「平成17年度大洗原子力材料夏の学校」報告

栗 下 裕 明* 松 井 秀 樹**

1. はじめに

平成17(2005)年8月1日(月)～8月6日(土)、茨城県大洗町にある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、金研大洗センターと略称)で「平成17年度大洗原子力材料夏の学校」が開かれた。この夏の学校は、原子力専攻の学生だけでなく、広く材料研究に興味をもつ大学院生が先端の研究に触れつつ、原子炉による材料照射とそれに関連した様々な材料研究(実験)の基本を勉強するという、金研大洗センターでなければできない教育を行うものである。また、夏の学校に参加した学生は大洗で1週間にわたり寝食を共にするので、自由な議論を通して交流を深める貴重な機会をもつことになる。

第1回の夏の学校は東北大学大学院の学生を対象に平成15(2003)年8月に開催され、平成16年度から対象を全国の国立・私立大学の大学院生に拡大した。平成16年度と17年度の応募者数はそれぞれ30名と23名で、いずれも募集定員を超過したが、応募者全員を受け入れて実施した。表1に平成16年度と17年度に参加した学生が在籍する大学を示す。北海道から九州までいろいろな大学から参加している。その専攻は、原子力、エネルギー、材料、物質、機械工学、物理、応用理学、環境など多くの専攻に及んでいるのが特徴である。また、今年度は女子2名の参加を得た。

これまでの3回の夏の学校で学生に接してみても言えることは、参加した学生に熱意が感じられ、夏の学校を心から楽しんでいるように思われることである。昼休みの大部を質問攻めにあう指導員もいる。このことから、大洗で過ごす1週間は学生にとって充実したものであり、夏の学校は期待以上の教育効果を上げているものと思われる。夏の学校終了後に学生から届いたメールのひとつを紹介しよう：

「振り返ると夏の学校で過ごした1週間はあっという間に

表1 平成16, 17年度の参加大学院生の在籍大学.

大 学	平成16年度	平成17年度
北海道大学	1	3
東北大学	15	5
茨城大学		1
東京工業大学		4
金沢大学	1	
東海大学	2	
京都大学	5	5
近畿大学		1
岡山大学	1	1
島根大学	1	
愛媛大学	1	
九州大学	2	3
九州工業大学	1	
合 計	30	23

過ぎてしまいました。当初、実習内容について行けるのか不安を抱えながらの参加でしたが、実習と講義の内容、他大学の学生との交流、本当に有意義な経験だったと思います。(中略)本当にありがとうございました。」

以上の概要に教育内容を加え、「平成17年度大洗原子力材料夏の学校」の報告記事(1～2頁)として「まてりあ」に投稿したところ、金属学会会報編集委員会から材料教育に関する記事として拡充し再投稿して欲しいとの依頼を受けた。そこで以下では、夏の学校の詳しい報告を通して金研大洗センターの材料教育への取り組みの一端を紹介する。

* 東北大学助教授；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(〒311-1313 東茨城郡大洗町成田町)

** 東北大学教授；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

Report on 2005 Nuclear Materials Summer School at IMR/OARAI; Hiroaki Kurishita*, Hideki Matsui**(***)International Research Center for Nuclear Materials Science, Institute for Materials Research (IMR), Tohoku University, Oarai)

Keywords: nuclear materials, reactor irradiation, radioactivity, radiation embrittlement, small specimen test technology, nano-structural analysis, nano-technology

2006年1月11日受理

2. 金研大洗センター

冒頭で「金研大洗センターでなければならない教育を行う」と書いたが、金研大洗センターについてあまりご存知でない会員のために当センターについて簡単に紹介する(詳細は、当センターのパンフレット、およびホームページ(<http://www.oarai.imr.tohoku.ac.jp>)を参照)。

図1に示すように、金研大洗センターは茨城県大洗町の日本原子力研究開発機構大洗原子力研究開発センターの敷地内の、2つの材料照射試験用原子炉(JMTR、常陽)に近接する位置にあり、また図1には示されていないが同じ敷地内に研究用原子炉(HTTR)もある。昭和44(1969)年に東北大学金属材料研究所附属材料試験炉利用施設として開設され、平成16年4月に現在の名称に改称された。

金研大洗センターは、全国の研究者[†]・大学院生が原子力材料や核燃料・アクチノイド元素に関する最先端の実験研究を行うための共同利用センターであり、専門分野の異なる多くの研究者に対して必要なハードとソフトを提供している。例えば、原子炉の照射温度・中性子フルエンスを高精度に制御可能な多段多分割キャプセルを用いた材料照射技術、寸法の小さい微小試験片^{††}による機械的性質や物理的性質の評価技術、透過電子顕微鏡(TEM)による組織観察技術、TEMでも観察困難な極微小欠陥のナノ分析評価技術、純良なアクチノイド単結晶の育成と物性評価技術などである。

また、東北大金研原子力関連研究部門との密接な連携のもとに、軽水炉压力容器鋼や核融合炉候補材料の照射損傷、照射脆化機構の解明、照射欠陥集合体と運動転位の相互作用の

TEM内その場観察等による研究、光ファイバーによる原子炉内その場測定、ナノ組織制御による耐照射性に優れた高靱性高融点材料の開発、原子炉照射試験を中心とした水素化物燃料・材料の開発研究、超ウラン・ネプツニウム化合物の電子状態の解明、放射性崩壊寿命の人為的制御を目指したTh-229mの崩壊特性の研究などが行われている。これらの研究のために、放射線管理区域内に最新の材料科学実験装置(3次元アトムプローブ(3DAP)、陽電子消滅装置、集束イオンビーム(FIB)、STMなど)とともに、分析機能付のTEMや走査電子顕微鏡(SEM)、X線回折装置、計装化シャルピー衝撃試験機や引張試験機等の機械的性質測定装置、熱定数などの物理的性質の測定装置が、また、非管理区域にはレーザーマーキングや熱間等方加圧(HIP)の材料作製装置などが設置されている。

一方、共同利用研究者のために、当センターの近くに東北大学の宿泊施設があり、朝夕の食事も提供している。当センターにおけるこれまでの共同利用者数は、平成11(1999)年度までは約2000人・日付近で推移してきたが、平成13年度から急激に増加し、16年度の共同利用者数は約3200人・日であった。この数は共同利用開始以降、最も多い数字である。近年、共同利用への応募資格者が原研機構や物材機構に広がったこと、TEM観察困難な極微小欠陥の評価を可能にする世界最先端のナノ分析技術が確立され、共同利用に供されるようになったこと等によるものと思われる。また、当センターは全国の大学院生のon the job trainingの教育・訓練拠点であり、当センターを利用している実験研究が学位論文の重要な部分を占める学生数を集計すると、平均して博士前期課程が22名/年、博士後期課程が6名/年に達した。本稿で紹介する夏の学校も含め、金研大洗センターはわが国の重要な研究・教育の拠点であることが理解されよう。

図1 茨城県大洗町にある東北大学金研大洗センター(平成16年3月撮影)。

3. 夏の学校の内容

夏の最も暑い時期に九州や北海道をはじめ全国各地から大洗に駆けつける学生の意欲は高い。一方、彼らの専攻は様々であり、したがって予備知識も大きく異なる。このような学生の期待に答えるために、夏の学校では、金研大洗センターの特徴を生かした教育内容の中に次のことを反映させるように努めている。

(1) 教育において最も基本的で大切な「感動」や「驚き」をできるだけ伝えられる内容とする。

^{††} 微小試験片とは、原子炉や将来の強力中性子源の限られた照射容積を最大限に活用するため、および照射温度や中性子束の勾配の影響を低減することを目的とした、標準サイズよりも寸法の小さな試験片のことである。標準試験片と同等な特性値が評価できる限り、試験片サイズは小さいほど有利である。例えば、シャルピーVノッチ試験片の標準サイズは10 mm×10 mm×55 mmであるが、金研大洗センターでは、1.0 mm×1.0 mm×20 mmの微小シャルピーVノッチ試験片(標準サイズの体積の約1/270)を用いたシャルピー衝撃特性の評価が行われており、後述する計装化シャルピー衝撃試験の実習でもこの微小シャルピー試験片が用いられる。

[†] 毎年12月に募集する共同利用研究に申請して採択された研究課題の研究代表者と研究協力者であり、大学、公立の研究機関の教職員、および民間からの応募による共同研究員と受託研究員が該当する。

(2) 原子力における材料の重要性を認識し、原子力に関連する材料研究に必要な知識と技術を身につけるために、専攻にかかわらず広く理工系の学生が理解しやすい内容とする。

(1)については、材料という身近で奥深い対象を扱うことの可能な材料教育では、感動や驚きを与える例を比較的豊富に見出すことができる。そこで、そのような例を学生一人一人に伝えるために、2～3名の少人数による実習に重きをおき、講義は実習の目的・内容の理解および実習を安全に行うために必要な事項に絞った。見学も行った。(2)については、学生に伝えるべき知識・技術を講義・見学・実習の科目としてプログラムに具体的に示すとともに、それぞれの科目についての平易な解説をテキストにまとめた。テキストは、専門的な知識があまりなくても丁寧に読めば理解できるように、図・写真(カラー)を豊富に取り入れて説明も詳しくした結果、総頁数が200頁に達した。また、学生が事前に予習できるように、夏の学校が始まる少なくとも10日前にはテキストを配布した。

以上のことを踏まえ、夏の学校では、「原子炉で高速中性子照射を受ける微小試験片の作製から、照射済み放射性同位元素(RI)試料の放射性核種の測定、照射後試験による照射脆化の評価とそのマイクロ因子の観察・分析」についての講義・見学・実習を行う。原子炉で照射を受けた材料は照射温度や照射量に依存して組織が大きく変化し、その結果生じる照射脆化は原子力材料にとってきわめて重要な問題である。照射後試験では、原子炉で照射された RI 試料を用い、金研大洗センターの標準的および最新の設備を一人一人が操作してデータを取得し、得られた結果を評価、検討する。

平成17年度夏の学校のプログラムを表2に示す。科目数は、講義が6、見学が6、実習が14の合計26であった。以下にプログラムに沿って説明する。

1日目 初日はオリエンテーションで、松井センター長による開講の挨拶に始まり、基礎的な講義と金研大洗センターの見学のあと親睦会(get together)により締めくくる。この親睦会は、金研大洗センターの教職員も参加して学生と懇談し自己紹介を行うもので、後述するアンケート調査結果から、学生の緊張を和らげ、互いに親しくなって2日目以降の教育効果を上げるために不可欠である。

2日目 金研大洗センターでは照射脆化の克服を目指してナノ組織制御による耐照射性に優れた新材料開発が長年行われており、講義・見学を通してそれを理解する。原子炉で照射される微小試験片を作製する実習の中で、FIBは、数nm以下という細く絞ったGaイオンビームを試料表面で走査することにより、非常に高精度でTEMや3DAP用の試験片を微細加工する技術である。極微小の機械的試験用試料等の加工技術としても応用範囲が広い。この2日目のFIB実習は、夏の学校開始前の調査で予め希望した学生のみを対象とし、全員の实習は3～5日目に行う。また、微小引張試験片やTEM試料のパンチによる打ち抜き作業や、レーザーマーキングによる試験片IDの刻印等の作業を実習する。

表2 「平成17年度大洗原子力材料夏の学校」プログラム。

日 時	内 容
8月1日(月) 13:30～19:00	開講の挨拶、金研大洗センター紹介 夏の学校の説明 金研大洗センターの見学 放射性同位元素(RI)試料の安全取り扱いに関する講義 親睦会(Get together)
8月2日(火) 9:00～17:30	耐照射性材料開発の講義・見学 照射用微小試験片の作製の実習(集束イオンビーム(FIB)加工、微小試験片の打抜き、レーザーマーキング) 微小試験片のキャプセル挿入の見学 材料照射用原子炉(JMTR、常陽)の見学 照射試験片の東北大ホットラボ搬入の見学 陽電子消滅・3次元アトムプローブ(3DAP)の講義
8月3日(水) 9:00～17:30	I 班 金属元素および放射性核種の同定・定量 講義 JMTR 照射による核変換シミュレーション マニピュレータとグローブボックスによる模擬照射 試料の安全取り扱い 金属材料の蛍光 X 線による元素分析 γ 線放射性核種の同定・定量 放射性エアロゾルの捕集と α 核種測定 II 班 金属材料の照射硬化と照射脆化の評価 講義 ビッカース微小硬さ試験による照射硬化の評価 計装化シャルピー衝撃試験による照射脆化の評価 走査電子顕微鏡(SEM)による破面観察 III 班 照射脆化のマイクロ因子の観察・分析 講義(透過電子顕微鏡(TEM)による組織観察法) 照射試験の損傷組織の TEM による観察の実習 陽電子消滅・3DAP の見学と実習 FIB 加工の実習
8月4日(木) 9:00～17:30	I 班 照射硬化と照射脆化の評価 II 班 照射脆化のマイクロ因子の観察・分析 III 班 金属元素および放射性核種の同定・定量
8月5日(金) 9:00～18:00	I 班 照射脆化のマイクロ因子の観察・分析 II 班 金属元素および放射性核種の同定・定量 III 班 照射硬化と照射脆化の評価 アンケート用紙記入・提出
18:30～20:00	懇親会
8月6日(土) 10:00まで	自由解散(レポート提出可)

次に、微小試験片を原子炉で照射するために必要な照射試験技術を理解する。とくに照射温度は材料の組織と特性変化に大きな影響を及ぼすために精密な制御が必要である。そこで微小試験片の照射用キャプセル挿入の見学では、原子炉で現在行われている照射温度制御技術を理解する。午後は、バスで原研機構に移動し、2つの大型原子炉(JMTR、常陽)を見学する。また、これらの原子炉で照射されたキャプセルの金研大洗センター・ホットラボへの搬入、およびキャプセルからの試験片の取り出しを見学する。2日目の最後の講義は、翌日以降に行う陽電子消滅法・3DAPの実習・見学のためのものである。

3～5日目 3つの班に分かれ、それぞれ以下の(a)～(c)を交互に実習する。実習の効果を上げるために科目に応じてさらに2～3名の少人数グループに分かれる。

(a) 金属元素および放射性核種の同定・定量

実習内容についての講義の後、JMTRで照射された金属材料中に核変換により生じる誘導放射能を理論計算により評

価・予測する。また、エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置による金属材料の組成分析、N 型 Ge 検出器を用いた γ 線スペクトロメトリーによる照射金属材料の放射性核種分析、および α 線スペクトロメトリーによるエアロゾル中の放射性核種の測定を行う。これらの測定は待ち時間を伴うので、その時間を利用してマンピュレータとグローブボックスによる模擬照射試験片の安全取り扱いを実習する。マンピュレータを用いた遠隔操作により、まず小さなポリ瓶の蓋を閉める作業を行い、これに成功すれば次はより難しいトレーニングとしてのマッチで点火する作業に進む。毎年人気の高い科目の一つである。

(b) 照射硬化と照射脆化の評価

照射硬化と照射脆化の評価についての講義の後、1 グループ 2 名となり実習する。試験片には JMTR で高速中性子が照射された低放射化フェライト鋼[†]の微小シャルピー試験片 (1.0 mm × 1.0 mm × 20 mm) と未照射の微小シャルピー試験片を用いる。まず照射硬化の実習では、未照射と照射後の試験片についてビッカース微小硬さを測定し、照射による硬さの上昇を照射硬化とする。次に照射脆化の実習では、未照射と照射後の試験片をそれぞれ試験治具にセットして指定された温度に保持し、計装化シャルピー衝撃試験機を操作して試験片を破断させ、そのときに得られる荷重変位曲線をコンピュータで解析して吸収エネルギー等の必要な量を評価する。各グループは異なる温度で試験を行うので、全員のデータを試験温度に対してプロットすると照射前と照射後の吸収エネルギー-温度曲線が得られる。それらの曲線から延性脆性遷移温度 (DBTT) を求め、照射による DBTT の上昇を照射脆化として評価する。また、衝撃試験により破断した試験片の破面を SEM により観察して横膨出率を測定し、横膨出率の温度依存性から DBTT と照射脆化を評価する。吸収エネルギーから評価した結果と比較するとともに、照射硬化と照射脆化の関係について検討する。

(c) 照射脆化の原因となるミクロ因子(組織)の観察・分析

電子線回折の基礎と TEM の操作法についての講義の後、照射された試験片内部に形成された損傷組織、すなわち、代表的な照射欠陥である転位ループ、転位およびボイド等を TEM で観察する。また、写真撮影、電子顕微鏡からのフィルムの取り出し、暗室での現像等の一連の作業を実習する。一方、TEM では観察できない極微小欠陥が照射脆化の原因になる場合もある。例えば、今日、大きな問題である原子炉圧力容器鋼の照射脆化はその代表的な例である。そのような極微小欠陥に対しては陽電子消滅法および 3DAP 法が有効である。但し、これらの方法による測定・評価には長時間を要するので、夏の学校では装置と測定例について詳しい説明を行った上で、実習として 3DAP に使用する針状試料の作製を電解研磨によって行う。これは、3DAP 元素マップを得

[†] 低放射化フェライト鋼とは、中性子照射で核変換により生じる誘導放射能を低減するために、フェライト鋼の特性を損なわない範囲で構成元素の一部を放射化しにくい元素に置き換えたものである。

図 2 実習風景。左手前は集束イオンビーム加工、右奥は 3 次元アトムプローブの実習。

るために適した良い形状の針試料を作製することが、この実験を行う上で最も重要であるためである。

図 2 に管理区域における実習風景の一例を示す。図の左手前のグループ (2 名) は FIB の実習、図の右奥のグループ (2 名) は 3DAP の実習で、それぞれの実験装置の前で指導員の説明を聞いている。

全ての実習・講義が終了した後、東北大学宿泊施設に移り、金研大洗センター教職員も参加して懇親会を行う。懇親会では一人一人の学生に修了証書を渡し、酔いが少し回った頃に参加した感想を述べてもらうが、率直で個性的な感想を聞くことができ、毎年、この時間を楽しみにしている。

なお、夏の学校終了後にレポート提出を課し (締め切りは 8 月 31 日)、提出されたレポートに対して出題した教員が添削・採点して返却する。このレポートは、夏の学校を修了した学生に単位を認定する大学では必要条件になっている。

4. アンケート調査

毎年、参加した学生に対して無記名のアンケート調査を行っている。アンケート調査は、夏の学校で行った全ての講義・見学・実習について 5 段階の評価と感想・要望、さらに金研大洗センターや宿泊施設に対する要望等の 9 つの質問項目からなる。今年度も全ての質問項目に対して学生全員から回答が得られ、それらをまとめると A4 用紙で 15 頁になった。要望の中には夏の学校をさらに充実させるために参考になるものが多く、次年度以降にできるかぎり生かすことにしている。なお、調査用紙は A4 用紙 5 頁で、夏の学校の初日に配布し、実習・講義・見学を行ったその日のうちに記入できるようにするとともに、懇親会の前の 30 分間をさらに記入時間に当てた。また、配布時にアンケート調査の重要性を強調した。

表 3 に調査結果の一部を抜粋して紹介する。全員が真摯に考え回答していることがわかる。

表3 平成17年度アンケート調査結果(抜粋).

Q2. 参加する前に不安な点がありましたか？ 例えば、放射線による被曝など。

- いいえ→11名
- はい→10名
 - {本実習により解消された→9名
 - {やはり不安→1名
- わからない→1名

Q6. 全体を通じて面白かった、あるいは役に立つと感じた講義・実習・見学の科目を挙げて下さい(5つ以内).

①	集束イオンビーム(FIB)加工の実習	14名
①	計装化シャルピー衝撃試験による照射脆化評価の実習	14名
①	マニピュレータの実習	14名
④	TEMによる照射損傷組織観察の実習	8名

感想と要望

- ・FIB 加工では、試料を加工・観察する時に多少タイムラグが発生してモニターに表示されるので、最初のころは加工の難しさ感じましたが、慣れてくると UFO キッチャーのようでもとても楽しい実習でした。自分の研究分野でも利用できそうに思います。
- ・マニピュレータの実習は最高でした。マッチで火が付けられなかったのが残念でしたが、普段できないことを体験できて本当によかった。
- ・一番気になっていた計装化シャルピー衝撃試験について理解できて本当によかった。自分の学校に戻ってシャルピーが分からない友人達に教えてあげたい。
- ・TEM の観察 (加速電圧 400 kV) では大変詳しく教えてもらい、今まで疑問だったことが分かって大変なめになった。教え方も大変よかった。
- ・最初は緊張していたが、親睦会で他大学の人達と交流を深めることができ、翌日からの生活が楽しくなりました。
- ・原子炉を見る機会なんてめったにないのでとても貴重な経験ができてよかった。JMTR・常陽の見学は、来年以降もぜひ続けて下さい。
- ・材料試験等はこれまで経験がなかったので、非常にためになった。
- ・テキストの全てのページに目を通すことはできませんでしたが、読んだ部分に関して言うとは、非常に分かりやすかったです。実際に実習で用いる装置の操作については、テキストで前もって読んでも分からないので、当日にマニュアルを渡してもらった方が良いと思います。また、テキストの配布日をもう少し早めたほうが良いと思います。
- ・専門分野で頻繁に使用している装置にはあまり新鮮味を感じないので、申し込み時のアンケート調査のときに装置の使用頻度も調査して、よく使う装置の実習は行わなくても良いと思います。
- ・もう一日程度日数を追加して、一つの科目を集中的に講義、実習する時間をもうけてくれるとうれしかった。
- ・初日と 2 日目の見学の人数が多すぎて、説明されている箇所が見えないことが多かったので、もう少し少人数で班分けすると良いと思った。
- ・食堂までの距離が長い (約 1 km) ので良い運動にはなつたが、食堂に行くことほとんど体勢が取れなかった。昼休みが 30 分程度長いとうれしいです。

5. おわりに

金研大洗センター夏の学校の特徴は、様々な専攻の多くの学生に対して、原子力に関連した材料研究の基礎から先端に至る内容を、全体講義および2~3名の少人数グループによる実習を通して理解してもらうことにある。そのためには、多くの科目をパラレルに実習して学生に待ち時間を与えないことが必要であり、科目の数に等しい指導員の確保が必要になる。一方、3~5日目の照射後試験については、選択性にして少数科目に絞り十分な時間をとって実習したいとの要望もある。その要望に応えるためには、受け入れ可能な学生数を大幅に少なくしなければならないとともに、実習科目の間で希望者数に大きな差が現れること、また研究の幅を広げるために多くの科目の実習を希望する学生の方が多いことへの対応など、難しい問題がある。おそらく、プログラムを見直した上で別の期間にもう一度この種の学校を開くことが必要であり、年に2回の開催が要望される理由の一つはここにある。また、留学生が参加できるように英語での講義・実習指導を求める声もある。現状では多くの制約のために年1回の開催とし、参加資格者は日本語を理解可能な学生としているが、国際研究センターとしていずれこれらの要望に応えることが必要になるものと思われる。

なお、夏の学校を修了した学生に対して、多くの大学で単位を認定されるようにこの紙面を借りてお願いしたい。

最後に、JMTRと常陽の見学に際してバスの手配から現場での対応に至るまで種々配慮頂いた原研機構・大洗原子力研究開発センターの各位をはじめ、夏の学校の実施に協力戴いた関係各位に深く感謝したい。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
栗下裕明

1977年3月 九州大学大学院応用原子核工学専攻博士後期課程単位取得退学
1977年4月 九州大学工学部助手
1979年4月 九州大学大学院総合理工学研究科助手
1989年8月 東北大学金属材料研究所助教授・現在
専門分野：原子力材料，核融合炉材料，力学的性質
現在，ナノ組織制御による耐照射性に優れた高熱性高融点遷移金属（W，Mo，V）の開発，微小試験片による機械的特性評価技術の開発を行っている

★★

栗下裕明

松井秀樹