

企画セッション | 部会・連絡会セッション：材料部会

■ 2016年9月8日(木) 13:00 ~ 14:30 | ■ B会場 久留米シティプラザ 展示室1

[PL2B] 材料照射研究の現状と今後の展望

座長：鶴飼 重治（北大）

[PL2B01] 国際協力による原子炉での材料照射研究

*四竈 樹男¹ (1.八戸工大)

[PL2B02] 核破砕中性子源による材料照射研究

*菊地 賢司¹ (1.茨城大)

[PL2B03] イオン加速器による材料照射研究

*阿部 弘亨¹ (1.東大)

材料部会セッション「材料照射研究の現状と今後の展望」

(1) 国際協力による原子炉での材料照射研究

(1) International research program on material irradiation in the reactors

四竈樹男

八戸工業大学

1. 研究炉の現状

研究炉は、一部の国での新設計画はあるが全体的に老朽化、管理コストの著しい上昇、規制強化、などの影響により世界的にその管理運営が困難になりつつある。特に憂慮すべきは、材料・燃料照射に適した高出力密度の大型研究炉の老朽化である。国内に目を向ければ、大型研究炉、JMTR, JOYO, JRR-3, HTTR等はずべて停止状態であり、材料・燃料照射はここ10年程度実質的に完全停止状態にある。JRR-3が再起動に向けて作業が進められているのは明るいニュースであるが、他の大型研究炉の将来は全く不透明といっても過言ではない。

多くの国々の関係者達、特に先進国の関係者達は現状に深い懸念を共有しており、10年ほど前から、IAEAにおいて、「研究炉に関する作業部会」(Technical Working Group on Research Reactors; TWGRR)を設置し、現状の把握、今後への対応について検討してきた。5年2期の活動が昨年終了し、これまでの活動の総括、今後への対応が検討されつつあり、今年度は活動を一時的に休止する動きと聞いている。

一方、国内においては、学術会議において研究炉小委員会(座長: 柴田徳思名誉教授)において、国内の研究炉のあり方についてより広い立場から検討が進められている。

ここでは、TWGRRでのこれまでの検討を軸に、国内外の現状を報告し、今後に向けた展望について報告する。

2. 研究炉を用いた材料照射研究

研究炉を用いた材料・燃料照射研究はマンハッタン計画を始めとした原子力開発当初より、各国で精力的に進められてきており、膨大なデータが蓄積されてきている。核分裂システムに限れば、最も実用システムに近い条件での照射が行えること、大きな照射スペースがあり大小様々な寸法の試験片を用いた照射が行えること、などの優れた特徴を有する。また、初期に問題となった、照射条件制御、再現性確保の問題については、特に、日本国内の研究が先導的役割を果たし、ここ30年の間に目覚ましい進歩が見られ、原子炉照射の膨大な蓄積データと他のより制御が容易な照射データとの相関についても、初期のような暗闇の中で遠方の蠟燭の灯を探す状況からは一変している。一方、核融合炉を始めとする先進エネルギーシステムに対しては、中性子スペクトルが必ずしも適切ではないことなどの課題がある。ただし、この問題に関しても、同位体調整法、特殊各変換利用法などの照射技術開発が着実に進められてきている。

無計装単純照射を中心に始められた原子炉照射は、その後、計装・制御照射が中心となり、更に、オンラインその場計測照射が主流になりつつあり、得られるデータの豊饒性、信頼性は大きく改善されてきている。近々運転開始が見通されるJHR炉(仏国; ジュール・ホロビッツ炉)では、原則的にその場計装が照射の基本原則とされつつあるようである。福島事故を受けた過酷事象に対する研究においても、米国は長きにわたり運転停止状態にあったパルス黒鉛炉を用いた過渡現象のオンライン計装の再開を計画している。また、露国で計画の進む新型照射試験炉においても、照射ループを用いた計装・制御、その場測定が主要な研究手法として検討されている。国内では、JMTRがこの分野で世界的にも先導的な役割を担ってきて

おり、更には JOYO においても、計装・制御技術開発が積極的に進められてきた。これらの国内努力は、日米協力、日欧協力においても積極的に活用されてきており、この分野での日本の寄与は地味ながら高い国際的評価を受けてきている。

一方、原子炉照射技術の高度化は、結果として照射コストの多大なる上昇を引き起こしており、研究者の思い付き、創意工夫が直接、即応的な研究の実施には結びつかなくなっている、という負の側面も指摘しなければいけない。これらの課題を克服する手段として、これまで以上の研究の組織化、複数の研究プロジェクトの協調、更にはより緊密な国際協力が不可欠となってきた。

3. 研究炉利用と国際協力

原子炉照射における国際協力は、OECD を基盤とするハルデン計画が嚆矢であろう。そこでは軽水炉の燃料・材料照射研究が長きにわたり国際協力として実施され、多大の成果が挙げられてきている。課題は、ハルデン計画が、個別の研究者からの限られたアクセスしかなく、個人興味をベースとした基礎分野での研究者が関与しにくいことであった。これについては、ハルデン(諸国)側も、近年改善に乗り出し、ハルデン計画の中で蓄積された最新の照射技術を広く提供する努力を行っている。炭化ケイ素複合材料を用いた新型被覆管開発研究に関連した動きはその一例である。

国内では、個別の組織が個別に海外の照射施設を利用することは長年行われてきていることであるが、1970 年代後半より、核融合開発の分野で組織的に米国の先進照射施設を利用することが行われてきた。RTNS-II 計画を始めとして日本原子力研究機構研究者と大学関連研究者が中心となり全日本的な組織を形成して日米協力が長期に渡り実施されてきている。この国際協力では多くの研究成果が挙げられてきたと同時に、若い世代の育成が計画的に図られてきたことは指摘すべき重要な成果である。現在、国内で核分裂、核融合を問わず、原子力システムで材料開発・研究に携わるほとんどすべての技術者・研究者が、若い時期にこの研究協力に携わった事実は極めて重要である。

翻って考えると、原子力関連の材料研究における人材育成においては原子炉照射が重要な結節点となってきた。この国内研究炉の利用組織がそのまま国際研究での研究炉利用に繋がっていった。この背景には、研究炉利用には、原子炉の運転管理者のみならず、利用者の貢献が極めて重要であることに先達が気づき、研究炉利用黎明期より、利用者の関与を積極的に図っていった事実がある。特に JMTR 利用にあたっては、単に管理者側にハードウェア管理、開発を委ね、利用者はそのハードウェアの単なる利用者に止まる、という一般的な体制をとらずに、利用者側も照射後試験設備を中心とし積極的に原子炉照射に関わっていった体制全体の枠組みを構築したことは極めて独創的な発想として深く敬意を表する。現在、米欧において研究炉利用の仕組みの見直しが積極的に図られているが、それらは日本が率先して整備した利用体制を強く意識したものであると自負する。関連して、米国ではアイダホ国立研究所を核として、研究炉を中心とする原子炉施設の共同利用が国内のみならず国際的な視野を持って進められており、日本の研究者に対しても門戸が開かれている。同時に、日本国内の研究炉共同利用の枠組みも外国に対して開かれたものになっていることは指摘したい。

国内の研究炉が 10 年以上の長きにわたり停止した状態を調整するため、特に材料試験の中核をなす JMTR, JOYO の大学関連共同利用責任組織である東北大学金属材料研究所は国内研究炉が停止している間の補完、更にはこのような状況を梃として国際協力を進展させるべく、ここ 10 年ほど、国際協力を通じて国外研究炉の利用を推進している。具体的には白国の BR-2、米国の HFIR の利用を進めてきている。長期にわたる定常的な共同利用を通じて相手側との緊密な連携が構築されてきている一方、国外炉利用の問題点も認識されつつあり、やはり、対等な国際協力には自国の高性能研究炉の稼働が不可欠であると認識

されている。

このように、各国、各極において、研究炉の利用が国際協力を視野に利用枠組みの見直しが進められている。JHR やロシアの提案する新研究炉においても、その利用形態は国際コンソーシアム形式をとろうとしている。この基本的背景は、運転・維持に必要な莫大なコストを国際的にシェアしようとするところにある、必ずしも研究の国際協調とは直接結びついていないところが大きな問題と考える。しかしながら、研究炉建設・管理・運営には国からの多額な資金援助が不可欠であり、それに付随したナショナリズムを否定することは不可能であり、個々の国の利害得失と科学技術全体の利益得失を妥協させる優れたシステム開発が今後の重要課題となる。いたずらに研究の効率化を錦の御旗にして、特定のシナリオに基づく研究炉の専断的利用は厳に慎まなくてはならない。

4. 学術会議、IAEA からの提言

学術会議での議論に関しては第一期のとりまとめが既に公開されており、当然ながら研究炉の重要性、更には長期的には新たな研究炉の建設の可能性が指摘されている。一方、IAEA では各国の利害得失の調整は不可能に近いところから、各論併記、一般論的記述に終わらざるを得ないというのが当面の個人的感想ではある。しかしながら、現状を打破するための様々な提案が野心的な国々からなされてきている。それらの当面の取りまとめとして、ICERR(アイサー; International Center of Excellence on Research Reactors)なるものが提案されている。これは、IAEA が研究炉国際利用の核となり得る高度な設備とその利用ノウハウを有する組織を選定し、その組織が中心となって国際協力を推し進めようとするものである。ただし、当初のアイデアである大型高出力研究炉を中心とした枠組みは多くの国からの反対を受け、小型研究炉も含めた枠組み、更には多極間の大掛かりな国際協力だけではなく、少数の国々が関与する小規模な協力も含めようとするのが直近の動きと理解する。今後の流れはかなり流動的かと推測する。

5. まとめ

研究炉を利用した材料照射研究は大掛かりな研究であり、材料研究者のみならず、運転管理者、原子炉技術者との緊密な連携がますます不可欠なものになってきている。欧米では研究者と技術者の分離が伝統的に強いことから、このことは認識されつつもあまり真剣に検討されてこなかったのがハルデンなどの少数の例外を除けば事実であった。しかし、日本からの問題提起をきっかけに、研究者、技術者、管理者間の交流が著しく進展し、原子炉材料照射は大きな前進を見てきている。一方でこのことは、原子炉材料照射の高コスト化、効率の低下に帰結しつつあり、それらの打破策としてますます国際協力が不可欠なものになってきている。国内においては、自らを縛ることとなる国際協力に消極的な向きもあるが、流れの中では、自己の特徴を活かし、それを武器に自身の主張を他極に理解させて研究を進展させていく努力が今後一層望まれる。

Tatsuo Shikama

HIT

材料部会セッション「材料照射研究の現状と今後の展望」

(2) 核破砕中性子源による材料照射研究

(2) Material irradiation research using the spallation neutron sources

菊地 賢司

茨城大学

1. 核破砕材料研究のねらい

高エネルギー陽子照射による構造材料特性の変化は、中性子照射（原子炉、核融合炉条件）の場合と同じか？異なるか？J-PARC、US-SNS、EU-SNS（当時）の大強度中性子源標的の寿命に及ぼす高エネルギー粒子照射の影響は何か？核破砕物の核変換システム（ADS）を想定した陽子ビーム窓材料の選定は？共通するのは、加速器駆動装置で使う材料の交換寿命と装置の成立性を見極めることが研究の狙いである。

2. 利用する材料選定

スイス PSI の核破砕中性子源標的（サイクロトロン 580MeV、0.8MW）を利用して、高エネルギー陽子照射の材料実験を開始した（1998 年）。核破砕中性子源の固体標的として歴史のあった W に着目し、パラメータをふるために単結晶、多結晶、高純度系の試料などを選定し、照射材の準備を行った（科研費「長寿命核破砕中性子源用ターゲットの開発」（川合代表））。Ta は崩壊熱が MW 級中性子源では高く、単独の使用ではなく、W 標的の高速度水流下でのエロージョン防止被覆材として選定した。他に固体標的では金も取り上げた。実際そのような議論が施設建設であった。

液体金属中性子源標的としての水銀、鉛ビスマス自体の利用価値は、“材料損傷”が考慮不要の点と除熱の熱媒体として使える点にあり、材料照射研究対象は、標的閉じ込め容器材料となる。我が国に蓄積された核融合材料研究等の蓄積を元に、オーステナイト鋼と FM 鋼の材料に着目して研究を展開した。

2. 照射後試験研究

J-PARC と PSI が覚え書きを交わし、旧原研の東海 HL に照射材を輸送し管理した。機械試験、金相試験、電顕、残留軽核ガス測定、陽電子消滅試験を、専門家の協力を得て実施した。機械荷重による引張り、ゲージ部の伸びの直接測定から歪みを割り出すこと、疲労強度は板の曲げ疲労特性で、核発熱と熱応力制限に起因する。他にシャルピーは DBTT 評価のため実施された。最近の研究では、2006 年に 580MeV 陽子を流動鉛ビスマス核破砕標的に入射する実験を行い、実部材の照射後試験で ADS に関連する先駆的な研究が継続中である。中性子源である水銀標的の使用済み材料の照射後の追跡型研究も実施されている。

3. 研究結果と今後の課題

原子の弾き出し数に対する中性子照射材と比較すると、オーステナイト鋼の延性の低下が大きい。溶接金属（EBW）の延性の低下が著しく、重要な結論は、溶接部に陽子ビームを直接当てない事である。FM 鋼では、DBTT の上昇が極めて大きく（Yong Dai）、引張試験後の破面も 1800appmHe で粒界破面の報告がある。同様な照射条件で JPCA では粒内破面であった事に注目している。軽核ガス生成量は陽子ビーム利用標的の体系で異なる。評価には PHITS 等の計算結果が必要である。研究課題は、残留ガス効果、液体重金属効果である。成果詳細は、JNM の論文（IWSMT 発表）、概要記載は科研費「材料損傷機構の実験および理論による包括的研究と高エネルギー量子ビーム場用材料開発」（川合代表）報告書にある。

Kenji Kikuchi

Ibaraki University

材料部会セッション「材料照射研究の現状と今後の展望」

(3) イオン加速器による材料照射研究

(3) Material irradiation research using the ion accelerators

阿部弘亨

東京大学

1. 序論

イオン照射法を用いた材料研究には長い歴史がある。特に中性子照射の模擬手法としてイオン照射法が期待されることは良く知られているところであり、様々な研究者によって提案された相関式や実験手法がある。しかし、イオン照射と中性子照射の間には、両者の実験的制約条件や、想定する実機（核融合炉や核分裂炉）環境との差異に起因した大きな隔たりがあり、必ずしも模擬手法として確立することができているわけではない。一方で、イオン照射法では、加速器の性能や照射技術の向上、さらにはその場観察／分析法の開発などが著しく、基礎的観点での知見取得に大きな貢献を果たしている。本稿においては、イオン照射法の最近の高度化や関連するその場を含む観察／分析法に関する知見を収集し、浅学菲才ながらこれらの課題と展望について議論したい。

2. 議論の対象

議論の対象として以下の点を挙げることができる。

- ・イオン加速器照射技術の向上
- ・その場観察／分析技術開発
- ・中性子照射環境模擬に関する研究

上記項目は、いずれも最後の項目に収斂するように整理する。

照射技術の向上の中には、例えば照射相関法など、日本を中心とした諸先輩方の努力の片鱗をまとめるとともに、課題を整理する。また、その場観察技術についても格子欠陥基礎研究だけでなく、照射誘起相変態やPKA スペクトル効果の抽出を図った研究などについてまとめる。さらに、イオン照射効果との比較を図るという意味で、中性子照射研究において実施が望まれる実験等についても問題提起をしたい。

Hiroaki Abe

The University of Tokyo