



## RCNP での核データ研究戦略検討会 会合報告

2011 年 6 月 28～29 日、大阪大学核物理研究センター

日本原子力研究開発機構

放射線防護研究 Gr.

岩元 洋介

[iwamoto.yosuke@jaea.go.jp](mailto:iwamoto.yosuke@jaea.go.jp)

### 1. はじめに

核データ研究戦略検討会が、2011 年 6 月 28～29 日に大阪大学核物理研究センター (RCNP) で開催されました。本検討会の目的は、核データ研究者、核データを利用する研究者・技術者、および核物理研究者が集まり、中高エネルギーにおける核データ研究 (特に、RCNP において展開されるべき核データ測定。陽子エネルギー 20～400 MeV の範囲) の戦略を検討することで、各応用分野で要求される核データの重要性や緊急性に応じて分類し、分野を超えた研究者の組織化を図ることを目標とするものです。

従来、中高エネルギー核データ測定研究者の共通のモチベーションは、「存在しないデータを全て合理的に測定し、核データの精度向上に役立てる」でしたが、核物理研究者はこの認識に対し、「終わりがみえず、計画不十分で、研究者間のまとまりがない」と厳しい評価をしていました。この状況の中、昨年 8 月の RCNP 実験課題審査後に、審査員であった理研の上坂氏から筆者へ、核データ測定のロードマップ作成会合の開催を持ちかけられました。これが会合開催のきっかけとなりました。

この会合には、国内の大学、研究機関、民間企業の研究者、技術者が参加し、総出席者数は計 39 名でした。世話人は渡辺氏 (九州大)、洞口氏 (RCNP)、深堀氏 (JAEA)、魚住氏 (九州大)、加藤氏 (北大)、合川氏 (北大)、萩野氏 (東北大)、小野氏 (東北大)、畑中氏 (RCNP)、高階氏 (阪大医)、上坂氏 (理研)、大津氏 (理研)、岩元 (JAEA、筆者) が務め、世話人代表を筆者が務めました。なお、以下で報告する内容の発表は全て、以下のホームページで見ることができますので是非ご覧ください。

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~thoraguc/rcnp/>

## 2. 会合の概要

新たな核データニーズを探り今後の研究戦略を立てるために、世話人で下記の主題と、それらに関する講演者を選び、講演ならびに討論を行いました。

- 国内の核データ活動の紹介（主として、JAEA と北大） 3件
- 国産粒子輸送計算コード PHITS と核反応モデル 4件
- ADS、革新的原子炉、核融合炉等のエネルギー生産応用と核データ 3件
- 粒子線治療や RI 製造等の医学応用と核データ 5件
- 半導体デバイス照射効果・材料シミュレーションと核データ 4件
- 核データ測定の現状 5件
- 全体討論

以下、各主題に対する報告を行います。



写真1 会合の様子

## 3. 国内の核データ活動の紹介（JAEA 深堀氏、北大 合川氏、牧永氏）

深堀氏から JENDL 中高エネルギーファイル群、JENDL High Energy File (JENDL/HE) や JENDL PKA/KERMA File (JENDL/PK) の整備の現状について紹介がありました。また実験グループに対して、ヨーロッパの核データ測定に関する協力体制構築といった体制をアジアで構築しては、といった提案がありました。

合川氏から、2011年5月に発足した北大大学院理学研究院附属原子核反応データベース研究開発センターについて紹介があり、荷電粒子核反応データの収集と公開方法について説明がありました。

牧永氏から、天体核反応データベース (NRDF/A) と、元素合成に関する北大での実験について紹介がありました。より良いデータベースを構築するために、実験に関する論文グラフの数値データの提供の呼び掛けがありました。

#### 4. 国産粒子輸送計算コード PHITS と核反応モデル

(RIST 仁井田氏、東北大 小野氏、理研 小濱氏、北大 松本氏)

仁井田氏から PHITS コードに関する紹介があり、PHITS が様々な医療・加速器・エネルギーの応用分野で適用できることを出席者に認識させました。

小野氏から反対称化分子動力学法 (AMD) とよばれる原子核反応モデルについて紹介があり、原子核入射反応の実験データを良く再現することが示されました。今後は AMD モデルを改良する上で、特に exclusive な実験データが必要とのことでした。

小濱氏から 100~300 MeV 領域の陽子-陽子全断面積と陽子-原子核全反応断面積の重要性に関する発表がありました。粒子線がん治療を行う際には数値シミュレーションで治療計画をたてますが、生体に多く含まれる元素と陽子の上記エネルギー領域の断面積データが殆どないこと、それに対処する物理モデル“くろたまモデル”の説明がありました。

松本氏から、 ${}^6\text{Li}(n,n')$ 反応の CDCC (Continuum Discretized Coupled Channels) 解析について発表がありました。20 MeV 以上の入射中性子エネルギーに対する  ${}^6\text{Li}$  連続ブレイクアップ過程の実験データが殆どないことから、最大 150 MeV までの実験データを要望していました。

#### 5. ADS、革新的原子炉、核融合炉等のエネルギー生産応用と核データ

(JAEA 西原氏、九大 渡辺氏、JAEA 千葉氏)

西原氏から、加速器駆動炉 (ADS) 開発に関する発表があり、ADS の設計手法の説明がありました。核データへの要望としてビーム窓の健全性評価に重要な発熱に関する実験データ、入射陽子に対するヘリウム生成のデータが挙げられました。

渡辺氏から、核融合研究開発のロードマップ、トカマク型 DT 核融合炉開発、国際核融合材料照射施設 (IFMIF) に関連した核データについて説明がありました。核データに対する要望としては、IFMIF に関連して陽子、重陽子入射のデータが必要で、特に軽核 (Li, Be, B, C, N, O) の断面積データが重要であることが示されました。必要データは二次粒子生成や反跳イオンの断面積やエネルギー・角度分布、トリチウムの同位体生成断面積が

重要とのことでした。RCNP でできることとして、100 MeV 以下の(d,xn)データ測定の提案がありました。

千葉氏から、代理反応に関する発表がありました。熱中性子と  $^{239}\text{U}$  の反応で生成する不安定核  $^{240}\text{U}$  の反応の特性を調べるために、 $^{18}\text{O}$  と  $^{238}\text{U}$  の核子移行反応を用いる代理反応の原理と関連する測定・計算について説明がありました。今後はこの手法を用いて高速中性子に対する核データを取得する予定とのことでした。

## 6. 粒子線治療や RI 製造等の医学応用と核データ

(国立がんセンター 西尾氏、京大炉 田中氏、阪大医 高階氏、  
JAEA 永井氏、RCNP 洞口氏)

西尾氏から、標的原子核破砕反応による線量照射誘導陽子線治療の研究について発表がありました。放射線治療では、患者体内の臓器情報、腫瘍の位置、腫瘍に掃射されている放射線が“観える”が重要で、体内で起こる標的原子核(酸素、窒素、炭素など)破砕反応から生成するポジトロン放出核を情報因子として照射領域を画像化する、と説明がありました。特に必要な反応データが 20~300 MeV 領域の  $^{12}\text{C}(p,X)^{11}\text{C}$ ,  $^{10}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}(p,X)^{15}\text{O}$ ,  $^{14}\text{O}$  の反応断面積で、実験データも計算コードの精度も不十分と指摘がありました。

田中氏から、サイクロトロンを用いた BNCT 用熱外中性子源について発表がありました。治療に適応可能な  $1.2 \times 10^9 \text{ (cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$  の熱外中性子強度を得ることに成功したと説明がありました。必要な核データとして、陽子、重陽子入射からの中性子生成断面積と角度・エネルギー分布が挙げられました。

高階氏から、粒子線治療にかかわるシミュレーション計算について発表がありました。照射直後の患者は放射化されていて、医療従事者が患者のもとへ行くと被ばくするので、実効線量を半分にまで下げるために 150 秒待つ必要があるという結果の説明がありました。医療用のシミュレーションには、5%以下の精度の高さが要求されているので、核データに対しても高精度のものが要求されるとのことでした。

永井氏から、医療用 RI 生成研究に求められる核データについて説明がありました。医療用 RI 生成に重要な反応を図 1 に示します。米国薬局方が要求する  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  の放射核純度は  $^{99}\text{Mo}$  が  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  の 0.015% 以下、別の  $\beta^-$ 、 $\gamma$  線生成核は 0.01% 以下との説明がありました。

洞口氏から、400 MeV の陽子入射反応より生成する白色中性子を用いた  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  製造基礎実験と計算に関する報告があり、製造の可能性が示されました。

## Monitor Reactions

Protons	Deuterons	3He-particles	Alpha-particles
$^{27}\text{Al}(p,x)^{22}\text{Na}$	$^{27}\text{Al}(d,x)^{22}\text{Na}$	$^{27}\text{Al}(^3\text{He},x)^{22}\text{Na}$	$^{27}\text{Al}(\alpha,x)^{22}\text{Na}$
$^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$	$^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$	$^{27}\text{Al}(^3\text{He},x)^{24}\text{Na}$	$^{27}\text{Al}(\alpha,x)^{24}\text{Na}$
$\text{natTi}(p,x)^{48}\text{V}$	$\text{natTi}(d,x)^{48}\text{V}$	$\text{natTi}(^3\text{He},x)^{48}\text{V}$	$\text{natTi}(\alpha,x)^{51}\text{Cr}$
$\text{natNi}(p,x)^{57}\text{Ni}$	$\text{natFe}(d,x)^{56}\text{Co}$		$\text{natCu}(\alpha,x)^{66}\text{Ga}$
$\text{natCu}(p,x)^{56}\text{Co}$	$\text{natNi}(d,x)^{61}\text{Cu}$		$\text{natCu}(\alpha,x)^{67}\text{Ga}$
$\text{natCu}(p,x)^{62}\text{Zn}$			$\text{natCu}(\alpha,x)^{65}\text{Zn}$
$\text{natCu}(p,x)^{63}\text{Zn}$			
$\text{natCu}(p,x)^{65}\text{Zn}$			

## Gamma Emitters

$^{67}\text{Ga}$	$^{123}\text{I}$	$^{81}\text{Rb}$	$^{201}\text{Pb}$
$^{67}\text{Zn}(p,n)^{67}\text{Ga}$	$^{123}\text{Te}(p,n)^{123}\text{I}$	$^{82}\text{Kr}(p,2n)^{81}\text{Rb}$	$^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb}$
$^{68}\text{Zn}(p,2n)^{67}\text{Ga}$	$^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$	$\text{natKr}(p,x)^{81}\text{Rb}$	$^{203}\text{Tl}(p,2n)^{202\text{m}}\text{Pb}$
	$^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$		$^{203}\text{Tl}(p,4n)^{200}\text{Pb}$
$^{111}\text{In}$	$^{123}\text{Xe}$	$^{123}\text{Cs}$	
$^{111}\text{Cd}(p,n)^{111}\text{In}$	$^{127}\text{I}(p,5n)^{123}\text{Xe}$	$^{124}\text{Xe}(p,2n)^{123}\text{Cs}$	
$^{112}\text{Cd}(p,2n)^{111}\text{In}$	$^{127}\text{I}(p,3n)^{125}\text{Xe}$	$^{124}\text{Xe}(p,pn)^{123}\text{Xe}$	

## Positron Emitters

$^{11}\text{C}$	$^{13}\text{N}$	$^{15}\text{O}$	$^{18}\text{F}$
$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$	$^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$	$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$
		$^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$	$\text{natNe}(d,x)^{18}\text{F}$
$^{68}\text{Ge}$	$^{82}\text{Sr}$		
$^{69}\text{Ga}(p,2n)^{68}\text{Ge}$	$^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Sr}$		
$\text{natGa}(p,x)^{68}\text{Ge}$	$\text{natRb}(p,x)^{82}\text{Sr}$		

図 1 医療用 RI 生成に重要な反応 (永井氏発表資料から)

## 7. 半導体デバイス照射効果・材料シミュレーションと核データ

(富士通セミコンダクター 上村氏、九大 安部氏、  
JAEA 小野田氏、京大炉 義家氏)

上村氏から、中性子ソフトエラーの加速試験評価について発表がありました。RCNP 加速器の白色中性子照射場を利用した中性子ソフトエラー試験や、PHITS コード、AMD を使用したシミュレーションによる成果の報告がありました。テクノロジーの進歩が早く、実物が完成する前に評価する必要があるため、シミュレーション及び核データの高精度が必要との要望がありました。

安部氏から、最新デバイス（設計ルール 32 nm 以下）を対象とした、PHITS コードを含む中性子起因ソフトエラーシミュレーションの高精度化に関して発表がありました。核データに対する要求として、中性子 200 MeV 以上の Si ターゲットから生成する  $\alpha$  粒子、陽子といった二次イオンの断面積とその角度・エネルギー分布が挙げられました。

小野田氏から、宇宙放射線が半導体に及ぼす三つの放射線影響（100 kGy を超える多量の  $\gamma$  線等によるトータルドーズ効果、 $10^{14} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  の多量の電子線等によるはじき出し損傷効果、確率的な 1 個の重粒子によるシングルイベント効果）について発表がありました。核データに対する要望として、1 MeV~数百 MeV の陽子、MeV/u~GeV/u の重粒子に起因する核反応で、特にターゲットとして W, Ti, Cu の要望がありました。

義家氏から、ADS 材料の照射損傷に関する研究と照射損傷発達から機械的性質変化までを扱うマルチスケリングモデルに関する発表がありました。核データに対する要望として、高エネルギーの PKA スペクトル、生成粒子のエネルギースペクトル、信頼性に関する情報がありました。また核データ利用の敷居が高いとのコメントもいただきました。

## 8. 核データ測定の実状

(KEK 佐波、九大 澤田、JAEA 岩元、太田、理研 大津)

佐波氏から、数百 MeV 陽子によるフラグメント生成二重微分断面積の測定について発表がありました。核データ測定の戦略として、モデルの開発と核データ作成と連携した測定、様々な入射粒子、生成粒子を包括的に一度に行う測定を提案されました。

澤田氏から、陽子 100 MeV 以下のエネルギー入射に対する PHITS コードの精度を上げるための改良に関する成果の報告がありました。

岩元(筆者)は、RCNP における中性子照射場の開発と遮蔽実験について発表しました。100 MeV を超える準単色・白色中性子照射場としては RCNP しかなく、単色中性子入射の断面積測定の可能性を示唆しました。

太田氏から、宇宙線研究のための、CR-39 飛跡検出器を用いた中間エネルギー重イオンの入射核電荷交換断面積の精密測定について発表がありました。宇宙物理（月・惑星）

では、陽子-原子核（特に、C, N, O, Fe）の断面積データが必要で原子核-原子核反応を正確に記述できるモデルが必要とのことでした。

大津氏から、理研の RIBF の大型装置群を用いた核データ測定の可能性について説明がありました。その中の SAMURAI での測定例として、順運動学での安定核からの中性子二重微分断面積測定、逆反応学での不安定核からの中性子二重微分断面積測定などが示されました。また、ZD スペクトロメーターの高い粒子識別能力を用いた、精度良い全断面積測定等の可能性が示されました。核データ測定研究者に大変有意義な施設であることを認識させていました。

## 9. 全体討論とまとめ（個人的感想含む）

事前に参加者の核データのニーズ（入射粒子・エネルギー、反応の種類等）を探るために、アンケートを送付していました。アンケートを集約したところ、全てのニーズにこたえるには、あらゆる核反応を網羅する必要があり、分野毎にそのニーズを具体的に探る必要があるとわかり、今回大きく応用分野をわけました。

まとめると、ソフトエラー、エネルギー関連は主に、高エネルギー陽子、中性子入射による様々な核からの中性子、荷電粒子生成二重微分断面積を必要としていました。医療関連は、主に図 1 に上げた医療用 RI 生成に関する同位体生成断面積データの要求が多いのが特徴です。

アンケート結果と講演内容に従って、各応用分野で必要とされる核データを、その重要性や要求精度の観点から整理し、RCNP での核データ測定可能性等についても議論しました。しかしこの中で優先順位や重要度に差をつけるのは大変難しく、要求精度も不明瞭なものが多いのが実情でした。そこで筆者の提案ですが、核データ研究者が分担して、それぞれの応用分野の核データ分野に対する窓口をつけるのはいかがでしょうか。そして、応用分野の研究者・技術者と一緒に、具体的に何のデータ・物理量が必要で、既存の実験データの有無の調査、シミュレーションの精度検証を一緒に行う、といったコミュニティが必要ではないかと考えています。そうすることで、応用分野の目標達成に繋がるロードマップが初めて作成され、核データ研究者の貢献も明確になると考えます。核データの展開先は多岐にわたり、もはや一研究者が把握できる状況ではありません。「存在しないデータを全て合理的、包括的に測定し、核データの精度向上に役立てる」も重要ですが、応用先にもっと歩み寄り親切に、核データに対する敷居を下げることも大事かと考えています。

また議論の中では、核データ測定や核反応モデル研究の成果をスピーディに PHITS シミュレーションコードに反映させ、各応用分野に活用しつつ、核データ研究にフィードバックを図る枠組みの必要性も指摘されました。本検討会を通じ、三者間のさらなる連携や情報共有の必要性が認識され、メーリングリストや検討会 HP を活用した情報交換や

情報発信を行い、本活動を継続していくことが確認されました。

#### 10. おわりに（個人的感想含む）

この会合で、初めて、核データ、原子核物理、応用分野という新しい原子核コミュニティを創出できたことは、非常に大きな成果だと考えています。核データにとって、新たな顧客を生み出す絶好の場になりえますので、今後も他分野と協力して、若手が中心となり応用分野を開拓できればと考えています。

最後に、本会合を開くにあたり、多くの世話人に精力的に活動して多大なご協力を頂きました。その中でも渡辺氏、洞口氏、高階氏、深堀氏、上坂氏にはホームページ、各提出書類の作成、会場の準備、様々な有益な提案等頂きました。心より深く感謝いたします。



写真2 懇親会の様子