

## 研究室だより

### 九大・総理工における核データ関連研究の展開

－ 原子核物理・核データの新たな応用分野を模索して －

九州大学大学院総合理工学研究院

渡辺 幸信

watanabe@aees.kyushu-u.ac.jp

#### 1. はじめに

九州大学・工学系の学府・研究院（工学及び総合理工学）では、原子核物理・核データを含む原子核基礎工学分野（原子力学会の分類に従うと、「放射線工学と加速器・ビーム科学」）で活発な教育研究活動が行われています。本稿では、大学院総合理工学府・研究院（以下、総理工）において、筆者が率いる研究グループが展開している研究を紹介します。筆者は、総理工のエネルギー理工学部門（研究組織）及び先端エネルギー理工学専攻（教育組織）の教員メンバーとして教育研究に従事しており、現在は先端プラズマ・ビーム工学研究室に属しています。当研究室は、長年にわたり、核データ分野で数々の実績をあげ、有能な人材を輩出された神田幸則教授（現、名誉教授）が主宰してこられた核エネルギー変換基礎工学研究室（旧エネルギー変換工学専攻）の流れを汲む研究室です。現在の中島秀紀教授は、プラズマを利用したロケットエンジンの開発（イ



図1 研究グループメンバー（於、九大山の家、筆者：前列の右端中腰）



## 2. 研究内容

### (1) 宇宙線中性子起因の半導体デバイスソフトウェアシミュレーション研究

まずは、原子核物理と電子デバイス工学との学際・融合領域に位置付けられる「高エネルギー宇宙線による半導体デバイスのソフトウェア機構の解明とその応用」に関する研究です。ソフトウェアとは、図 3 に模式的に示すように、中性子、陽子、パイ中間子などの高エネルギー宇宙線粒子が半導体デバイスに入射し、シリコン原子核と相互作用を起こし、発生した電荷によりメモリー情報が反転し、誤動作を起こす現象（シングルイベントアップセット：SEU）です。ソフトウェアについては、以前、核データニュース（No.74 (2003) pp.61-70）に解説記事を書きましたので、関心のある方は参考にしてください。

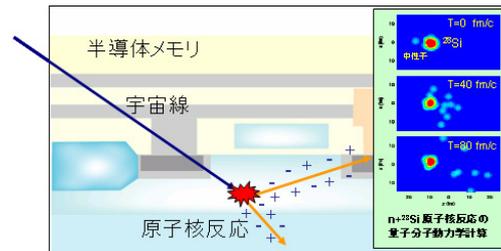


図3 ソフトエラー現象と核反応

次世代半導体デバイスの超微細化や高密度化に伴い、環境中の宇宙線（宇宙線中性子）に起因するソフトウェア発生が危惧され、その対策の重要性が指摘されています。地上における宇宙線中性子のエネルギーが MeV から GeV 領域まで広がっているために、ソフトウェアの予測精度を高めるために、高エネルギー領域の核データや理論モデルが鍵を握っています。そこで、当研究グループでは、最新の原子核物理の知見に基づく核反応モデルの開発（実験も含む）や 2 次イオントラックの微細構造を考慮した発生イオンの空間分布計算の精密化に主眼をおいたソフトウェアシミュレーション技術の高度化に取り組んでおります。地上だけでなく、宇宙機器搭載のデバイスにも応用可能です。

2008 年度からは、筑波大・佐野教授（デバイスシミュレーション担当）との合同チームを組織し、STARC（㈱半導体理工学研究センター）の共同研究（3 年間）に採択され、産学連携の枠組による新展開を開始しました。本共同研究では、核反応並びに生成 2 次イオンの輸送を PHITS コードで計算し、付与電荷のデバイス内輸送を汎用 3 次元デバイスシミュレータ（ENEXSS）で取り扱う国産シミュレーションツールの開発を目指しています。九大グループは、PHITS と ENEXSS のインターフェイスの開発及び核反応モデルの改良に取り組んでいます。デバイスの主たる構成元素でありシリコンと高エネルギー中性子との核反応を精度よく予測するために、測定データが不足している 100~200MeV 領域での 2 次軽イオン生成実験を計画し、スウェーデン・ウプサラ大の 175MeV 準単色中性子施設を使った測定（2009 年予定）を準備中です。なお、2007 年には炭素標的に対する 2 次軽イオン生成微分収量測定（注：粒子線治療関連の基礎データ）を行い、理論モデルや高エネルギー核データとのベンチマーク解析が現在進んでいます。

## (2) 重陽子ビーム加速器中性子源設計に向けた重陽子核データの研究

加速器技術の進展に伴い、様々な粒子ビームを用いた応用分野が開拓されてきました。その一つとして、核融合炉材料の健全性評価や BNCT に関連した重陽子ビーム加速器中性子源に注目し、重陽子核反応理論モデルの確立と計算コードの開発を目的とした研究を数年前に開始しました。核設計に必要な重陽子核反応データベースを構築して、将来の国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の設計等に貢献することを目標にしています。

核子入射核データに比べてニーズが高くないので、評価済み重陽子核データは現存しません。重陽子は陽子と中性子が弱く結合した原子核で、結合エネルギーが小さいために、重陽子入射反応では核力やクーロン場で分解されやすい性質を持ちます。よって、直接過程の記述では分解過程を陽に取り扱う必要があります。まず、高強度連続スペクトル中性子源反応として、IFMIF で採用予定の  $\text{Li}(d,n)$  反応を取り上げました。九大・核理論グループによって長年にわたり研究されてきた連続状態離散化チャンネル結合法 (CDCC 法) を、Li に対する重陽子弾性散乱や生成中性子二重微分面積の解析に初めて適用することに成功しました。現行の CDCC 計算では、 $(d,pn)$  弾性分解反応は取り扱えませんが、いわゆる連続状態への陽子ストリッピング反応が計算できません。それに対して、不安定核入射分解反応の解析で近年広く使用されている Glauber 模型を用いた理論解析を適用し、重陽子分解過程を含む核反応機構の全貌を解明しました。今後、留学生の叶氏がそれらの成果を博士論文として纏める予定です。

さらに、中性子源施設の放射線安全管理の観点から、重陽子ビーム照射によって生成する放射化量や中性子発生量を推定できるように、主要な加速器構造材 (C, Fe, Ni, Cu, W 等) に対する重陽子入射反応核データ (ここでは放射化断面積や中性子生成断面積) の生産も視野に入れた研究を行っています。先に述べた CDCC や Glauber モデルによる直接過程計算を、従来の前平衡・複合核過程計算コード (CCONE や TALYS 等) とリンクさせる方法を検討しながら、厚い標的に対する重陽子入射中性子生成 (TTY) や放射化断面積の実験データ解析を進めている段階です。

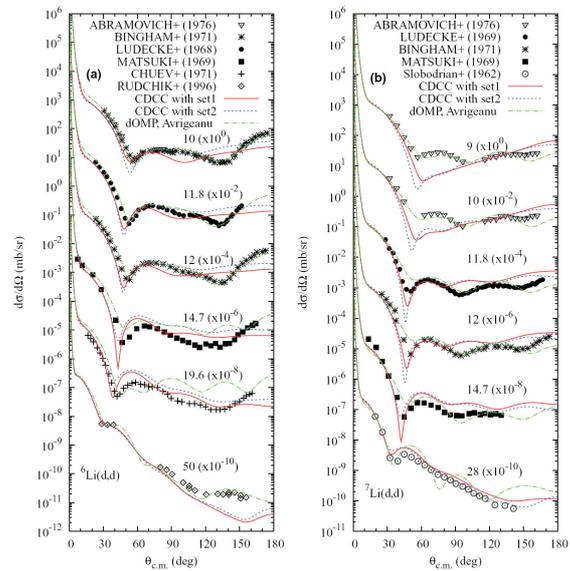


図4 Liに対する重陽子弾性散乱のCDCC解析結果

重陽子入射反応の理論模型解析や計算コード化については、科研費の援助を受けて、緒方氏（九大・核理論）と共同で行っています。さらに、昨年から九大タンデム加速器を使った実験も開始しました。TTY のエネルギー・角度分布測定で、入射エネルギー 10MeV 以下の低エネルギー領域を対象にしています。高速中性子測定に対する豊富な経験と蓄積を持つ石橋・執行グループ（九大・工学研究院）と重陽子ビーム加速や重陽子核反応実験の実績をもつ相良氏（九大・理学研究院）の協力を仰ぎ、総理工・工学・理学の学内共同研究チームを組織して実験を始めました。学外の加速器施設で実験を行う学生達に対して、ビームタイム確保に融通が利く学内施設を使って、多くの実験の経験を積んでもらうことで彼等の教育も併せて狙っています。

### (3) 宇宙線ミュオンによる非破壊イメージング

上述の地上における宇宙線中性子ソフトウェア研究から派生した研究です。地上に降り注いでいる宇宙線のうち約 7 割がミュオン（平均エネルギー：3~4GeV）で、1 分あたり 1 万個/m<sup>2</sup> 程度降り注いでいます。ミュオンは物質とは電磁相互作用のみを行い、高い透過力が特徴です。近年、宇宙線ミュオンを用いたラジオグラフィー（放射線撮影）の応用が提案され、実証研究が行われてきました。その 1 つに高い透過力を利用して、火山のマグマ状態観測やピラミッドの内部探査に使われた例があります。最近では、多重クーロン散乱を利用した新しいラジオグラフィー方法が米国 LANL で提案され、核テロ対策用の核物質密輸監視装置への応用について検討もなされています。これらのラジオグラフィーは宇宙線ミュオンという自然放射線を利用しており、人工的な放射線源が不要となる点に特長があります。

筆者等は、PHITS コードを用いた数値シミュレーションによって、多重クーロン散乱手法を応用した 3 次元非破壊イメージングの可能性を検討しました。その一例（50cm<sup>3</sup> の鉄塊中のウランと空隙）を図 5 に示します。この程度の 3 次元イメージを得るには 1 時間程度の宇宙線ミュオン照射が必要で、実用化に向けて

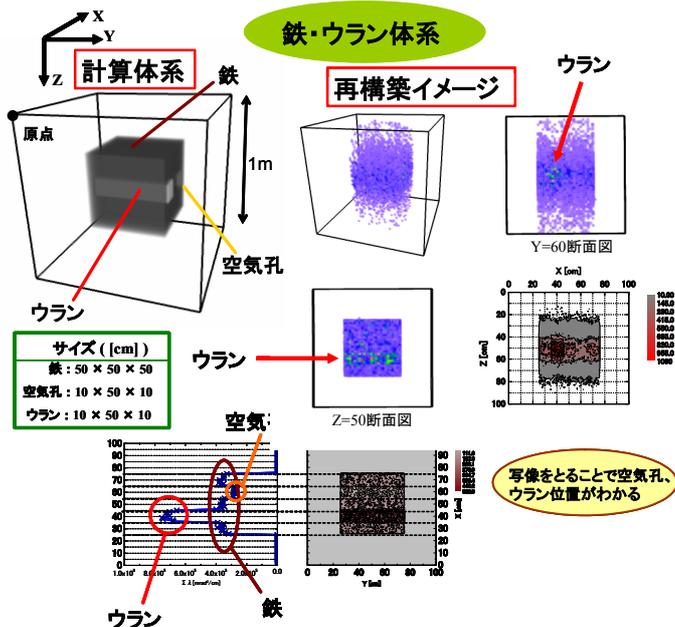


図 5 宇宙線ミュオンによる非破壊イメージングの検討例

は、操作性に優れた安価な広面積の位置検出器開発やイメージ再構築アルゴリズムの高度化・高速化等の R&D がさらに必要だという結論になりました。現在はマンパワー不足で研究を中断していますが、今後 J-PARC で大強度のミュオン生成が可能になると、ミュオンビーム応用の一つとして展開されることを期待しております。

### 3. おわりに

冒頭で、小規模研究集団を率いて“孤軍奮闘”していたと言いましたが、実際は、国内外の研究者等との共同研究の形で上述の研究を行っています。過去に 2 名、日本学術振興会の外国人特別研究員を受け入れた実績もあり、研究室に少なくとも 1 名は外国人研究者や留学生がいる環境作りや学生の海外派遣・国際会議参加を通じて、グローバルな視野をもった人材育成を目指しています。また、九大には核データ研究に理解を示してくれる実験・理論核物理研究者の方々が多く、この恵まれた環境を生かし、彼等と連携しながら、核データの基礎である核物理研究を続けることが出来ております。

現研究室に配属されてから 10 年間、最先端科学技術との接点を探りつつ、学生達と共に原子核物理・核データの新しい応用分野の模索を続けてきましたが、力量不足のため、まだ新機軸を打ち出すまでには至っておりません。しかし、この模索を通じて、核データ研究は応用志向の基礎研究であり、応用分野との密接な関係を維持しながら、核物理の面白さ・ユニークさを引き出す課題設定を行い、その進化（深化）を目指すべきだという思いを強くした次第です。原子核レベルに留まっていた筆者の守備範囲が、応用分野との橋渡しに粒子・イオン輸送コード PHITS を用いることで、大きく展開できる経験（例えば、ソフトエラー研究）をしました。フェムトスケールでの物理現象の解明が、巨視的世界（例えば、粒子線の物質内での巨視的挙動など）にどのようなインパクトを与えるのかを科学的に解析し、それをわかり易く提示することで、核データ研究の存在意義を社会にアピールしていく努力が改めて必要であると思っております。

今後は、先述の Li に対する重陽子入射反応解析で培った経験（例えば、CDCC）を発展させて、積年の課題である“個性の強い”軽核（Li, Be, C, N, O 等）の核データ評価（特に、理論モデル計算）に挑戦することに関心を持っています。また、ナノ半導体デバイスに対するソフトエラー研究成果を粒子線治療のナノドジメトリ研究へ展開し、核物理・放射線物理の素過程を基礎に両分野の融合・発展を図る試みにも興味があります。これからも、国内外の研究者等との連携を図りつつ、九州の地から核データ研究に関連した成果を世界に向けて発信して行きたいと考えております。

最後になりますが、ここで紹介しました研究はすべて、研究室の学生諸君や国内外の共同研究者の協力によってなされたものです。現役の学生諸君、卒業生、国内外の共同研究者の皆様に、この場を借りて心より感謝申し上げます。