

## 研究室だより

### 北大工学研究科量子ビームシステム研究室 (鬼柳研)

北海道大学大学院工学研究科  
量子理工学専攻  
鬼柳 善明  
Kiyanagi@qe.eng.hokudai.ac.jp

#### 1. はじめに

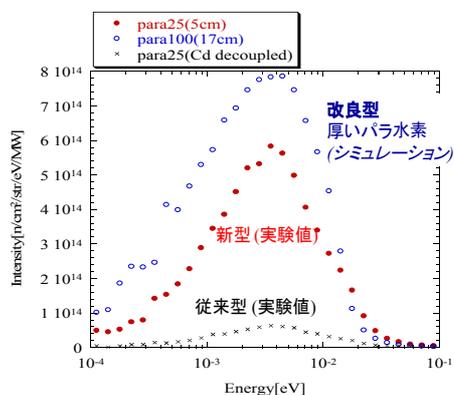
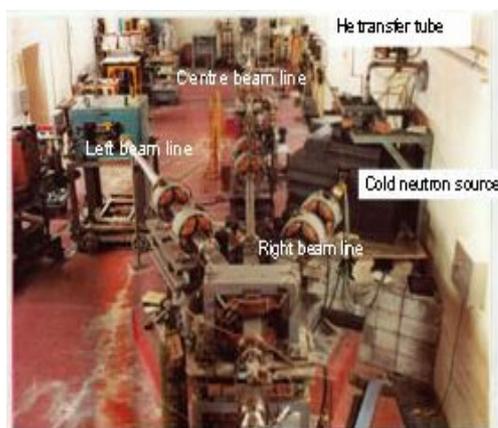
中性子の発生から利用まで幅広く研究を進めているのが本研究室の特徴です。扱う中性子のエネルギーレンジは GeV 領域から超冷中性子 0.1  $\mu\text{eV}$  領域まで広がり、非常に広い範囲に渡っています。核データという観点からは、中性子断面積を測定するという仕事としては来ていますが、むしろユーザーサイドという色彩の方が強い感じです。北大には小型電子加速器があつて、これを用いて中性子を発生させて種々の研究を行っています。この加速器は京大炉の加速器と同程度のパワーですが、利用分野は大きく異なっています。これまで、この加速器を利用して中性子源の開発（この成果の一部は J-PARC 中性子源に反映されています）、共鳴吸収を用いた分光学的イメージング、中性子透過分光撮影法（エネルギー選択的ラジオグラフィ）による物質研究、最近は、核データビームラインの開発と測定にも関わってきています。また、一部、検出器や中性子光学素子開発なども手がけています。ここでは代表的なものを紹介させていただきます。

#### 2. 加速器中性子減速材システムの開発

中性子が物質生命科学に重要なプローブであることは J-PARC を見るまでもなく、よく知られたことです。その研究のために、1960~70 年代の初期のころは北大、東北大、英国ハーウェル研究所のように電子加速器による光核反応による中性子発生が主でした。最近では陽子加速器による核破砕反応が使われるようになってきています。J-PARC では 3GeV の陽子が使われますが、約 90% 以上の中性子は蒸発中性子で、1~2MeV にピークを持つスペクトルになっています。これは、電子加速器で発生する中性子と同じです。最近の物質研究では遅い中性子（冷中性子）の需要が多く、MeV で発生する中性子を使って、この遅い中性子を如何に効率よく作り出すかが大きなテーマになっています。パルス中性子の場合、所定のエネルギーの中性子が減速材から放出されるまでの時間、放出時間が短いことが一般的には重要です。これは、飛行時間法でエネルギー分析をす

るときの誤差となるからです。ところが、放出時間を短くしようとすると減速材を小さくしなければならず、そうすると強度が減少するというジレンマがあり、最適設計を難しくしています。それでも、温度が約 20K の固体メタンは冷中性子強度も高いし、放出時間も他の減速材と比べると優れているということは北大実験で明らかにされていて、KENS では固体メタンが使われていました。ところが、小型加速器の場合は、放射線損傷のことをあまり考えなくて良いので、固体メタンが使えるのですが、J-PARC の 1/300 の強度の施設でも 2~3 日に 1 回メタンガスを交換していましたので、J-PARC のような大型施設では使用できません。非常の多くの実験とシミュレーション計算を行い、最終的に、現実的選択としては液体水素（超臨界水素）しか使えるものが無いということになりました。ところが水素は、水素数密度が低い、低エネルギーに中性子からエネルギーを奪うことができる有効な運動モードが無いなど、減速材特性としてはメタンと比べて極めて劣っていました。それを、解決するために結合型液体水素減速材を開発し、従来のものに比べると放出時間が長くはなりますが、強度は十倍位高くなることを明らかにしました。さらに、パラ水素を使うことによって強度と放出時間特性を改善することも示しました。これが現在最高効率の冷中性子減速材です。北大で実験を行った加速器の実験ポートと中性子エネルギースペクトルの強度結果を図 1 と図 2 に示します。現在構築中の核データのビームラインも J-PARC の、この型の減速材を見ています。

図 1 北大電子加速器の冷中性子実験ポート。 図 2 水素冷減速材の特性改善。



### 3. 共鳴吸収分光法 (N-RAS: Neutron Resonance Absorption Spectroscopy)

中性子共鳴吸収分光法 (N-RAS) は、加速器を用いて発生させたパルス状中性子ビーム中に含まれる熱外中性子を利用して、飛行時間法で中性子共鳴吸収スペクトルを得ることにより、測定対象物体内部の核種やその温度(運動エネルギー)の分析を非破壊・非接触に分析する手法です。これは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のパルス中性子源 KENS に設置されていた中性子共鳴吸収分光器 (DOG, EZO) を使用して、KEK と共同

で開発を進めてきたものです。

中性子の共鳴現象は物質の原子核の構造に大きく依存するため、共鳴吸収の生じる中性子エネルギーは核種毎に異なります。このため、物質中に共鳴吸収された中性子のエネルギーを、パルス中性子源を用いて中性子飛行時間分析することで、物質中の元素はもとよりその同位体までの同定が可能です（図 3）。さらに、共鳴ピークの半値幅が原子の熱振動の激しさによって変化するという性質を利用すれば、それを分析することで物質中の特定元素の熱振動（運動エネルギー）に関する情報を得ることができるという特徴があります。つまり、N-RAS は物質中で核種毎にその置かれた位置の実効的な温度を測定することができる手法です。

この中性子共鳴吸収スペクトルの測定は一種の透過測定であるため、中性子スリットの移動や測定対象物体の回転と組み合わせることで、物体に関する実空間位置座標で分解した一連の部分スペクトルを得ることができます。我々は、この分解されたスペクトルをコンピュータ断層撮像（CT）の手法で再構成することにより、核種分布や温度分布のような物体断層内部の情報を非破壊・非接触で評価することに成功しました（N-RAS/CT 法、図 4）。これは一粒一粒の共鳴吸収核種が存在量や温度のセンサーとなっており、中性子イメージングとしてはもちろん、非破壊・非接触の深部分析手法として全く新しいものとなります。共鳴吸収断面積は一般的な散乱断面積に比べて一桁以上大きい場合が多いため、小型加速器中性子源でもスペクトル測定が可能であり、現在北海道大学 45MeV 電子線形加速器を用いて、小型加速器中性子源による分析装置としてのシステム開発を実施中です。

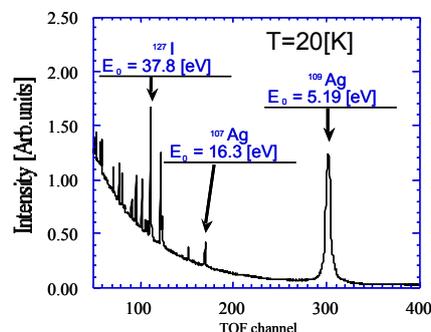


図 3 共鳴吸収スペクトルの例(AgI)。KENS の DOG による。

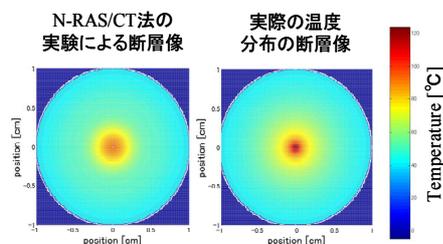


図 4 N-RAS/CT 法による温度分布測定の例。測定対象は直径 2cm の円筒状試料。

#### 4. パルス中性子透過法による物質解析

原子炉、飛行機や鉄道などの構造物に生じる亀裂や疲労破壊は大事故につながるだけに、それらの引き金となる構造物内部の情報を得る事は重要であると考えられます。これまで構造物の非破壊検査には、X 線回折が盛んに用いられてきました。しかし、X 線は物質の表面付近（侵入深さ 20 $\mu\text{m}$  程度）で回折されるため、物質内部の情報を得ることができません。中性子は X 線に比べて透過能が優れており、侵入深さは数 10mm に達するため、内部の情報を直接得ることができます。中性子回折法によって、自動車のエ

ンジンや溶接配管等の非破壊検査が行われています。

パルス中性子を用いた中性子透過法は、非破壊検査法として有用な手法の一つとして挙げられます。TOF 法を用いて得られた縦軸全断面積、横軸波長の Bragg edge パターンを解析することによって、結晶構造・歪み・組織の情報を得ることができます。パルス中性子透過法の利点は、2次元位置敏感型の検出器を用いることによって、歪み量の測定だけでなく歪み部位・組織の変化をマッピングすることも可能なことです。

以下にパルス中性子透過法による SUS304 材の組織変化の観察について紹介します。SUS304 は家庭用品から工業用品まで幅広く利用され、熱処理前に比べ熱処理後の組織は、結晶粒が成長し組織が変化することが知られています。パルス中性子透過法を用いて、熱処理による SUS304 材の組織の変化を捉えることを目的としました。試料は、同一サイズの非熱処理材と熱処理材 (anneal 処理、650°C-24h, 空冷)、2次元位置敏感型の検出器 (Li グラスシンチレーター、8×8=64 pixels) を用いて高エネ機構の Sirius で測定しました。図 5 には全 64 ピクセル、図 6 には 1 ピクセル分の結果を示しました。非熱処理材と比較して、熱処理材の全断面積の値は減少しており、透過した中性子が増加していることを示しています。結晶粒が充分大きく成長することによって、Bragg 反射が粒内で複数回起こり (消衰効果)、透過した中性子が増加したと考えられます。図 6 中の熱処理材にはリップルが観察されています。これは、結晶粒が非常に大きく成長したため、光路上に存在する結晶の配向に偏りが生じているためであると考えられます。2次元位置敏感型の検出器を導入したパルス中性子透過法は、材料内部における特定部位の組織変化の観察に有効です。

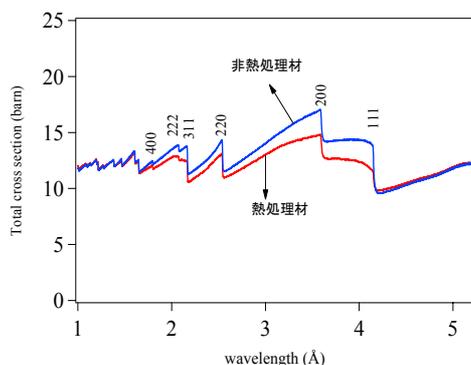


図 5 64 ピクセル分の全断面積。

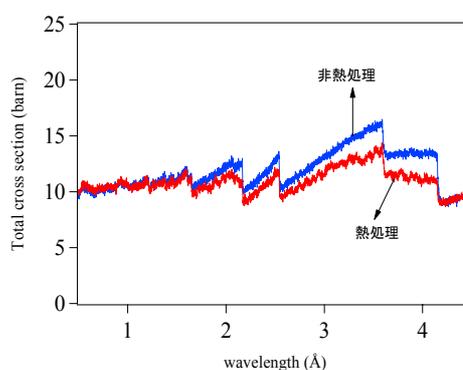


図 6 1 ピクセル分の全断面積。

## 5. 核データ研究

JST の原子力開発事業のひとつである「高強度パルス中性子源を用いた革新的原子炉用核データの研究開発」のテーマで、核データ研究を行っています。この研究は北大、東工大、原子力機構、東北大、京大、名古屋大、甲南大、産総研がグループを作って総合的に核データ測定に取り組もうというもので、高速炉や加速器駆動炉といった革新炉に重要なマイナーアクチニド (MA) と長寿命核分裂生成物 (LLFP) の中性子捕獲反応断

面積の測定を目指しています。特徴として、現在建設中の J-PARC 物質生命科学実験施設 (MLF) の中性子源を用いることで世界最高強度のパルス中性子ビームを使用できること、文科省公募事業「高度放射線測定技術を用いた革新炉用原子核データ研究」(代表東工大井頭准教授)にて開発された革新的ガンマ線検出器を用いることがあります。両者を組み合わせることで、高純度試料を多く用意することが難しく、かつ、試料自体からの放射線バックグラウンドにより測定が困難であった MA や LLFP の中性子捕獲反応の測定が期待できます。MA については Cm 同位体、LLFP については  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$  の測定を予定しています。この研究では、中性子捕獲反応を百 keV 程度の中性子エネルギーまで測定することを目指しています。このような領域の中性子を利用するビームラインの設計はあまり例がなく、減速材表面での中性子束分布もエネルギー依存性をもつため、その模擬実験やシミュレーション、またビームラインの遮蔽計算などを行い、装置の製作を進めています。また、J-PARC MLF 中性子源に入射する陽子ビームがダブルバンチ構造であるため、中性子ビームにも時間構造が現れるので、この特徴についてもシミュレーションと実験双方から明らかにしてゆく必要があると考えています。J-PARC MLF のビームライン製作にも携わり、平成 18 年度、19 年度に、東工大、原子力機構と協力して、遮蔽体やビーム輸送系の設計製作をおこない、主たる機器の設置を完了する予定です。平成 20 年度にはビームを利用したテスト実験ができるように準備を進めているところです。

## 6. おわりに

中性子や陽子の断面積は、シミュレーションで中性子源解析を行う上では、その精度を決定つける重要な因子であることは論を待ちません。我々も 12GeV 陽子による中性子発生量の測定を行いました。実験では 10~20%程度の誤差があります。低エネルギーの中性子のスペクトル強度に関しては、実験と計算は概ね合っているが完璧では無いというのが現状です。共鳴吸収を利用した温度測定を行う場合には、共鳴幅の精度の良い情報が必要になります。共鳴は原子炉でも重要な量であるので、比較的整備が進んでいる、あるいは、我々の核データのプロジェクトもそのような範疇ですが、これからも整備されていくと思われます。ところが、冷中性子領域になると、ブラッグカットオフが入った断面積が少ないのが現状です。当然、合金などの低エネルギー中性子断面積は殆ど見あたりません。低エネルギーから高エネルギーまで、また、色々な物質について中性子断面積が整備されて行き、エネルギー利用だけでなく、より広く中性子が利用されていくことを期待しているところです。

最後に本稿の執筆に協力頂いた加美山准教授をはじめ、研究室の方々に感謝の意を表します。