的に追補版が発刊されている。この標準は安全規制に技術評価の上、取り込まれてきた。さらに AESJ-SC-P005 は英訳され、IAEA の指針 NS-G-2.12 の下での知識ベース（IGALL：International Ageing Lessons Learned）の基盤となっている。各国の安全規制制度は多様であり、定期安全レビュー（PSR）を基盤とする日本やフランス等の進め方に加え、米国のライセンス更新制度もあるが、これらに必要な技術情報基盤を的確に整備してゆくことが重要である。

中性子照射脆化、照射誘起応力腐食割れ、疲労割れ、ケーブルの劣化、コンクリート構造物の劣化等の主要な経年劣化事象に関する知識基盤の拡大に加えて、システム安全を確保するためには、システムのオブソレッセンス（陳腐化）に関する課題にも取り組みも必要となる。技術進展が取り込まれない設計の旧式化、運転管理計画や規制計画等の陳腐化のみならず、組織や体制が現実に即さなくな

ることや生産中止による予備品等の欠如、技術者の退職等による技術支援の欠如といった、技術陳腐化も課題となる。

さらに今後は廃炉完了時までを見据え、ライフサイクルを通じた経年劣化とその管理に関する研究を進める必要がある。経年劣化管理プログラムは運転初期から廃炉に至るまでのシステム安全を確保できるように整備されなければならない。一方で、廃炉材料から

の知見の抽出を効果的に進めることも重要な今後の課題である。

(平成 24 年 3 月 17 日受理)



原子炉压力容器鋼の照射脆化

(財) 電力中央研究所 曾根田直樹

1. はじめに

原子炉压力容器鋼は運転中の中性子照射を受けて材料の機械特性が変化する。すなわち、シャルピー衝撃試験において、破壊形態が延性から脆性に変化する延性－脆性遷移温度が上昇するとともに、延性破壊領域での靱性（上部棚靱性）が低下する。これらを総称して照射脆化と呼ぶが、照射脆化の程度は監視試験による実験的把握と、脆化予測法により計算される予測値の組み合わせで評価する。その結果は、压力容器の起動停止および耐圧試験の条件設定や過渡事象時の構造健全性評価で使用される。本稿では、監視試験と脆化予測及び健全性評価の現状と今後の課題について述べる。

2. 監視試験と脆化予測による脆化量及び健全性評価の現状

監視試験では、压力容器と同一の鋼材から作製した試験片を照射カプセルに収め炉内で照射し、規格に定められた頻度で取り出して

試験を実施する。監視試験片は压力容器の内側に設置されるため、照射量が压力容器鋼よりもやや多く、照射脆化を先行的にモニターすることができる。一方、脆化予測法は、鋼材の条件（化学成分）や照射の条件（照射量、温度、照射速度）をもとに遷移温度の上昇量および上部棚靱性の低下量を予測する。予測値は脆化量の平均値の予測値であるため、監視試験が複数回実施されている場合には、その結果をもとに予測値を補正したうえで、データのばらつきを考慮に入れたマージンを上乘せし、常に脆化量を安全側（遷移温度を大きく目、上部棚靱性を小さく目）に評価している。

照射脆化の要因については 1990 年代以降、原子レベルでの金属組織の分析技術が飛躍的な向上により理解が大幅に進んだ。三次元アトムプローブ法、陽電子消滅法、透過電子顕微鏡などを組み合わせた実験により、照射脆化が「溶質原子クラスター」と「マトリックス損傷」の形成によっており、特に前者では不純物の銅の含有量がクラスターの形成に大

大きく影響することが明らかになった。国内外で開発されている近年の脆化予測法では、このようなメカニズムに関する新たな知見を反映したものとなっている。遷移温度上昇に関する国内脆化予測法は、日本電気協会の JEAC4201-2007 に規定されており、照射脆化のメカニズムを反応速度論に基づく方程式により記述し、脆化量を計算する手法となっている。

JEAC4201-2007 は 2006 年末時点での国内の監視試験データをベースに開発されており、その後、特に PWR において従来よりも照射量が高い監視試験データが得られるようになってきた。高照射量のデータは概ね脆化予測法により予測可能であるが、最近の例では、九州電力玄海 1 号機の第 4 回監視試験において、実験により決定された遷移温度の上昇量が脆化予測法の予測値を上回るという結果となった。

一方、原子炉圧力容器の構造健全性については、万一の事故時に冷却水が注入された場

合を想定した加圧熱衝撃事象 (PTS 事象) に対して、昭和 58 年から「原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験実施委員会 (PTS 委員会)」を設立し、9 か年をかけて体系だった研究を行い、破壊力学試験及び実機大のモデル試験により健全性及び評価手法の実証が行われ、JEAC4206-2007 に規格化された。玄海 1 号機に対しては、監視試験データに基づく運転管理がなされ、また 60 年運転時においても PTS 事象や上部棚領域での健全性が十分に維持されることが示されている。

3. 今後の課題

軽水炉の運転期間が長くなることにより圧力容器が受ける中性子の照射量も大きくなってきており、高照射量の領域での予測値をタイムリーに見直すことや、最新知見を踏まえ健全性評価手法を高度化することが望ましい。

(平成 24 年 3 月 17 日受理)

SCC (IASCC 含む)

—環境助長割れ発生・進展メカニズム解明と実機における割れ挙動予測—

東北大学未来科学技術共同研究センター 庄子哲雄



1. はじめに

環境助長割れは、古くて新しい材料損傷であり多くの機器構造物等における経年劣化現

象の大きな割合を占めている。1960 年代の沸騰水型原子力発電プラントにおける鋭敏化ステンレス鋼再循環系配管の応力腐食割れに始

まり、最近の非鋭敏化 316L ステンレス鋼 PLR 配管、コアシュラウドさらには加圧水型原子力発電プラントにおけるニッケル基合金の PWSCC あるいは限定的ではあるが冷間加工を受けた 316 ステンレス鋼の SCC 等は現在も散見されている。また最近では、原子力発電所の長供用期間の流れより、環境疲労に関する関心も高く、環境による疲労寿命短縮の程度を示す環境係数 F_{en} を用いた累積疲労評価が行われてきている。このような背景を踏まえ、昨今の原子力発電設備における環境助長割れ発生・進展に関する関心は益々高くなってきている。しかしながら、SCC 関連事象の本質的な解決を目指すために不可欠な割れ発生・進展メカニズムについてはいまだに未解明の部分が多く、その解明には一層の努力が必要であるが、海外においては SCC き裂発生・進展はプラントの安全性に直結する LOCA の主要な要因となる劣化事象として認識されており、多くの R & D が推進されている

2. 環境助長割れ発生

2.1 関与因子の多様性

環境助長割れ現象の発生に関わる因子は多様であり、その予測には、学術的な基礎研究の積み重ねが不可欠である。SCC 発生過程の時系列を考えれば、特に製造過程で導入される初期条件の重要性が認識されてきている。すなわち製造過程での冷間加工や表面加工による硬化、あるいは残留応力の発生等を初期条件として考慮しなければならない事を示している。筆者らは、これまで表面粗さに依存したアニオン種の局所濃縮並びに鏡面研磨による濃縮の緩和効果等について実験データを示してきたが、SCC 発生には、このように環境の時間経過等が複雑に関与する多段マルコフ過程のような現象である。したがって、こ

れまでのように、その素過程を個別に解明しても、その全貌の解明には直接的には結び付かない場合が多い。

2.2 酸化に及ぼす水の影響

対象を原子力発電プラント機器構造物に限定すると、高温水環境が主たる腐食環境となる。水は基本的な腐食媒体であるが、温度領域により酸化の状況が異なる。常温近傍では主に溶解反応により金属が失われる反応が主となる一方で、300 度程度の高温水環境下では、高温酸化に近い固相酸化の様相を示してくる。軽水炉における高温水による酸化は多様な意味合いを持っている。酸化局在化過程と SCC 発生予測 SCC 発生影響因子の多様性並びに複雑性を踏まえ、それらの結果としての SCC 発生表面における酸化に着目して SCC 発生過程を捉えようとする研究が進められてきている。また、経済産業省原子力安全・保安院の高経年化対応技術強化基盤整備事業の一環として、この酸化局在化に基礎を置いた応力腐食割れメカニズム解明ロードマップが策定されている。応力腐食割れの発生は、表面における酸化が特定位置(粒界も含めて)に局在化していくことであるとの仮説に立つものである。

2.3 酸化の加速に及ぼす水素の影響

最近の量子化学分子動力学による金属の水分子による酸化挙動の解析によれば、水分子から乖離した水素が、金属内に拡散するにつれて負の電荷を有することが示されており、このことにより、酸化の局在化並びに加速が生じることが示唆されている。水素は金属内へ拡散とともに水素の電荷が変化する様子が明らかにされてきている。

2.4 照射誘起応力腐食割れ

照射誘起応力腐食割れの要因はさらに複雑である。材料因子として照射硬化、照射誘起偏析等、力学因子としてひずみ硬化特性、変形特性さらには環境因子としてラディカル形成、放射水化学等々が関わっているが発生に関しては照射量と SCC 発生限界応力の関係も示されている。

る。EBSD による結晶方位解析や局所的な結晶の方位をずれに基づく KAM (Karnel Average Misorientation) の評価によれば、そのひずみは 10% 超の大きな値で特に転位密度の集積による結晶方位のずれは、結晶粒界近傍に集中し IGSCC の要因となっている。

(平成 24 年 3 月 17 日受理)

3. 環境助長割れの進展

3.1 き裂進展則

き裂進展速度とき裂先端ひずみ速度の関係は関係式：

$$\frac{da}{dt} = \kappa_a \cdot (\dot{\epsilon}_{ct})^m$$

により表現できる。固相酸化に基づくき裂進展則は次式で示される。

$$\frac{da}{dt} = [(k_1)^{(1-m)} \cdot (\epsilon_d)^{(-m)}] \times \left\{ \frac{\alpha_2}{E} \cdot \left(\frac{n_p}{n_p+1}\right) \cdot \lambda^{\left(\frac{n_p}{n_p+1}\right)} \cdot (\sigma_y)^{\left(\frac{1-n_p}{n_p+1}\right)} \cdot [K]^{\left(\frac{2n_p}{n_p+1}\right)} \cdot r^{\left(\frac{-1-2n_p}{n_p+1}\right)} \right\}^m \frac{da}{dt}$$

この表示式は、特に SCC の下限界特性 (KISCC) や、SCC 第 II 領域のプラトー速度領域を仮定することなく自ずとこれらの特性が含まれている。



3.2 溶接熱影響部における溶接ひずみによる硬化とき裂進展

多くの環境助長割れ (SCC) は、溶接部に生じている。BWR 環境下における再循環系配管やコアシュラウドにおける割れや PWR の SG 管台入口異材継ぎ手部における 316 鋼の割れ等、すべて溶接熱影響部に発生している。溶接ひずみによる硬化と、表面加工による硬化の双方が関わりあっていることが示されてい



軽水炉でこれまで経験された配管減肉現象は、主として流れ加速型腐食（Flow Accelerated Corrosion）あるいは液滴衝撃エロージョン（Liquid Droplet Impingement）によるものである。このうちFACは、酸化皮膜形成を介した鉄の溶解が流れによって加速される現象と理解されており、単相流、二相流のいずれにおいても生じる。比較的広い面積が減肉するため一旦破損に至ると大量の冷却水が漏洩する可能性があることから、注意を要する現象である。配管減肉管理に関する一連のJSME規格が2005年および2006年に発行され、また、経産省の高経年化対策強化基盤整備事業あるいは電気事業者等による研究が精力的に実施されるなど、配管減肉管理に関連する諸分野の技術レベルは近年着実に強化されてきている。本稿では、FAC現象の理解と予測技術に絞って現状を概説する。

1. 流体力学因子

FACの本質的な流体力学因子は配管壁面近傍の物質移動係数であり、流速や乱流エネルギー等は物質移動係数を介して間接的にFACに影響を及ぼすというのが現在の有力な立場である。減肉管理においては局部減肉傾向の把握が重要であるが、局所的な流れ場のマクロな構造が壁面近傍の流れ場を介して壁面近傍の物質移動係数にどのように影響を与えているのかという観点での研究が行われてきている。局所的な流れ場の構造はPIV等の可視化

計測手法により理解が進んでおり、オリフィス下流などの減肉しやすい配管要素で多くの計測例がある。一方、物質移動係数の直接計測は必ずしも容易でないため、運動量と物質移動のアナログが成立すると仮定の下、数値計算で再現した流れ場から評価パラメータを抽出して物質移動係数の評価や減肉速度分布との比較を試みることが行われている。評価パラメータとして壁面近傍の摩擦速度を用いた研究では、減肉速度が物質移動係数に比例すると報告されている。また、熱と物質移動のアナログより、熱伝達係数から物質移動係数を評価した例や、壁面せん断応力分布と減肉速度を比較した例がある。運動量・熱・物質移動のアナログについては、とくにオリフィス下流などの剥離域やFAC特有の鱗片状模様のような粗面での成立性について議論があり、今後検討すべき課題である。

2. 水化学因子および材料因子

水化学因子は材料表面に存在する酸化皮膜（主としてマグネタイト Fe_3O_4 ）の安定性に影響を及ぼす。この場合、マグネタイトの溶解度が重要な因子と考えられている。材料中のCr濃度などの材料因子は、皮膜の緻密性に影響を及ぼすと考えられている。

(1) 温度の影響：単相流下でのFACは発電プラントのいずれの温度域でも発生し、その速度は中性純水条件、アルカリ条件どちらも

130°C-150°C付近で最大となる。マグネタイト溶解度の温度依存性と物質移動の温度依存性との総合的な影響として 150°C近辺に極大を生じるとの説が有力である。

(2) pH の影響：pH が上昇するにつれて FAC による減肉速度が小さくなるのはマグネタイトの溶解度が pH の上昇に伴って小さくなるためとされている。一部の PWR2 次系では給水の pH を 9.2 程度から 10 近辺まで高める運用がなされている。pH 調整剤としてアンモニアに代わりエタノールアミン (Ethanol Amine : ETA) あるいはモルフォリンを用いた場合の影響についても報告があり、いずれの溶液中ともに減肉速度を試験条件温度での pH に対し整理すると、アンモニア溶液中での曲線とほぼ一致する。従って、pH の影響を整理する場合には、環境温度での pH を用い整理することが肝要である。

(3) 溶存酸素の影響：pH7 では数十 ppb 程度、また pH9.2 では数 ppb 程度の溶存酸素が存在すれば、減肉率が極めて小さくなる。安定な鉄酸化物が Fe_3O_4 から溶解度の小さいへマタイト Fe_2O_3 に変化するためと考えられている。

(4) 鋼の成分の影響：材料中に含まれる Cr、Mo、Cu などは FAC を抑制する。特に Cr は FAC に対して大きく影響する。Cr の効果については、皮膜の緻密性に影響し、皮膜欠陥 (空孔) でのイオンの拡散を抑制するとの説と皮膜内に Cr が濃縮し皮膜の保護性を高めるとの説がある。

3. FAC 予測コード

FAC 予測コードに関しては、国外では 1980 年代までのモデル化研究の成果を用いて、BRT-CICERO、CHECWORKS、COMSY といった予測コードが開発され、既に実機プラント配管の減肉管理に適用されている。ただし、これら

のコードは経験則的部分も少なくない。

一方、最近、我が国においては、科学的意味づけがより明確なモデルならびにコードの開発が行われてきており、

- ・ 配管体系に応じた一次元及び多次元の CFD 解析に、酸素・ヒドラジン反応を考慮した配管流路に沿った腐食環境評価と電気化学・酸化皮膜成長モデルを組み合わせた FAC モデル
- ・ 酸化皮膜から境界層を通した沖合いへの拡散が FAC 律速過程であるとの仮定の下で主として鉄の飽和溶解度と物質移動係数の積からなる FAC モデルを提案し、これに偏流域壁面近傍の変動流速の効果を加味した評価手法

などが提案されてきている。

本稿の内容は、JSME「配管減肉管理高度化に向けた最新技術知見適用化のための調査研究分科会」(主査：稲田文夫)での調査を参考にしている。関係各位に謝意を表する。

(平成 24 年 3 月 17 日受理)





本セッションは、材料部会会員に事前に配信された開催案内のとおり、軽水炉高経年化の各研究課題の研究者による研究課題のレビュー講演を通してお互いの理解を深める一助として、高経年化対応研究に果たすべき役割と課題について議論を行うこと、特に材料研究と関連する照射脆化、応力腐食割れ、配管減肉についての学術的な見地からのレビュー講演を通して各研究課題の問題点の現状について議論し、原子力材料の高経年化問題について参加者が深く共通の理解を深める場となること、を期待して行われた。

会場には立ち見の方も入れて約 90 名の方が参加されており、材料関係者のみならず水化学関係者、電力の保全関係者の方々も見受けられ、関心の高さが感じられた。講師の先生方は改めて紹介するまでもなくそれぞれの分野で先導的指導的な活動をされている方々であり、20 分という短い時間ではあったが学術的技術的な課題についての考えが聴衆に十分に伝わる優れた講演であったと思う。個々の講演についての概要は、当日配された予稿がそのまま本レターに採録されるのでそちらを参照されたい。講演の共通した結論として、劣化現象のメカニズムや支配因子の解明を進めることが非常に重要な課題であること、さらに得られた知見を予測式などの形で規格や基準にまで仕上げ、実際に保全活動に反映して安全に貢献できるものとしていくことが重

要であることが示された。また、個別の重要機器の劣化評価だけでなくシステムとしての安全の視点が今後より重要であること、研究の方向や進め方などについてロードマップのような形で合意形成していくことの重要性も示された。

材料部会が 2012 年春の福井で高経年化を取り上げたことは、いろいろな意味で有意義であったと感じている。福島事故に関連しては、昨年までに敦賀 1 号機、美浜 1 号、福島第一 1 号が 40 年目の高経年化技術評価を終えたばかりであること、3.11 福島事故に高経年化の影響があったのかなかったのかが重要な論点となっていること、原子炉規制法の改正において 40 年寿命と 60 年までの延長について根拠や妥当性に関して議論されていることがあげられる。また、福井県では 13 基の軽水炉すべてが停止しており、再稼働の地元判断に関して高経年化を含めた福島事故の知見を取入れた基準の設定が強く求められており、高経年化に関する関心は高い。そのような中で、講師の先生方とは事前に連絡を取り、学会活動として材料の経年劣化について研究の進め方も含めて技術的学術的な観点からレビューし課題を提示していただくこととした。

司会の未熟さもあつという間に時間が立ってしまい、十分な議論ができなかったことが残念かつ申し訳ない思いでいっぱいであるが、軽水炉とは異なる研究対象をお持ちの

参加者にも、材料挙動の理解が高経年化対策のキー技術のひとつであることを理解いただけ今後関心を持っていただくことができたと信じている次第である。

(平成 24 年 3 月 21 日受理)



Ⅲ. 第3回材料部会奨励賞受賞者のよるこびのことば

材料部会奨励賞選考会議による審査の結果、第3回材料部会奨励賞に、京都大学大学院エネルギー科学研究科博士課程の藪内聖皓氏と、日本核燃料開発株式会社の坂本 寛氏が選考されました。表彰式は、2011年秋の大会材料部会第23回総会（2011年9月22日12:00~13:00、北九州国際会議場）において執り行われました。藪内さん、坂本さん、おめでとうございます。

奨励賞受賞の意味を改めて考えて

受賞題目：鉄モデル合金の照射挙動における Mn 影響に関する研究

京都大学エネルギー科学研究科 藪内聖皓



このたびは、材料部会奨励賞をいただき誠にありがとうございました。

本研究は、原子炉圧力容器の照射損傷の基礎研究としてスタートしました。圧力容器鋼は様々な添加元素を微量に含んだ低合金鋼となっていますが、それぞれの添加元素が照射損傷に及ぼす影響については完全には明らかにされていません。本研究では、鉄にマンガンを加えた、Fe-Mn 二元系合金において顕著な照射脆化が現れることを初めて見出し、その脆化メカニズムの一因を明らかにしています。もちろん、Fe-Mn 二元系合金は、実際の圧力容器鋼とはかなりの隔たりのある材料です。しかしながら、Mn は圧力容器鋼に最も多く含まれる元素であり、本研究成果は、圧力容器鋼の照射脆化メカニズムを解き明かす一翼を担うものであると感じています。

福島原発の事故以来、原子力の安全神話は崩れ、ゼロからの安全性の見直しが必要とされています。今後、原子力発電をどのように扱っていくかは、我々国民一人一人が、日本

の将来像とエネルギー事情をしっかりと描き、決めていく必要があります。現時点では、今後どのようなようになるかは不透明ですが、どちらにせよ、原子力発電を即ストップすることは不可能ですので、高経年化を含めた安全に関する研究により高いレベルでの成果が求められると思います。本研究が、このような時期に受賞を受けたのも、総会の冒頭に部会長が言われた、「我々は技術に対して真摯でなくてはならない」という言葉そのものなのだと感じています。今後も、科学技術に対して真摯に向き合い、社会に貢献できる研究を続けていければと思っております。

最後に、本受賞は博士後期課程での研究成果であり、指導教官である木村晃彦教授、笠田竜太助教をはじめ、多くの先生方のご指導の賜物であります。この場を借りて深く感謝申し上げます。

(2012年1月9日受理)

材料部会奨励賞を受賞して

受賞題目：高燃焼度軽水炉燃料被覆管の水素脆化に関する研究

日本核燃料開発株式会社 坂本 寛



今回は大変光栄なことに、第3回材料部会奨励賞を受賞することができました。選考委員の皆様、また研究に協力いただいた皆様、ありがとうございました。受賞対象は「高燃焼度軽水炉燃料被覆管の水素脆化に関する研究」であり、具体的には、高燃焼度BWR燃料の出力急昇試験で見出された「外面割れ」と呼ばれる新しい破損機構に関する研究、使用済燃料の乾式中間貯蔵に関する「水素化物応力再配向」に関する研究、また、それらの根本的な問題である「水素吸収機構」に関する研究でした。いずれの研究も、多くの皆様のご協力、ご指導なしでは取り組むことができないテーマでした。改めて皆様にご感謝申し上げます。まだまだ、研究しなくてはならない内容は数多く残されており、今後とも、

変わらぬご指導・ご鞭撻をお願い申し上げます。

福島第一事故を受け、原子力、特に炉心材料・燃料に関する研究は、根本的な方向付けを含めて大幅に見直されるものと思われます。しかしながら、いずれにしても炉心材料・燃料の重要性は揺るぎないものであり、今後も微力ながら日本、ひいては世界の原子力技術に貢献できればと願っております。

最後になりましたが、「奨励賞」は若手のための賞です。これからも、この材料部会奨励賞を一つの励みに若手研究者の皆様が益々ご活躍していただくことを期待します。

(2011年10月12日受理)





賞状を受ける藪内聖皓氏（左） 右は青砥部会長



受賞の挨拶をする坂本寛氏

IV. 国内会合報告

第2回材料-水化学部会合同「構造材-水相互作用」勉強会報告

日本原子力研究開発機構 若井栄一、塚田 隆



第2回材料-水化学部会合同勉強会は、2011年10月28日（金）に京都大学宇治キャンパス内のエネルギー理工学研究所大会議室にて開催され、19名の参加者を得て3件の講演と活発な討論が行われた。

本合同勉強会は、各種原子力プラント及び他の工業プラントでの「構造材と水の相互作用」に関わる損傷現象とその機構及び対策に関する研究・技術などについて議論を深め、メカニズムを明らかにし、それにより、今後発生する可能性のあるより広い分野における各種材料損傷を未然に防止することにつなげることを目的としている。

第1回会合では、「流れ加速型腐食(FAC)による配管減肉現象」をテーマとして、日本原子力学会の会議室(東京)にて平成23年1月27日に開催し、4件の講演が行われた。時間的にやや制限があったものの、議論が活発に行われ、両部会の交流を深められた。

第2回合同勉強会は平成23年4月から5月頃に実施する計画をしていたが、3月11日の東日本大震災と福島原発事故の影響で開催を暫く見合わせた。また、福島原発事故及びその後の対策検討という大きな

課題があり、「構造材料と水の相互作用」というキーワードを保ちつつ、ある程度それに即した形となるように考えると共に、前回より議論の時間が取れるように1件当たり1時間程度として次のような3件の講演を行うことにした。

- 1) 低炭素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酸素および溶存水素の影響 木村晃彦氏（京都大学）
- 2) SiC_f/SiC複合材料の軽水炉への適用について 檜木達也氏（京都大学）
- 3) ステンレス鋼と高温水蒸気の反応（文献調査） 塚田 隆氏（原子力機構）

木村晃彦氏の講演では、低炭素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酸素および溶存水素の影響について、東電のシラウドに発生したヒビに関連する調査的研究とした内容が紹介された。本研究では市販のSUS304鋼、SUS304L、SUS316L鋼などを用い、冷間加工を0~75%まで施した試料にて、溶存酸素(8 ppm)や水素濃度(0.4 ppm, 1.4 ppm)をコントロールした環境下(288°C、 $5.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 、電気伝導度 0.1 $\mu\text{S/cm}$ 以下、水圧 7.8 MPa)でSSRT(低歪速

度試験)などを平板の微小試験片(全長 16mm、幅 4 mm、ゲージ長 5 mm、ゲージ幅 1.5 mm、板厚 0.4 mm)を用いて実施した結果を解析評価したものであった。その評価として SCC 機構は高電位と場合とは異なり、低電位の場合には水素脆化を考えるべきであるという見解が示された。質疑では、試験で調べた水素濃度の設定 (0.4 ppm、1.4 ppm) についての問いがあり、BWR のシュラウドの環境を推定した領域であろうと考えて行っているもので、炉内の溶存水素濃度では数十 ppb から最大で 500ppb (0.5 ppm) ぐらいと推定されている。現在、規格関係でこの辺の評価法の作成が行われ始めており、モデルはあるものの、実測によるものモデルではないため、本研究はこれに対して非常に参考となる試験条件となっているので、とても良い成果であるというコメントがあった。また、熱鋭敏化処理した 316L 鋼での EPR 測定の結果については、通常の値よりも悪くなっているようにも見られるので、試験に用いた材料の炭素濃度がやや高いのでは? という問いがあったが、その理由については冷間加工によって EPR-DOS を低下させており、75%の CW 材では 700°C で 100 時間の鋭敏化処理により、その値をほぼゼロまで低下するためであることが説明された。

檜木達也氏の講演では、SiC_f/SiC 複合材料の軽水炉への適用を検討した内容が紹介された。まず、リーマンショック前後での各発電システムのコスト評価の比較を行い、2008 年においても石油火力やその他の発電システムが原子力発電に比べて大きな開き (3 倍以上) があり、原子力システムのメリットが示された。次に、京都大学と米国 ORNL

の間で実施している SiC と SiC_f/SiC 複合材料の協力研究を中心とする話と共に、米国の原子力政策について福島原発事故前とその後の変化についての調査内容が紹介された。米国の政策は基本的に以前のままとなっているが、これまでに比べて安全性評価を高める方針が取られることが述べられた。また、被覆管材はこれまでと同じとするが、燃料棒中の燃料粒を SiC など被覆する研究開発が進み、2020 年までに商用炉でテスト試験を始め、2030 年までにすべてのものをそれで使用する計画が進んでいることが紹介された。さらに、SiC や SiC_f/SiC 複合材料について、水蒸気による腐食挙動や照射による熱伝導の低下などの特性評価についても併せて最近の研究が紹介され、特に、繊維強化ポーラス SiC セラミックスの適用範囲の広がり、及び工業化に向けた今後の期待などの豊富が力強く述べられた。質問では、繊維強化ポーラス SiC セラミックスの除熱性能や表面のポーラス構造による Clad の付着と水の温度分布の不均一性の関する対応方法の内容が確認され、さらには実用化に向けたコスト削減などが今後の重要課題であることが熱心に議論された。

塚田隆氏の講演では、ステンレス鋼と高温水蒸気の反応の文献調査に関する内容が紹介された。本調査研究では次の 3 点を焦点を絞って分析が行われたものである。

(i) 福島第一原発の水素爆発の原因はジルカロイ被覆管と水蒸気の反応による大量の水素発生であったと考えられるが、他の炉心構造材料の寄与はどの程度だったか?

(ii) シビアアクシデント (SA) 発生時にも水素発生の少ない被覆管材料は開発できないか? また、燃料被覆管材としてオーステナ

イト系ステンレス鋼の適用性はどうか？
(iii) シビアアクシデントの進展推測精度の向上、評価コードの精緻化に必要なステンレス鋼に関わる課題は何であろうか？

本解析評価では、燃料被覆の設計基準事象を超える温度(1200℃)となる場合、ジルカロイ-水蒸気による酸化反応が急速に進行することが示された。ジルカロイとステンレス鋼の水蒸気酸化を比較した文献では、1200℃付近までジルカロイより小さいが、それ以上の温度では両者の差は小さいかまたは逆転する。ステンレス鋼の酸化反応の発熱量は比較的に小さいので、事故時の温度上昇への寄与は小さいと考えられ、事故シナリオにより両材料の挙動評価が異なる。軽水炉の燃料被覆管材料は、開発当初はステンレス鋼であったが、1960年代交換から1970年代にかけて経済性及びBWRにおける特性の限界が見えていたため、ジルカロイに置き換えられた経緯などが説明された。以上の点を総合的に考察した結果、被覆管材としてのステンレス鋼の優位なメリットは特になくという見解が示された。さらに、ジルカロイ相当の高い融点を持ち水蒸気との反応による水素発生が少なく、高温でも高強度を有する被覆管候補材料として、最近、米国がSiCセラミックスの多層複合材料が着目され、その開発が進められている

ことが紹介された。質疑では、SA時の際に、水素がいつ発生し、酸化反応がいつ生じたかなどについて、そのメカニズムの詳細が議論された。

全体の総合討論では、福島原発事故のシビア-アクシデントについて意見交換がなされた。その現象が熱力学的に取り扱えるものであるか？それとも速度論的に取り扱えるものであるか？についての評価は、現在の所、まだ明らかではないと考えられる。これに対する結論を導くには、それに合った小体系の実験を行って、解析することが必要であろうという意見が出されるなど、第1回勉強会と同様に非常に活発な議論が行われた。

本合同勉強会の開催は両部会が持ち回りとして、次回は水科学部会側が運営するとし、テーマとしては、例えば、「海水の影響、海水腐食関係」も良いのではという意見が出された。また、次の夏季セミナーは3部会合同(水化学(主幹事)、材料、燃料)があることもアナウンスされた。本勉強会は、今後、年3回程度のペースで継続し開催したいと考えているため、活発かつ有益な会合となるよう部会員各位のご協力とご指導を宜しくお願いいたします。

(2012年3月31日受理)



V. 国際会議報告

第 15 回核融合炉材料国際会議 (ICFRM-15) 報告

日本原子力研究開発機構 渡辺淑之、小沢和己、濱口 大



第 15 回の ICFRM は、2011 年 10 月 16 日から 21 日までアメリカのチャールストンにて開催された。チャールストンはサウスカロライナ州南東部に位置する州内最古の港湾都市であり、古き良き時代のイギリス文化を彷彿させる街並が印象的である。また、南北戦争発端の地として知られる歴史的な街でもあり、サムター要塞や While

Point Gardens (南軍が連邦支配下のサムター要塞に大砲攻撃を仕掛けた海岸) などは当時の戦いの記憶を今に伝えている。

会議は 28 ヶ国から計 570 件の発表があり、日本からの発表数が最多の 143 件であった。発表内容は、低放射化フェライト鋼、フェライト系 ODS 鋼、SiC/SiC 複合材料、バナジウム合金、タングステンなどを対象

ICFRM-15 PROGRAM

Time	Sun 16	Mon 17	Tues 18	Wed 19	Thurs 20	Fri 21
8:00						
8:15					Registration	
8:30		Opening Ceremony				
8:45		Keynote Talks • E. Synakowski • M. Merola • E. Storm	O-4: Plenary I	O-7: Plenary	O-9: Special Session Bridging Advanced Materials into Design	O-11: Plenary III
9:00						Coffee Break
9:30		Coffee Break	Coffee Break			
10:00						
10:30		O2-A: Ferritic/Martensitic Steels	O2-B: Materials Technology I: In Vessel Materials	O5-A: ODS Steels	O5-B: Refractory Metals	O-8A: Radiation Effects III: Micro-structural Evolution and He/H Effects
11:00				O-8B: Materials Technology III: Facilities and Strategies		O-12A: Steel and Radiation Effects
11:30						O-12B: Applied Materials
12:30						
1:00		Lunch and Poster Session A		Lunch and Poster Session B		Lunch On your own
1:30				Lunch and Poster Session C	IEA Satellite Meetings	
2:00					Lunch and Poster Session D	O-13A: Advanced Characterization Techniques
2:30						O-13B: Manufacturing and Joining
3:00						
3:30		O3-A: Radiation Effects I: Modeling	O3-B: Structural Ceramics	O-6A: Radiation Effects II: He and H Behavior (to 6:10 pm)	O-6B: Materials Technology II: High Heat Flux Materials and Components (to 5:50 pm)	
4:00					O-10A: Radiation Effects IV: Experimental	O-10B: Blanket Materials
4:30	Registration			Banquet		Closing Ceremony
5:00						

とし、照射効果をはじめとする学術的な研究をはじめ、ITER に向けた最新情報や DEMO

炉を目指した核融合炉工学に関する研究開発まで広範囲にわたるものであった。

低放射化フェライト鋼に関しては、EU と日本を中心として、母材をはじめ溶接材に対する照射効果に関する発表が数多くあった。やはりヘリウム効果に関する議論は活発に行われ、また、久々にイオン照射手法を用いた重照射に関する報告がロシアを中心に行われ、スエリング挙動等について多くの注目を集めていた。更に、最新の透過型電子顕微鏡を用いた転位集合組織の三次元トモグラフィ解析に関する発表は、内部組織の三次元可視化という観点から非常に印象的であったとともに、フェライト鋼の強度発現メカニズムの解明といった観点からも大いに期待されるものであった。一方、フェライト系 ODS 鋼に関しては、米国と EU を中心に原子炉を用いた中性子照射の結果を中心とした成果発表が為され、特に最新の透過型電子顕微鏡と電子エネルギー損分光法 (EELS) を組み合わせた分散強化粒子の詳細な解析が印象的であった。SiC/SiC 複合材料の研究開発においては、工業生産までのプロセスの見通しが比較的成立しており、かつ耐照射特性が期待される化学気相浸透法 (CVI) やナノインフィルトレーション遷移共晶法 (NITE) で作製されたいわゆる「標準」試料の力学特性に及ぼす中性子照射効果に関する成果発表が目立った。具体的には、先進 SiC/SiC 複合材料としては世界初となる高線量 (~ 70 dpa-SiC) 曲げ強度特性に関するもの、繊維/マトリックス界面強度特性に関するもの、工学設計で主要パラメータとなる損傷許容性評価に関するもの、ねじり試験による SiC 接合界面強度評価に関するもの等である。上述の工学的側面を持つ発表以外にも、基礎科学的な照射効果に関する知見、例えば、

イオン照射設備や中性子照射施設を用いて SiC の照射後微細組織損傷発達過程を包括的に整理したものや、SiC の照射誘起加速クリープ機構などに関する発表があり、熱心な議論が展開された。総じて、SiC/SiC 複合材料の研究開発は、従前の中性子照射によるスクリーニングの段階から完全に脱却し、「標準」試料を用いた、照射データを含めた各種工学データの蓄積、ならびにその照射後挙動に対する学術的理解という新たな段階を迎えたと言える。また、この傾向は現在日本が精力的に実施している ITER-BA 活動の方向性とも一致するものである。



講演発表



ポスター発表

計算機シミュレーションによるモデリング研究では、純金属をはじめ、多成分系の合金やセラミクス材料での照射効果、特に、照射による原子はじき出し過程やマイクロ構造発達過程に着目した研究の成果報告が顕著であった。第一原理計算、分子動力学法、キネティックモンテカルロ法、反応速度論解析等の個々の計算機シミュレーション手法で得られた結果を有機的に繋いだマルチスケールモデリングにより現象の理解を試みた研究報告が数多くあり、活発な議論が行われていた。しかしながら、いずれも既存の現象のメカニズム究明研究の範疇に留まっており、そこで得た知見を統合し、核融合炉などの未知の照射環境下における材料挙動の理解や予測に向けた手法開発には至っていないのが現状である。これは、今後のモデリング研究における大きな課題であると共に、炉設計分野からも強く

望まれている部分であろう。

会議4日目に行われた特別セッション「Bridging Advanced Materials into Design」では、現段階で有力な候補材料の使用を想定した核融合炉ブランケットやダイバータの現実的な設計・製造に向けた活動状況が報告され、活発な議論が行われた。ブランケット構造材料として実用化の期待が最も高い低放射化フェライト鋼について言えば、大量製造、成形・加工などの技術開発に加え、照射効果を考慮した設計開発の課題と戦略が示され、多くの研究者が強い関心を示していた。

次回のICFRMは中国の北京で開催される。今後のICFRMがさらに実りある議論の場になることを期待する。

(2012年3月14日受理)



バンケット会場 (Patriots Point Naval & Maritime Museum)

第 12 回国際原子炉級黒鉛専門家会議 (INGSM-12) 報告

日本原子力研究開発機構 柴田大受



第 12 回となる国際原子炉級黒鉛専門家会議 (International Nuclear Graphite Specialist Meeting: INGS-12)が、韓国・済州島で 2011 年 9 月 20～22 日に開催されました。この会議は、高温ガス炉、炭酸ガス冷却炉などの炉内に用いられている黒鉛及び高温ガス炉への応用が期待されている C/C 複合材料などを対象とした会議で、毎年開催されています。今回は、韓国原子力研究所 (KAERI) がホストとなりました。

研究開発の側面から原子炉用の黒鉛材料

について簡単に紹介しますと、材料特性が原料や製法によって大きく異なること、同じ銘柄の黒鉛であっても材料特性にばらつきがあること、等が重要な課題として挙げられ、原子炉の炉内構造物へ適用する際には、これらを適切に考慮することが重要になります。原子力機構では、高温ガス炉である高温工学試験研究炉 (HTTR) の成果をもとに実用高温ガス炉炉に向けた黒鉛の研究を進めてきていますが、近年、欧米、中国、韓国等でも高温ガス炉のための黒鉛



INGSM-12 の参加者集合写真 (HP より <http://ingsm-12.org/>)

の研究開発が活発化してきています。

今回の会議には、日、韓、米、独、中、英、蘭などから約 70 名の参加があり、会議は一つの会場で順次講演を行う形式で進められ、招待講演 2 件を含む約 50 件の講演がありました。黒鉛の微細構造の評価、物性評価、熱特性評価、照射効果の評価、試験片の寸法効果、各国の高温ガス炉開発の状況、材料特性評価モデル開発、セラミックス複合材料、黒鉛廃棄物などのテーマについて発表があり、活発な質疑・討論が行われました。特に、照射効果の評価については、米国 INL で行われている数種類の黒鉛の照射クリープ試験経過の報告、EU の数種類の黒鉛の高温照射試験の途中結果について、微粒黒鉛と粗粒黒鉛との比較の観点

から興味がひかれました。

また、今回の会議の特徴として、一つの会場で全員参加の Discussion Session が初めて設けられたことが挙げられます。HTTR で用いられている IG-110 のような微粒等方性黒鉛では、もともと内在する気孔のサイズが小さいため有害な欠陥の検出が可能であることなどについて、受け入れ検査の観点からも活発な意見交換が行われました。

なお、次回 INGSIM-13 は、ドイツのマイティンゲンで 2013 年 9 月 23～26 日に開催の予定です。

(2012 年 3 月 8 日受理)



VI. 研究室紹介

大阪大学大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 環境エネルギー材料工学領域（山中研究室）

当研究室では、その領域名の通りセラミックスから金属まで、幅広い環境エネルギー関連の材料開発を行っています。現在の専攻・領域は2005年の環境工学専攻と原子力工学専攻との統合に伴ってできたものであり、それまでは核燃料工学領域としてアクチノイド化学の研究などがなされてきました。山中教授が1998年に着任してからは、燃料ペレット、FP化合物、被覆管の研究をより進めるとともに、熱電材料や光触媒といったエネルギー変換材料も研究対象としています。

現在のメンバーは教員4名、秘書1名、博士後期課程大学院生7名、前期課程13名、学部生7名、研究生2名（次年度から前期

課程院生）と30名を超える大所帯であり、卒論・修論のシーズンは毎年大変です。後期課程の学生は社会人1人を除いて全て外国籍で、タイから1人、韓国から3人、中国から2名が私費留学生として入学しています。言葉の壁で苦勞すると思われるかも知れませんが、日本語についても皆勉強熱心で、日常の会話のほとんどは日本語で済ませてしまいます。彼らは研究についてもハングリーで体力があり、頭が下がる思いです。もちろん日本人学生も最近はとても勤勉で粘り強く、ともに張り切って研究を進めています。欲を言えば、月1回程度行う飲み会などで近頃は大人しい学生が多く、もう少し弾けてもいいのではないかなと個



研究室メンバー全体写真

人的に寂しく思っています。

学生は熱電材料グループと原子力材料グループの二つに大きく分かれ、それぞれ週1-2回の輪講などのゼミを行い、また共通の雑誌会や研究紹介を通じて専門分野の知識の習得に努めています。現在の研究テーマの一例を以下に示します。

○ 熱電材料グループ

- ・シリコンおよびシリサイド系熱電変換材料の低熱伝導率化
- ・共鳴準位の形成による性能向上

○ 原子力材料グループ

- ・バルク金属水素化物の合成と物性評価
- ・ガラス固化体中化合物の熱力学的評価
- ・トリウム酸化物燃料の基礎物性測定
- ・ジルコニウム合金の腐食挙動評価

テーマの多くは他大学・機関・企業との共同研究であり、学生ともども勉強させて頂きながら進めています。また、2つの研究グループに分かれているといっても、試料を合成して物性を評価するというプロセス自体は同じであり、使用する装置や計算ソフトウェアの多くは共通しています。テーマに挙げた熱電材料は粒径や熱伝導率が重要なパラメータであり、この解析や制御方法を燃料ペレットに適用するなど、他の研究があることで異なる観点からのアプローチができるものと考えています。

福島第一原子力発電所の事故より、世論、また学部生からの原子力に対する眼は厳しいものとなっています。材料研究を通じ、

山積する問題を解決できる人材の育成、またその解決に資するよう精進して参ります。今後ご指導ご鞭撻のほどよろしくお願い致します。

(2012年3月7日受理)



実験室の様子：ウラン・トリウム化合物を含むバルク試料の熱・機械物性を測定しています。



建屋外観：平成24年4月に耐震改修を終え、新しくなる予定です。阪大にいられた際はぜひお立ち寄りください。

VII. JNM エディターだより

Journal of Nuclear Materials のエディターを退くにあたって

J. Nucl. Mater. 元エディター
東京大学名誉教授 石野 栞



本会報 2011 年 8 月号に室賀健夫先生からご紹介があったように[1]、1988 年から約 4 半世紀にわたり務めて来た Journal of Nuclear Materials 誌のエディターを 2011 年 12 月末で退任しました。その間おそらく 2000 編を超える論文を扱ってきたと思いますが、単に数の問題のみでなく原子炉燃料、材料の学問分野の変遷、研究者の意識の変化、学術論文に対する学界、世間一般の捉え方の変化など、文化的背景も大きく変わってきたように思います。この中に含まれる社会思潮の動向と未来に向けての問題点も気になるところです。

過去約 4 半世紀、特徴的な表層的变化の一つは地域の変化です。2000 年前後から、日本の相対的地位が低下し始めました。一方欧州では、結局長続きはしませんでした。一時期イタリアやスペインが相対的に元気であることが目につきました。アジアでは韓国、台湾に引き続き中国やインドからの論文投稿が急増しました。この傾向は今日もなお続いています。さらに、今まで投稿がほとんどなかったイランやトルコなどからも論文が投稿されるようになりました。これらは世界の経済成長と原子力技術の拡散の状況を反映するものと思われます。

2000 年前後から出版界を含め情報分野のグローバリゼーションの影響が顕著になってきたように思われます。知的所有権保護の動向と呼応して情報産業の寡占化が進められるようになり、科学技術関連の出版業界も大きく変わりました。独占化の動機をもった Agent (agent with oligopolistic mind) による情報支配につながる可能性が大きくなりつつあるように感じます。

グローバリゼーションとのつながりを実証することは困難と思いますが[2]、論文、つまり“製品”としての論文の量産化が顕著になり、これがモラルの低下を齎しています。内容的には著者の頭脳を殆ど経由していない、いわば手順として生産ルートを通ってきたような論文が増えてきました。極端な場合、“原材料”の組成を少し変えて、テンプレートとしての“生産工程”を通ってきたような“論文”も目立つようになってきました。

ここで改めて学問とは何かということについて、かねてからの筆者の考えを述べておきたいと思います[3]。学問とは「まだ見えていないものを見えるようにする」、「まだ実現していないものを実現するようにする」といった精神的営為であり、ある決められた手順に従ってある行為を行えばある成果（製品＝

論文)が出来上がるといったものではないと考えています。

このような意味で当該分野を本質的に進展させるような論文を求めることは、エディターとしての最大の望みです。雑誌の基本的方向についても、将来に向けて長い期間価値をもち続けるような論文を掲載するいわゆる Archival なジャーナルを目指すべきだというのが筆者の持論でした。このことは最近ではかなり困難な要求となってきています。このような意味で優れた論文を集めてきた専門雑誌が最近では苦境に立たされているようです。改めて、何が本質的進歩なのか、何が未解決な重要問題なのか問い直す必要があるでしょう。

若い頃、Jim Corbett が著書の中で“論文は必ずしもそれ自体で価値があるものとは限らない。ある論文は善をなすよりも悪をなす場合もある”という意味のことを言っていたことを思い出します。悪をなす論文が権威と結びついた時は危険です。このような意味で読者の自律性と権威に動かされない自由な議論が学問の進展には必須と考えています。

- [1] 室賀健夫：日本原子力学会 材料部会報：Nuclear Materials Letters (2011年8月)、pp. 27-28.
- [2] グローバル化、IT 社会と学術雑誌の関わりについて、数年前に 雑誌 Journal of Advanced Science の編集後記に短く述べたものがある。殆どの方の目にはとまっていないと思われるので、同誌の了解を得て、付録に再録する。(Society of Advanced Science は高度科学技術に係わる学会、産業界、教育界の調和、融和を図りつつ科学技術を発展させる目的で平成元年に松前達郎(東海大学総長)に

より設立されたもので雑誌 Journal of Advanced Science (JAS)を刊行している。)

- [3] 石野 栞：学問、教育に関して論じたものとして次の小論を挙げておく。ご関心の向きにはコピーを差上げることにしたい。
- ・「21世紀の工学教育」-最近の原子力教育に思うこと-、原子力システムニュース、Vol. 12, No. 3 (2001.12), pp. 1-6 原子力システム研究懇話会。
 - ・「再び教育問題によせて」-予感と期待-、原子力システムニュース、Vol. 16, No. 1 (2005. 6), pp. 1-6 原子力システム研究懇話会。

[付録]

Journal of Advanced Science 20, No.3/4 (2009年3月31日刊行)編集後記より再録

編集後記 -学術雑誌の在り様-

筆者は本誌の編集委員を務める傍ら、原子炉燃料、材料関係の国際専門誌のエディターも務めているが、最近の学術雑誌のあり方が昔と比べてかなり変化しつつあるように感じる。これは、独り学術雑誌の問題に限らず、文明の在り様全般の変化と密接に関わっているように思われる。さらに具体的に述べるならば、いわゆるグローバル化とIT社会への変容である。(この二つは相互に密接に関連している。)

グローバル化は世界共通とされる価値観の拡散現象であり、アメリカがその発信源であることに疑義はない。アメリカは良きにつけ悪しきにつけ新しい考え方の強力な発信源であり、その創造性には敬意を払うものの、

一步掘り下げてその根源を吟味することを怠ると大変な目に遭うことは最近の金融危機についても痛感される。グローバル化の根底は飽くなき利益追求の自由の確保にあると考えられ、それが成り立つ条件が確保される限りは社会にある種の活力が生まれる。(その結果がもたらす人間の存在に対する本質的な価値を問わないとすれば。) IT 社会はグローバル化を実現するプラットフォームを提供するという重要な役割を果たしている。

もっと議論を進めたいところであるが、学術誌編集の本題に戻ると、実は筆者の関係する上記国際専門誌は 2008 年から全面的に電子投稿制度の採用に踏み切った。多くの雑誌でも採用しているいわばグローバル化の波に乗った訳であるが、その背景にある思想性については殆ど議論されず、経済性と効率といった功利性が強調されたに留まる。筆者は 21 世紀のキーワードとして効率(Efficiency)よりは効果(Effectiveness)を重視すべきだと主張してきたが、この制度変更によって学術雑誌の性格が変更を受ける事は必定と懸念している。

学術雑誌には大きく分けて二つの重要な機能が予定されている。一つは重要な学術的発見、発明等の進歩を論文の形に定着させ、長期に亘って人類共通の知的財産として保存するいわゆるアーカイバルな役割と、もう一つは研究の成果を速やかに報告することにより、当該研究分野の議論を活発化し、その分野の急速な発展に資するという速報的な役割である。実は前者に属する研究論文が、特に日本を含めアジアからの論文で最近極端に少なくなった。グローバル化の影響であろうか、決められた研究費のもとで如何に効率よく多数の論文を作るかということが研究者の重大

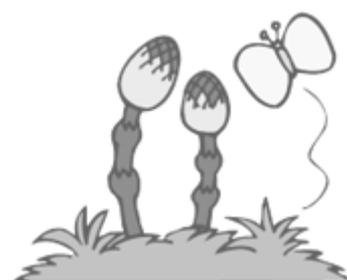
な関心事となってしまう、じつくりと腰を据えて何年かに 1 本影響力の大きな論文をまとめるという研究者が存在できない社会環境が作られてしまった。上記と関連するが、研究の姿勢には蓄積(ストック)の上に立つものと、流れ(フロー)とともに進むものがあり、殆どの研究が後者になってしまった。その結果、例えば国があるテーマを重点課題として発表すると、殆どすべての研究者がそれに沿ったテーマを掲げるといったことが日常となり、それに対する反論なり深い反省が殆ど聞こえてこない。これは大変危険な状態である。

わが JAS は東海大学では学位論文の発表雑誌として指定されているように、アーカイバルな役割も期待されていると思うが、一方で、従来から会員相互の情報交換、シンポジウムの報告など社会貢献の上でも重要な役割を果たしてきた。

折りに触れ本誌の現状と役割についても意見交換することは有意義と思われる。

(編集委員: 石野 栞(いしの しおり))

(2012 年 3 月 2 日受理)



VIII. 材料部会 最近の動向

新たに日韓セミナーを開始するにあたって

国際学術小委員会委員長
電力中央研究所 土肥謙次



原子炉燃料・材料挙動に関する日韓セミナーは、材料部会、核燃料部会、核融合工学部会の3部会、及び韓国原子力学会（KNS）の核燃料・材料部会が担当し、2002年3月に神戸で初回会合が開催されて以来、10年余りの間、情報交換の場として両国の多くの学会員の方々に親しまれてきた。従来、本セミナーは日韓双方の原子力学会に併せて春、秋の年2回の頻度を基本に、至近では2010年10月に韓国・済州島で開催された。その後、日韓両国でセミナーの開催頻度やテーマ選定などについて見直しの機運が高まったこともあり、2011年春は元々開催を見送っていたが、そこへ3.11の震災が訪れた。折しも2011年度は材料部会が本セミナーの幹事役を担当することになっていたものの、東京を拠点とする報告者も少なからず混乱の渦中であって引き継ぎ直後の3～4月は身動きがとれず見直しの検討も中断せざるを得ない状況であった。このため、3部会の関係者が集い検討を再開したのは5月後半になってからである。

そこに至るまでの間、各部会にて本セミナーの課題が検討されてきたが、情報交換の場として本セミナー以外に他の会議体が存在するようになったことや、年2回の開催が日韓双方で負担になっていることなど、情勢に合

わせた開催意義の再検討を含め負担感の解消などが主な見直しの理由になっていた。これらを受け、国内の各部会及びKNS側との検討を行ったところ、本セミナーは役割を終えたものと判断し終了することが合意された。一時はANFC（Asia Nuclear Fuel Conference）への移行も検討されたが、ANFCでの核融合工学分野の取り扱いが困難であることなどが判明したため、当部会と核融合工学部会は2部会合同でKNS燃料・材料部会と新しいセミナーをスタートすることとし、核燃料部会は新しいセミナーには参加せずANFCへ移行することとなった。一方、開催頻度についても年1回の頻度に改め日韓交互に開催することで合意された。KNS側は核融合工学部会の参加を検討したが既に他のチャンネルもあることなどから不参加の意向となったものの、新しいセミナーでは日韓双方の合意の上、核融合及び核分裂材料の両方を取り扱い進めることとなった。また、テーマ選定ではKNS側が核燃料分野を入れてくる可能性もあるため当部会及び核融合工学部会は核燃料部会への案内等を行って連携を維持することや、2011年度は当部会が折衝等を担当し来年度以降は核融合工学部会と交互に担当することなどが合意された。

これらの合意事項を受けて、従来のセミナーの終了に関する文書確認、及び、新規セミナーに関する覚え書き(MOU)を作成し日韓双方で調印することとなった。調印に当たっては日韓何れかの場所での調印式の検討もなされたが、簡素化し郵送による文書交換で行うこととした。既に国内3部会はMOUドラフト案を作成しKNS側の確認も完了しており、調印のプロセスに入ったところである。近々にも調印が完了し初回開催に向けて本格的な調整に移行する予定である。現在のところ、KNS側の意向を受け初回セミナーは日本で開催することとなっており、今後は2012年秋の大会(広島大学)での開催に向けて後任の方々によって調整が行われる予定である。

以上、新たな日韓セミナーの開始へ向けた調整の経緯を述べさせて頂いた。2011年度は

まさに原子力にとって激動の1年であり、それにセミナー見直しとその幹事役と慌ただしく任期を満了することとなったが、関係各位のご協力によりどうか新セミナーに向けた一歩を踏み出すことができたと思う。この場を借りてご協力くださった皆様に感謝の意を表したい。今後は新しいセミナーが日韓双方の関係者にとって今まで以上に有意義な情報交換の場となるよう両国の情勢に合わせたテーマ選定が重要であると思われる。また、財政的に厳しい状況が予想されるため講師派遣の在り方も再考が必要である。残念ながら、これらの課題については十分に検討できず積み残してしまっただが、後任の方々に託し鋭意検討をお願いする次第である。

(2012年3月22日受理)



IX. 行事等のお知らせ

Materials Research Society 2012 MRS Spring Meeting & Exhibit
April 9-13, 2012, San Francisco, USA
<http://www.mrs.org/spring2012/>

EFRC Summer School 2012
Defects, Deformation and Damage in Structural Materials, an Office of Basic Energy Sciences Energy Frontier Research Center (EFRC)
June 11-15, 2012, Knoxville, TN, USA
<http://cdp.ornl.gov/EFRCschool/EFRCschool.shtml>

2012 International Congress on the Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP12)
June 24-28, 2012, Chicago, USA
<http://icapp.ans.org/icapp12/>

2012 Computer Simulation of Radiation Effects in Solids (COSIRES)
June 24-29, 2012, Santa Fe, USA
<http://cosires.newmexicoconsortium.org/>

ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP)
July 15-19, 2012, Toronto, Canada
<http://calendar.asme.org/EventDetail.cfm?EventID=14613>

Multiscale Materials Modeling (MMM) 2012
October 15-19, 2012, Biopolis, Singapore
<http://www.mrs.org.sg/mmm2012/>

The Nuclear Materials Conference (NuMat 2012)
October 21-25, 2012, Osaka, Japan
<http://www.nuclearmaterialsconference.com/>

6th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology HTR2012
October 28 - November 1, 2012, Miraikan, Tokyo, Japan
<http://htr2012.jaea.go.jp/>

Materials Research Society 2012 MRS Fall Meeting & Exhibit
November 26-30, 2012, Boston, USA
<http://www.mrs.org/fall2012/>



X. 寄稿のお願い

編集小委員会では、部会員の皆さまのご寄稿を心よりお待ちしております。原子力材料についての最近の研究動向、研究機関・施設の紹介、会議案内や報告、国際交流など、気軽に話題提供をお願いします。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

material-sc@ml.mail.ne.jp

XI. 編集後記

福島第一原子力発電所の炉心溶融事故から丸一年が経ちました。いまだ落ち着かない状況に多少の苛立ちは感じますが、これまでに事故に関する多くの委員会、調査会、検討会、シンポジウムがあり、それぞれがそこそこの解釈を提示し、そして、事故の全容がなんとなくわかった気になり、次こそは事故を起こさないぞとする教訓を自らのものにしつつある時期ではないかと思えます。スリーマイルやチェルノブイリのときのように、それらとは違いますと殊更差異を強調し、そうすることによって安全性を示したつもりになっていた時代もあったように思いますが、今回のように日本国内で、しかも東京電力でとなると、なかなか声高に違いを主張するのは難しいのかもしれない。しかしながら、今だからこそ、うちの原子炉は新しいんだとか、ここは地震や津波は起こらない場所だとか、プラントごとに優位劣位を強調することは必要ではないでしょうか。技術的に説明できる安全性だけで国民を100%納得させることはできず、また、国民に信頼されない産業は衰退する運命にあるのだとすると、このままでは日本の原子力産業が総崩れになりはしないかと心配です。

ひとつの産業を丸々消滅させるよりは、生き残りをかけて何らかの落とし所を戦略的に決めておくことは重要と思えます。要するに、技術的に合でも、戦略的に否はありと思えます。それをするには、合か否かの単なる合否判定だけでなく、プラントごとの安全性の序列化（数値化）が必要です。同じ合格でも、95点で合格なのか60点でぎりぎりなのか。今回特集した高経年化技術評価は、プラント個別の評価につながるものであり、大いに期待したいところです。

さて、この3月をもって、編集小委員会委員長としての私の任期も満了です。年2回の不定期発行という目標は一応達成できたと思えます。これもひとえに、ご寄稿いただいた執筆者の皆さま、企画のアレンジに協力して下さった方々、私に代わって原稿の催促をしていただいた方々のおかげです。どうもありがとうございました。

(平成24年3月17日 編集小委員会委員長 京都大学 森下和功)

