IEA 核融合炉材料開発国際シンポジウムについて 計算機材料科学と IFMIF の意義

日本原子力研究開発機構 實川 資朗,

オークリッジ国立研究所 R. E. STOLLER, F. W. WIFFEN,

日本原子力研究開発機構 谷川 博康, 安堂 正己, 鈴木 一彦

I. はじめに

高速炉や核融合炉の研究開発が進展しているが、これらの機器の炉心部に用いられる材料は、高速中性子の照射による損傷を強く受ける。また、軽水炉の高経年化においても、材料の照射損傷課題の重要性が増している。このように材料の照射損傷課題の重要性が高まっているが、高照射量までの挙動評価に重要な高中性子束の研究炉等の照射施設の整備は不十分であり、このため、今後、研究開発上の問題が増大すると、しばしば指摘されている。一方、照射損傷に関する計算機材料科学に進展が見られることから、近年、照射損傷課題の理解や炉材料開発への計算機材料科学利用の可能性が注目され、世界的に議論が行われ、多少極端な例であるが、「計算機材料科学的手法がどの程度まで照射実験による材料挙動評価を代替できるか？」との期待を込めた問いもなされている。

ところで核融合炉においては、プラズマからの中性子のエネルギーが14 MeV と高い。このため炉設計等に必要の高い精度で照射による材料特性の変化を評価する目的で、14 MeV 近くに分布のピークを持つ中性子を多量に発生できる d -Li ストリッピング反応を用いた加速器型の中性子源である国際核融合炉材料照射施設 (IFMIF; International Fusion Materials Irradiation Facility) の建設を目指した IEA 協力 (核融合材料研究開発の国際協力協定) 等による技術開発が行われている。この IFMIF についても、「計算科学的手法を組み合わせる利用することの必要性」や、さらには「これによる効率の向上への期待」が示されている。IFMIF は、主に IEA 協力で開発が進められてきたこともあり、今回、IEA と日本原子力研究開発機構の主催、文部科学省の共催による「核

融合炉材料開発国際シンポジウム (IEA International Symposium on Fusion Reactor Materials Development)」を行い、このような方向についての検討を深めることにした。なお、IFMIF や計算機材料科学の能力に関する問いかけは、日本、EU および米国の核融合研究開発等の政策担当者間でもなされていたようで、このような経緯もあり文部科学省の後援をいただいた。

核融合 DEMO 炉等の開発に向けた、「IFMIF 等の照射施設の利用に計算機材料科学を組み合わせることによる効率化への期待」といった事柄は、いうまでもなく、各極における炉開発の進め方、材料開発の開発段階、材料課題 (実用化のための設計指針や許認可対応をも意識した) に依存する。そこで、シンポジウムでは以下の4つをキーの項目とした。

- (1) 各極の DEMO 炉等の研究開発の進め方 (戦略)
- (2) 候補材料および革新的構造材料の最新の研究開発成果
- (3) 材料開発 ((2) 等) における、各種の照射実験施設、計算機材料科学等の可能性と限界
- (4) 核融合炉構造材料開発の加速に向けた国際協力

結果として、実用化までを見据えた広い範囲において計算機材料科学的手法および照射実験による研究開発のいずれについても、今後の相当な期間にわたって発展および利用が必須であり、互いに相補的な位置付けを持つことを意識して発展させるべきことといった、常識的であるが今後の判断に有用な結論が得られた。以下では、シンポジウムの概要、各セッションの内容等を紹介する。

II. シンポジウム概要および主な結論 (勧告)

シンポジウムは、2006年7月10~12日の3日間、お台場 (東京都港区) にある国際交流会館で開催された。IEA がスポンサーであるため、参加にはある程度の制限が生じたが、EU、米国、スイス、韓国、中国からの約20人の参加者を含め、60名余りが参加し、多数の発表 (60件を越える) と様々な議論が行われた。

初日には、IFMIF を含む各材料別のセッションが行

Report on IEA Symposium for Fusion Reactor Materials Development; Discussion on the Significance of IFMIF and Computer Materials Science: Shiro JITSUKAWA, R. E. STOLLER, F. W. WIFFEN, Hiroyasu TANIGAWA, Masami ANDO, Kazuhiko SUZUKI.

(2007年 5月30日 受理)

われ, ここでは, 続く2日間に行われる IFMIF 等の照射施設と計算機材料科学に関する課題を意識しつつ, 最新の材料研究の成果について報告等が行われた。2日目以降では, 各極からの核融合炉開発の進め方, 照射実験および計算機材料科学の位置付け等についての発表を受け, 今後の進むべき方向や重要事項について発表と議論が行われた。

このようにして得られた結論(勧告)は, 全体として, 次のようなものとなった。すなわち,

- (1) DEMO 炉の目的の一つは, 核融合によるエネルギー生産の経済性を見通すことであるが, これを合理的な範囲で, 早期にかつ低いリスクで実現するためには, IFMIF の重要性は極めて高い。
- (2) IFMIF およびこれを補う照射損傷の理論, モデリング, シミュレーション等の範囲の広さと必要な経費を考慮すると, これらの遂行には高度な国際的協力と共同作業が重要である。
- (3) IFMIF およびこれを補うモデリング活動を効率的に進めるには, 核分裂炉や加速器による照射実験を積極的に活用する必要がある。

Ⅲ. 各セッション等の内容

1日目には, 低放射化フェライト鋼, SiC/SiC 複合材料等の構造材料開発, IFMIF, さらにモデリングの個別のセッションが行われた。これらのうちから, 以下のⅢ-1節では, 低放射化フェライト鋼等の材料のセッションでの計算機材料科学に関する議論を中心に紹介する(IFMIF およびモデリングのセッションでの議論等は2日目以降の関連課題の紹介に含めて示す)。次いで, 2日目および3日目に行われた, 各極の研究開発方針等の議論から, 計算機材料科学に期待される役割, IFMIF を補完する照射施設, さらに許認可等を意識した材料開発の進め方についての議論を, 以下のⅢ-2~4節で紹介する。

1. 材料開発における計算機材料科学の利用状況や期待

材料開発自体の議論については省略し, 計算機材料科学の利用や期待についてまとめて示す。なお, 材料のセッションは, 低放射化フェライト鋼, SiC/SiC 複合材料, 高熱流速機器材料等が開かれた(報告は約20件)。

共通して, カスケードの生成を含む弾き出し過程については, 分子動力学法等による計算機シミュレーションの利用と重要性等が指摘された。一方, 合金系では典型的であるが, 点欠陥の動き, 点欠陥集合体の形成, 微細組織変化については, 従来からの反応速度論による取扱いやキネティックモンテカルロ法の適用もあるが, 十分な精度での取扱いには, まだ相当な発展が必要との意見が多かった(今回はバナジウム合金についてはセッション

がなかったが, バナジウム-鉄合金での大きなスエリングの説明に計算機シミュレーションが効果を上げた例がある)。また, 照射材の強度特性に基づき機器の力学的挙動を予測する巨視的な領域については, 比較的近い将来の目標として注力すべきことが指摘された。このほか, 照射効果以外であるが, 合金設計に有用な相安定性の推定, 複合材料の熱的, 機械的挙動予測(結晶粒界の状態評価も含む)等への使用実績や高度化についても期待が示された。

2. 計算機材料科学による照射損傷のモデリングとシミュレーションの役割

この領域に関する最近の成果, 各極からの取組みと位置付けの紹介があり(合計約20件), 議論が行われた。この中で, DEMO 炉材料の開発での計算機材料科学の役割の増加が指摘された。本シンポジウムに1年半ほど先立ち行われた米国エネルギー省(DOE)による照射損傷のモデリングに関するワークショップ(ORNL/TM-2004/132)等での議論と共通するが, 第一原理計算による合金の原子間ポテンシャルから原子レベルでの照射硬化のモデル, これを有限要素計算に組み込んで複雑な荷重下での機器の挙動予測の試みが紹介された。これらの結果と近年の急速な進展から, 「核融合炉材料開発に寄与するために計算機材料科学が答えるべき事柄を的確に示し得る段階に達した」とされた。

しかしながら, モデリングおよびシミュレーションで照射実験の代替はまだできない。むしろ, モデリングを成功させるには2つの点で照射実験との間に緊密な関係が必要である。一つは, モデルの開発と検証の対象となる典型的な問題を示すこと, また(知られていない)材料パラメータを測定し, モデル検証の入力データを得ることにある。これらに必要な実験は, 多くの場合, 荷電粒子(電子, イオン等)の照射や核分裂中性子の照射で可能である。もう一つは工学的な事柄へのモデル適用である。すなわち, モデルに基づく合金等の選択と最適化に用いる材料データベースの構築であり, 単純化した構造物レベルにおける照射モデル適用の検証であり(溶接継ぎ手, 複雑な応力状態での挙動等を含む), 工学設計との間をつなげる材料挙動データベースのモデルに基づく高度化である。

分裂炉や IFMIF を用いた工学的な実験により照射効果モデル等によるコンポーネント等の挙動予測能力範囲が確認できれば, モデルを炉設計の補助手段に適用できるようになる。もちろん, 「予測」には既存のデータベースを越えた領域での外挿能力も要求され得るため, これはモデリング活動において最もチャレンジングな課題といえると同時に, モデリングへの本質的なニーズを示すものでもある。システムの複雑さ, 材料の多様さ, 使用条件の複雑さ(中性子束, 照射量, 温度および機械的負

荷)から明らかであるが、炉設計に必要な設計の基盤を実験のみで担うことは不可能と推定される。

モデルの検証に必要な実験手法の多くは、マイクロ組織に関係する。近年、この領域では、アトムプローブ電界イオン顕微鏡、中性子散乱等に関して著しい進展が見られる。これを実現する試料作製手法進展(例えば、収束イオンビーム加工によるホット試料作製)をも含め、理論およびモデリングを成功に導く要素であろう。

3. IFMIF および他の照射施設の役割

核分裂炉、加速器(電子、イオン等の荷電粒子照射)および核破砕中性子源が IFMIF の代わりになり得るか、またこれらの照射施設の重要性について、改めて議論が行われた(約 5 件の発表等)。

核融合プラズマが発生する中性子のエネルギーは約 14 MeV であるが、核分裂炉の中性子は 0.65 MeV 程度にピークを持つ広いエネルギー分布を示す。したがって、少なくともプラズマに面する機器での違いは大きい。中性子エネルギーの違いは 2 つにまとめられる。一つは材料の原子に中性子が衝突して生じる「初期弾き出し原子」のエネルギーが異なることによる、「弾き出しの連鎖(カスケード)の規模の違い」であり、もう一つは「核変換生成元素(主に、水素とヘリウム)の生成量の違い」である。このうち前者については、過去 15 年ほどの間に計算機実験により、エネルギーが高くなってもカスケードが分岐を生じるため、個々のカスケードの規模が大きくなり、このため核分裂炉照射との違いは小さいことが明らかにされている。しかし、もう一つの核変換生成元素の生成量には大きな違いがあり、核分裂炉照射での近似は不十分である。これに対し、加速器による荷電粒子照射では、重イオンを照射して弾き出しを近似し、並行して水素やヘリウム原子を注入することで、状況を近付けることができる。しかし、照射損傷領域の寸法(例えば、損傷領域の厚さ)が小さいため、強度特性の評価に利用し難い問題を持つ。また、核破砕中性子源では、高い領域まで中性子のエネルギー範囲が広がり、核変換生成元素が多くなること、特に、ヘリウムよりも重い元素の生成も無視できないため、いずれも近似度には限界があることが確認された。結局、IFMIF を除く代表的なこれらの照射施設は、モデリングと組み合わせて、実験結果に解釈を加えた上で利用する必要があるのであって、IFMIF や相当するような中性子源の代わりには利用し難いことが改めて合意された。

4. DEMO 炉に向けた材料開発

炉の認可に関わる規格基準やその考え方は、設計データへの要求に関して保守的であり、場合によっては JSME や ASME 等の公的な規格への登録が可能なほどの材料データを揃えることが求められる可能性がある。

その場合、いくつものヒートを用い、多種の製品形態での材料データが要求され得る。さらに、例えば、米国 NRC のような許認可の担当組織は、「許認可の過程でモデリングの結果が意味を持つためには、相当するデータによって明白に裏付けられている必要がある」と示唆している。これは IFMIF のように、照射体積が制限されている場合には重要な課題である。

もちろん、核融合炉機器での材料規格の必要事項は、核分裂炉の場合に比べて緩和されると期待できようが、許認可の担当組織の考え方との十分な調整なしに、これに期待し過ぎれば、DEMO 炉について、予想外の遅れが生じ得る可能性に留意すべきである。

材料規格、建設認可等の課題に加えて、炉への投資のリスクの低減も重要な課題である。核融合炉のような巨大な投資が必要な施設の建設には、炉が長期間安全に運転できることが確信できる必要があろう。これには材料が予想される性能を示し機器が所定の耐久性を持つことも含まれる。

施設の許認可可能性、安全へのリスク、投資のリスクといったものは、すべて、炉の実用化に関する重要項目であり、これらは材料特性等の設計データを得る実験施設の能力にも依存する。一方、照射損傷に関する理論やモデリング活動は、材料開発のために実験に要する時間と経費の低減に寄与できよう。例えば、モデルに基づく予想によって、設計上、鍵となるような照射条件の摘出ができるようになれば、必要になる設計データの量を低減できると期待される。これは、そのような施設でどれほどの照射量までデータを取るべきかといった事柄にも影響しよう。

Ⅳ. おわりに

過去数年間、核融合炉材料に関しては IFMIF の位置付けに関係して、また、他の原子力機器材料についても GNEP 等に関して、照射損傷を始めとする材料の劣化予測や材料開発への計算機材料科学適用の期待が示され、これに関するワークショップが各国で開催されている。これには、既述のような DOE によるもの等がある。計算機材料科学の可能性を十分に評価するには、現在行われている照射実験等による材料開発での課題、さらに将来想定される設計指針の構築、さらには許認可で期待される役割についても展望しつつ議論を行う必要がある。これは、このところ計算機材料科学と対比して語られることがあった IFMIF の意義の評価についても同様である。

本シンポジウムの特徴は、これらを考慮した点にある。コンセンサスを得るために必ずしも明瞭な表現とはならなかったが(Ⅱ章に示した「結論(勧告)」)、計算機材料科学で照射実験を代替することが容易でないこともあり、議論の方向は、

(1) IFMIF は、材料挙動を高い精度で評価すること

を通じて, DEMO 炉開発のリスクを低減するために重要であり,

- (2) 計算機材料科学は, IFMIF 等による照射実験を効率的に進めるために期待できると共に, 照射実験だけでは不十分になると考えられる, 材料基準や設計指針の構築, さらに許認可で, 照射実験によるデータベースの補完的な役割を将来的に担うことが期待される,

というものであったと理解している。これは「計算機材料科学も IFMIF も」という主張ではなく, 「炉の許認可までを見通して不可欠な対応」とご理解をいただければと考える(十分かどうかは, 今後明らかになると考えられる許認可等での必要事項にもよる)。これは, III-2やIII-4節で触れられているように, 将来の許認可等への対応は容易でないものになる可能性があるためである(これまで原子炉の重要機器の設計指針では, 照射により材料特性が大きく変わっても使用を続けることを前提としていなかった)。

ところで ITER の機器(例えば, ブランケット)は核融合中性子による照射損傷を受けるが, 本シンポジウムを始めとする会議で特に問題とされていなかった。これは, III-2節でも触れたように, 核融合中性子による照射損傷の特徴は, 主にヘリウム等の核変換生成元素の生成によると考えられるが, ITER 構造材料の候補材料である316鋼等のオーステナイトステンレス鋼は, 幸いなことに核分裂炉照射でも核変換でヘリウムを生成する元素であるニッケルを主要元素として含むため, 核分裂炉照射でも比較的精度の高い挙動評価ができるためである。さらに, このような結果を参考に, 照射損傷の影響が少なくなるよう, 照射量や温度等の使用条件を設定したからである。ただし, 材料特性の変化も生じるので, 強度評価手法や設計手法については, 今後, 検証が必要になる可能性はあろう。この問題は, 技術的には ITER よりも IFMIF で大きな事柄となり得る。そして, 限られた範囲であろうが計算機材料科学等の寄与が必要になる可能性もあろう。これらの課題に対処していく過程で, DEMO 炉の設計に向けた, さらには許認可に対するための技術基盤を整備していく必要があり, ここでは計算機材料科学による補完の重要性が高まらざるを得ないと思われる。

最後に, 後援していただいた文部科学省とシンポジウムにメッセージを下さった藤本審議官, さらに組織委員長と議長をご担当いただいた関 昌弘 Fusion Panel Coordinating Committee (FPCC) 議長に感謝を申し上げる。また, ご協力, ご援助を賜った, 大学の日米協力である JUPITER 計画, 核融合エネルギーフォーラム(当時は, 核融合フォーラム)に感謝する。なお, IFMIF と

計算機材料科学の関係に, かねてより強い関心を寄せられていた DOE の関係者は, このシンポジウムの頃から, 計算機材料科学による照射損傷研究および IFMIF について, ここでの「勧告」や1 昨年の DOE のワークショップ(報告書は, ORNL/TM-2004/132)の結論に近い発言をされるようになったと聞いている。

著 者 紹 介

實川資朗(じつかわ・しろう)

(独) 日本原子力研究開発機構

ようやく工学的意味を持ち始めた照射損傷研究の効果的な利用促進に, ミクロ過程の知識に基づくマクロ的モデル化が重要と考え注力中。

Roger E. Stoller

オークリッジ国立研究所(ORNL)

関心分野は, 構造材料への照射効果に関する理論的および実験的な研究。中心的な課題は, 高速中性子の照射による, 損傷の形成, 微細組織の変化および生成されるヘリウムの影響です。

Frederick W. Wiffen

コンサルタント(ORNL および US-DOE に勤務後, 退職)

経験のある研究領域は原子力システムのための材料開発ですが, このうち材料への照射効果と高融点金属材料の挙動が専門領域です。

谷川博康(たにがわ・ひろやす)

(独) 日本原子力研究開発機構

照射効果が引き起こす事象は厄介ですが, その複雑な世界に学問的魅力を感じつつ, TBM, DEMO を目指して核融合炉の構造材料研究開発を行っています。

安堂正己(あんどう・まさみ)

(独) 日本原子力研究開発機構

専門分野や興味の対象は, 原子炉材料の照射損傷, FIB/TEM 法によるミクロ組織評価, 微小試験片評価技術。

鈴木一彦(すずき・かずひこ)

(独) 日本原子力研究開発機構

安全性, 構造健全性確保のための革新的, 合理的な概念を考案すること, 最近, 高照射損傷機器の構造健全性確保の概念考案に没頭。