

「長期的展望にたった核データ整備の必要性」

に関する IAEA 諮問家会合報告

日本原子力研究所核データセンター

深堀 智生

fukahori@ndc.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

平成 12 年 11 月 28 日～12 月 1 日、オーストリア、ウィーンの国際原子力機関 (IAEA) 本部にて「長期的展望にたった核データ整備の必要性」に関する IAEA 諮問家会合が開催された。本諮問家会合では、今後の中高エネルギー核データのニーズに関する講演とともに、将来の核データニーズに関する議論・諮問を行った。本諮問家会合では次のトピックスに関する講演・討論があった。

1. 医学利用（医療用放射性同位元素の製造、粒子線による放射線治療、内部被曝線量評価）のための核データニーズ
2. 宇宙物理学（中性子及び荷電粒子入射反応、原子核モデルの役割）のための核データニーズ
3. イオンビーム分析と関連する技術のための核データニーズ
4. 保障措置と関連する技術のための核データニーズ
5. 原子炉及び核燃料サイクル（先進的高速炉及び鉛冷却炉開発、先進的熱中性子炉及び溶融塩炉開発、核燃料保存のための Burnup Credit）のための核データニーズ
6. 加速器駆動型未臨界炉（アクチニド及び核分裂生成物の核変換）のための核データニーズ
7. 核破砕中性子源ターゲット及び中高エネルギーにおける放射線遮蔽のための核データニーズ

これら講演および討論を受けて、日本における核データ整備計画を踏まえて、今後の国際的核データ活動の動向を掌握するとともに、今後の核データ整備に関する国際的合意および諮問を IAEA に対して提案した。

開会に先立ち、最初に、W. Burkart 原子力科学及び応用部門次長から、「アメリカの

原子力関係予算のおよそ 30%が非エネルギー利用である。したがって、多くの分野での核データの利用は非常に重要となる」旨の挨拶があった。次に、V. Mourougov 原子力エネルギー部門次長から挨拶及び IAEA の持つ原子力科学に関する展望が述べられた。原子力発電の開発のために次はどうかの議論が必要となっている。原子力発電の割合が米で下がっているが、ヨーロッパでは最近少し回復しており、東アジア及び途上国では高くなっている。IAEA の予測では 2020 年までは発電容量は増える。しかし、原子力発電の割合は必ずしも増加するとは限らない。現実的には発電裕度は既に 20%を切ろうとしている。更に、原子炉の経年運転も 14 年程度のものが多くなってきているし、使用済み燃料の量も増えてきている。したがって、ワンスルー燃料使用の小さな原子炉、高速炉及び閉燃料サイクル、加速器駆動システム、トリウムサイクル等のオプションの考察により、原子力の技術革新が必要となるであろう。そこで、IAEA の仕事として、現行企画補足、利用者のニーズのグローバルな評価、技術的特徴のまとめ及び計画の遂行、推薦されたタスクのフォローアップ等が考えられるが、予算の確保が重要となってくる。今後追加的予算が期待される国々は、韓国、中国、インド、ブラジル、アルゼンチン、CIS、スペイン、ドイツなど 20 カ国があげられているが、予断を許さない状況である。最後に、D.W. Muir 核データセクション長から、核データ研究の国際協力について、OECD/NEA/核データ評価国際協力ワーキングパーティー (WPEC) の枠組みに加えて、IAEA/核データセクション (NDS) の持つ、OECD 加盟国に加えた中国、ロシアの参加、予算を伴う研究協力計画 (CRP) の推進、途上国の開発援助などの特長を生かした国際協力が必要となるであろう旨、挨拶があった。

この後、会合の座長に J.W. Boldeman (Lucas Heights Research Lab.、敬称略、以下同様)を選出し、参加者の自己紹介を行って、各分野への核データニーズへの議論を開始した。以下、会合の概略を列記する。筆者の専門外の分野が殆どであるので、間違った表現または不適切な表現があった場合はご容赦願いたい。

2. 医学利用のための核データニーズ

S. Qaim (Forschungszentrum Jülich GmbH) の座長で、以下の講演が行われた。

2.1 医薬品用核データニーズの緒言 (S. Qaim)

診断のためには崩壊データ、反応データ(RI 製造)、速い化学的分離技術が、放射線治療のためには外部照射(反応・輸送データ)及び内部照射に対応する核データが必要となる。例えば、Tc-99m 生成のためには Mo-100, 98+p の反応が現状では考えられているが、isomer ratio のデータが重要となる。しかし、現状ではこれらニーズを満たす評価済み核データはない。今後の整備に期待したい。

2.2 医療用放射性同位元素(診断及び治療)の製造 (S. Qaim)

放射線診断に用いられる β -放射体を用いた SPECT は速い生体反応に、 β +放射体を用いた PET は遅い生体反応に対応する。しかし、内部照射のドシメトリーは内部被爆の推定が経験則でしかない。 β +放射体はその点改善が期待できる

新しい RI 製造のためには、核データの測定が第 1 に必要であり、余計な放射能が少なくすむようにするためには、ターゲットの作成で高い濃縮が必要であるが、この場合高価な薬品となってしまう。また、化学処理時間の短縮技術も重要であるが、この際、診断領域での化学形態の適合性、優位性の評価の必要もある。したがって、高い製造性とできるだけ少ない不純物（必要のない放射能を作らない）の評価が必要となる。このためには、断面積等のデータによるエネルギー範囲の適切な選択が必要である。大きな加速器や原子炉はどこでも持てるわけではないので、小さな加速器で製造可能な低エネルギー領域でも核データ（陽子入射反応）が必要である。更に、どの同位体がいいかなどの概念の検討にはモデル計算でのデータで十分であるが、実際の使用に関しては実験が必須になるのではないかと思う。

2.3 内部被曝線量評価 (T. Burrows、BNL)

内部被曝線量評価のために必要な内部転換係数の計算には、分岐比、半減期、スペクトル、放射線情報、対生成断面積、電子 (β -、 β +) 捕獲データ、外部制動放射等の核データが必要となる。ENSDF はある程度これを満たしているが、最新のデータを使用することが重要である。核データへの要求精度は 2 倍程度でいいかもしれない。関連するデータベースは以下のようなものがある。

本

DOE-TIC-11026(ENSDF-1978?)

ICRP-38(ENSDF-1978)

MIRD (ENSDF-1987?)

Table of Isotopes

電子媒体

MIRD, NuDat, WWW (NNDC/IAEA-NDS)

ENDF Format Files

コンピュータソフト

EDISTR (ORNL)

RadList (NNDC)

SDFNDF (CEA)

2.4 粒子線(高速中性子及び陽子)による放射線治療 (D.T.L. Jones、National Accelerator Centre)

粒子線による放射線治療のためには、中性子で 70 MeV まで、陽子で 250 MeV までの

核データが必要である。更に、光子及び電子に関する輸送断面積が必要となる。ケルマ因子は線量評価に重要(特に中性子)である。吸収線量評価のためには H, C, O, Si, Ca, N, K, P 等に対する断面積データが必要である。現存する評価済ファイル及び医療用輸送計算コードは、LA150(LANL)及び PEREGRINE (LLNL)があげられる。

3. イオンビーム解析と関連する技術のための核データニーズ

I. Vickridge (Groupe de Physique des Solides (GPS)) の座長で以下の講演が行われた。

3.1 イオンビーム及び核反応による分析 (I. Vickridge)

イオンビーム及び核反応による分析方法に関して、Particle-induced X-ray Emission (PIXE)法、Particle-induced Gamma-ray Emission (PIGE)法、Rutherford Back Scattering (RBS)法、Nuclear Reaction Analysis (NRA)法等の紹介があった。PIGE 法には阻止能、断面積、同位体ごとの γ 線スペクトル、RBS 法には弾性(クーロン)散乱断面積等の核データが必要となる。NRA 法に関しては、表面分析のためには他の反応による contamination 等の解析のため、断面積、角度分布、離散準位への他粒子生成反応の核データが必要となり、深さ方向のプロファイリングのためには荷電粒子入射荷電粒子放出角度分布が必要である。イオンビーム及び核反応による分析に必要なデータをまとめると、大別して、阻止能、断面積(角度分布)、スペクトル等の核データが重要となる。必要な核データは広い核種に亘っているので、IAEA の取りまとめと国際データベースが必要であろう。

3.2 PIGE、RBS、HIRTOFS (A. Gurbich、IPPE)

イオンビーム及び核反応による分析のためには、荷電粒子反応の荷電粒子放出角度分布などの荷電粒子核データが必要であるが、特に、NRA には C, O, N が最重要である。実験データベースとしては、SIGMABASE, NRABASE, HANDBOOK, NUCLEAR DATA TABLE, Internal Report 等が整備されているが、まだ不十分で、足りない部分は核データ計算ツール(散乱の部分のみ)、SigmaCalc、によって計算している現状である。離散準位への核反応データはまだ不十分で、核データ整備の必要性が述べられた。これに対して、「このコミュニティーで保持している実験データベースを EXFOR に入れる努力をするべきである」とのコメントが提案された。

4. 宇宙物理学のための核データニーズ

F. Kaeppler (Forschungszentrum Karlsruhe) の座長で以下の講演が行われた。

4.1 元素合成研究のための中性子入射反応 (F. Kaeppler)

質量数 50~60 以上は中性子捕獲反応による元素合成が主となる、それ以下の質量数領域では荷電粒子捕獲反応または Big Bang による元素合成が主となる。

遅い元素合成過程 (s-process) は、主に赤色巨星内部での Fe~Bi の β 安定線近傍核種合成に対応する。この過程に重要な核データとして、中性子源としての(α, n)反応、0.3~300 keV 領域 (30 keV での平均断面積でもよい) の(n, γ)反応断面積などが挙げられる。この過程で合成される核種は、大部分が安定同位体 (または半減期が 1 年以上) であるので、安定同位体比も重要な情報となる。現状では、質量数 110 以下の断面積誤差は 40% 程度以下、これ以上は少しいが、Stellar Enhancement Factor (SEF、星の中と研究室でのスペクトル平均断面積の比) を考慮すると、純粋な s-process のみのものは SEF が 1 に近いが、それ以外のものも含まれるので、精度としては、不十分である。必要な核データとして、不安定核に対する中性子捕獲反応、弾性散乱及び熱的に励起される準位に対する非弾性散乱断面積、質量数 60 以下の核種に対しては(n, α)、(n, p)断面積などが重要である。

速い元素合成過程 (r-process) は、超新星爆発による Fe~U の中性子ドリップライン近傍核種合成に対応する。0.3~300 keV における不安定核種に対する (n, γ)反応断面積が重要となる。陽子過程 (p-process) は、超新星爆発時の O/Ne 殻核種 (陽子ドリップライン近傍) の合成に対応するが、(γ, n)反応や 1 MeV 以下の (n, γ)反応断面積が重要となる。

実験に関して、核破碎中性子源 TOF による断面積測定は、大量の中性子により少量のサンプルで測定できるため、多くのデータを手に入れることが期待されている。すなわち、捕獲反応断面積の精度のよい実験値が必要であり、天然存在比は非常によい精度で求められているため、1%という高い精度が要求される。一方、中性子スペクトル推定などの精度もあるので、一概にこの精度の議論はできないという問題もある。特に重要なのは、元素合成チェーンの分岐点での小さな断面積の精度を上げる必要があるということである。

4.2 元素合成研究のための荷電粒子入射反応 (M.S. Smith、ORNL)

天体物理モデルは核データに敏感であるので、精度のよい核データが新しいアプローチを創生できる。しかし、天体物理のための核データ整備は、一人の人間が準備できる量を超えている。天体現象の観測装置・施設 (ハッブル望遠鏡や大規模天文台など) はとても高価である。このことを考えても、少しの核データ整備の努力が大きな天体物理への展開を作ることができるのは事実である。

核データとして必要なのは、核融合反応、(p, γ)、(α, γ)、(p, n)、(α, n)、核破碎反応、3-body 反応等に対する核データである。荷電粒子反応断面積はエネルギーの減少とともに減少するが、0.1~2 MeV 領域の捕獲反応、0.1~2 MeV 領域の荷電交換反応、1GeV 以下の核破碎反応は特に重要である。特に、標準ビッグバン中性子 (SBBN) モデルに対しては、

質量数 7 以下の核種に対する (n,γ) 、 (p,γ) 、 (d,n) 、 (d,p) 、 (α,γ) 、 (n,p) 、 (p,α) 反応データが、非均質ビッグバン中性子 (IBBN) モデルでは質量数 20 以下の核種に対する同様のデータが必要である。

核データの天体物理への寄与として、核データは Li 元素のビッグバン時の合成に敏感であるし、天体の進化、太陽ニュートリノ問題にも重要な因子となる。軽い星の進化の過程においては、CNO サイクル、NeNa サイクル、MgAl サイクル(陽子捕獲)、 $C-12(\alpha,\gamma)$ 、 $C-13(\alpha,n)$ 、 $Ne-22(\alpha,n)$ (α 粒子捕獲及び中性子源) などのデータが重要となる。重い星、特に、超新星爆発時には約半分の核種の創生が起こるが、例えばたったひとつの反応 ($C-12(\alpha,\gamma)O-16$) の割合が 20~30% 変わるとその後の生成核種が 100 倍も違うというようなことが起こりうる。超新星及びパルサーの X 線バースト等の研究では陽子過剰核のデータが重要である。不安定同位体も含む C~Si 領域の陽子及び α 粒子入射反応への核データは非常に重要である。発表者は、天体物理学核データセンターの必要性も提案していた。

4.3 宇宙物理学のための核データに対する原子核モデルの役割 (S. Goriely, Institut d'Astrophysique)

星の進化や元素合成 (α , r, s, p-process) に対して核データのニーズがある。核反応、特に、捕獲反応、核子移行反応、核分裂、 α 崩壊、 (γ,n) 、 (γ,p) 、 (γ,α) 、弱い相互作用等の核データが、不安定核、エキゾチック核にも必要である。このことは、非常に多い対象核種 (核図表上のほとんど全部) の高温における核反応に関する核データが必要であるということであるが、核物理モデルはまだ天体物理学のための利用には不十分である。したがって、荷電粒子反応、中性子入射、 β 崩壊などの実験データが必要となる。更に、基底状態、励起状態の性質に関するデータも必要である。このため、質量、準位密度、巨大共鳴等を初めとする広い範囲に亘った核反応のモデルパラメータや nuclear matter の性質などのデータが重要となる。

一般的に、モデルが詳細になればなるほどモデル自身の信頼性は増すが、実験データの再現性の面で精度が落ちる。これには多くの理由がある。たとえば、フィッティングのための自由パラメータの数が減ることなどが挙げられる。したがって、実験データの蓄積、モデルパラメータの高精度化が急務となる。

5. 保障措置と関連する技術のための核データニーズ

J. Boldeman の座長で以下の講演が行われた。

5.1 保障措置 (J. Boldeman)

保障措置に関する核データニーズとして、新燃料分析については半減期、 γ 線の強度、中性子強度、使用済み燃料分析については、核分裂収率、 α 崩壊データ、自発核分裂 (崩

壊の分岐比を含む)等が挙げられる。中性子増倍カウンター (He-3) による測定のためには、メインアクチニド (U-235, 238, Pu-239,240,241) に対する入射中性子エネルギー依存の ν 分布、Cm-242,244 自発核分裂データ、U-234,236 等の崩壊データが必要である。特に、使用済み燃料解析に関しては、遅発中性子データ及び (α, n) データの改善が重要である。

5.2 中性子質問法 (D.L. Smith、ANL)

保障措置のための非破壊検査法としては、大きく分けて、受動的技術(放射性同位体に限る)、能動的技術(外部からの照射)、 γ 線利用技術が挙げられる。このための核データニーズは、中性子及び γ 線生成、放射線強度、検出器の応答、放射線の同時計測、バックグラウンドの元になるものの解析のためのものが必要である。

受動的技術に関しては、崩壊データまたは遅発中性子データが特に重要で、いろいろな応用技術がある。能動的技術技術は、核分裂性物質だけでなく、非放射性的の麻薬、爆弾に利用できる。このためには、放射化断面積、非弾性散乱 γ 線、弾性、非弾性散乱角度分布、即発中性子、即発 γ 線、 (α, n) 反応データ、核分裂収率、中性子捕獲断面積等のデータが重要となる。この他に中性子輸送断面積が、周りの物質について必要となる。 γ 線利用技術のためには、光中性子生成反応断面積、光核分裂断面積、 (p, γ) 、 (p, n) の TTY が必要である。速中性子透過スペクトロスコピーは、爆弾、麻薬等の検出に応用可能である。このためには、中性子源として Li-7 (p, n) 、 (d, n) 反応データ、標的物質の全断面積等が必要となる。パルス速中性子分析技術には、準単色中性子源を使うが、この場合、散乱、非弾性散乱断面積角度分布及び γ 線生成データ(同位体の同定、2つ以上の γ 線の同時測定)が必要となる。

その他、Fissile Interrogation Using Gamma-ray from Oxygen (FIGARO) は、劣化ウランに感度があり(バックの中に入ってもわかる)、F-19 (p, α) O-16 が 6~7MeV の準単色ガンマ線源になりうる。Multi-Detector Analysis System (MIDAS)では、放出 γ 線の同時測定を行う。

5.3 中性子放射化法による物質解析 (G. Molnar、Institute of Isotope and Surface Chemistry)

中性子放射化法の種類としては、遅発 γ 線(通常の方法、NAA)、即発 γ 線(PGAA)、Depth Profiling (NDP)、Neutron Refractometry等が挙げられる。このための核データニーズは、放射化断面積(現存のもの半分以上が精度10%より悪い)、崩壊(半減期、 γ 線生成データ)、冷中性子・共鳴捕獲断面積、熱中性子放射化・吸収断面積、速中性子反応断面積、共鳴パラメータ、核分裂収率、遅発中性子データ等が重要である。

6. 原子炉及び核燃料サイクルのための核データニーズ

N. Rabotnov (MINATOM) の座長で以下の講演が行われた。

6.1 先進的高速炉及び核燃料保存 Burnup Credit のための核データニーズ (N. Rabotnov)

先進高速炉は、MA を燃焼可能であり、Pu を分離しない燃料閉サイクルを実現できる原子炉として、期待されている。このための必要な概念は、均質体系、液体重金属冷却材（鉛、鉛-ビスマス等）、1.05 程度の燃料増倍率の達成である。

必要な核データは、MA の捕獲、核分裂、非弾性散乱断面積で、精度を現状の 30% 程度から 10% 程度に挙げる必要がある。Burn-up Credit 計算に関しては、NEA ベンチマークテストではまだ差が大きすぎる。液体重金属冷却材データに関しても、鉛の全断面積ですらライブラリー間の差がある。鉛冷却炉心ベンチマークテストに関しては JENDL-3.0 の方が JENDL-3.2 よりいい？という報告もある。

6.2 先進的高速炉及び鉛冷却炉開発 (N. Kocherov, KRI)

発表者は、まず、2000 年 5 月ロシアの 21 世紀の原子力開発戦略について概要を報告した。再処理システムを再会し、ナトリウム冷却窒化物燃料炉 (BN-800) や鉛冷却窒化物燃料炉 (BREST-A-300、0.7 (1%の核分裂に寄与) → 5% (9%寄与) の MA 付加、N-15: 99.99%) を建設する予定だそうだ。

MA 生成量の予測のための burn-up 計算は、モンテカルロ+ORIGEN2 で計算されるが、このためには次の核データが必要である。

- 各炉型の中性子スペクトルハンドブック
- Np-237: 断面積(n,f) 1%、(n,n') 5~10%、(n,2n) 10%、p,t,α生成 15%、ν 0.5%
- Am-241: 断面積(n,f) 2~3%、(n,γ) 6~8%、(n,n') 10~20%、(n,2n) 20%、p,t,α生成 30%、ν 1%
- Am-243: 断面積(n,f) 3%、(n,γ) 10%、(n,n') 20~30%、(n,2n) 30%、p,t,α生成 45%、ν 1.5%
- 断面積はスペクトル平均でもいい
- N-14,15, Na, Pb, Pu のデータ

6.3 先進的熱中性子炉及び溶融塩炉開発 (R. Srivenkatesan, Bhabha Atomic Research Centre)

トリウム原子炉システムは、炉心の圧力が小さくてよく（溶融塩炉）、Pu 燃焼炉として優れている（Pu の方が Th より速く燃える）。必要な核データは、WIMS ライブラリーとして U-232, Pa-231,232 も追加すべきである（Th-232, Pa-233, U-233 しか入っていない）。また、トリウム燃料にドーピングする Mg, Dy (FP)、Nb、濃縮 Zr-91（被覆材合金）、Co-59 の burn-up 等のデータも必要である。上記の核種に関する捕獲及び核

分裂断面積の傾向が JENDL-3.2 と他の 2 つの ENDF/B-VI、JEF-2.2 で異なる。結論としては JENDL-3.2 がいいということであったが、違いが大きすぎるので要チェックである。

7. 加速器駆動型未臨界炉のための核データニーズ

M. Salvatores (CEA) の座長で以下の講演が行われた。

7.1 アクチニドの核変換 (A.V. Ignatyuk, IPPE)

アクチニドの核変換のためには、加速器のためのデータを含めて 20 MeV~1.5 GeV の広いエネルギーに亘ったデータが必要である。このためには、よく企画された国際協力が必要である (FENDL のような?)。更に、20MeV 以下においても重要な核種について再評価が必要である。例えば、実効増倍率の計算でルビアの計算とメインライブラリーを用いた計算で 3~6% もルビアが高い。核分裂断面積に関しては、Np-237, Am-241 に対しては大体 OK (2%以下の誤差) であるが、Am-243 に対しては実験データが 2 系統に分離している。MA に関する捕獲、非弾性散乱断面積も重要であり、要求精度としては、重要核 (Np-237, Pu, Am-241,243 など) で数%、他の MA で 20%程度である。Pb, Bi の非弾性散乱断面積及び共鳴領域の評価が JENDL-3.2 が悪い可能性がある。

7.2 アクチニド及び核分裂生成物の核変換 (Z.X. Zhao, CIAE)

中国における ADS 計画について講演した。Pb, Bi, Pu、構造材等に関して 20MeV 以上の核データが必要である。また、LLFP の中性子捕獲断面積や MA (Np-237, Am-241,243, Cm-244,245 など) に対する捕獲、核分裂、中性子生成断面積、 ν 、共鳴データ、核分裂収率 (U-238, Pu-239, Th-232, U-233) 等のデータも必要である。新たにできる MA の評価も必要である。IAEA を中心とした国際協力が重要となるであろう。

7.3 アクチニド及び核分裂生成物の核変換 (K. Tsujimoto, JAERI)

加速器駆動核変換システムにおける、マイナーアクチノイド及び長寿命核分裂生成物の核データに対するニーズを示した。加速器駆動未臨界システムの最も重要な炉特性としては、未臨界度と燃焼反応度変化が挙げられる。またシステムの効率を評価する上で、対象核種の核変換効率も重要となる。これらの特性に対して、核データの影響と現状を示すために原研で提案している鉛・ピスマス冷却加速器駆動炉において異なる核データ (JENDL-3.2, ENDF/B-VI, JEF-2.2) を用いた計算結果を示した。核データの検証には、微分実験だけでなく積分実験も重要であるとして、一例として PFR で照射したアクチノイドサンプルの化学分析結果と計算値との比較を示した。長寿命核分裂生成物のなかで、核変換対象核種としている Tc-99 と I-129 の核データの現状と最近の測定結果との比較を示した。

未臨界度とその燃焼に伴う変化の計算のためには、断面積(核分裂、捕獲、散乱)、 ν 、核分裂中性子スペクトル、遅発中性子データ等の核データが重要となる。また、崩壊熱も重要である。

8. 核破碎中性子源ターゲット及び中高エネルギーにおける放射線遮蔽のための核データニース

A. Koning (ECN Petten) の座長で以下の講演が行われた。

8.1 核物理モデルとその ADS 核データへのインパクト (A. Koning)

低エネルギーでは反応チャンネル数が少ないので実験に頼ることができる。しかし、高エネルギーでは反応チャンネルが非常に多くなるので計算に頼らざるを得ない。ヨーロッパの高エネルギー実験計画 HINDAS (High and Intermediate Energy Data for Accelerator-driven System) 計画では、実験に関して Louvain-La-Neuve、Uppsala/Svedberg Lab.、AGOR/KVI Groningen、SIS/GSI Darmstadt、COSY/Julich 等の研究機関が、理論解析に関して NRG/CEA, Liege Univ.等の研究機関が参加している。ここでは、少なくとも Fe, Pb, U に関するデータを取得予定である。モデル計算のための 200MeV までの必要なすべてのモデル (光学模型、直接反応 (ECIS)、前平衡過程、H-F 過程など) の含まれたコード (例えば、GNASH, EMPIRE, ALICE, STAPRE → MCGNASH (Chadwick), TALYS (Koning)など) の開発が、共鳴領域より上の広いエネルギー及び質量領域で必要となる。

8.2 核破碎ターゲット設計のための高エネルギー核データ (S. Leray, CEA Saclay)

設計のためには中性子生成 (ターゲット、遮蔽)、荷電粒子生成 (材料損傷 (スウェーリング、DPA、エネルギー付与)、同位体生成 (保守の問題、ターゲットの劣化、放射化、崩壊熱、PKA) 等のデータを取得する必要がある。例えば、モンテカルロ輸送コードのための核データを取得するために、200MeV 以上はモデル計算 (INC etc.) で、200MeV 以下は核データファイルを使うなどの工夫が必要である。

この他、発表者はモンテカルロ計算の例を示し、中性子輸送断面積は比較的良好であるが、他の量はまだまだ不十分であると報告した。

8.3 ADS 及びその遮蔽のための核データニース (T. Fukahori, JAERI)

加速器駆動システムのターゲット設計のための核データは、ターゲットそれ自体だけでなく、ビーム窓、反射体、減速材、冷却材等に対しても必要である。また、ターゲットの設計は、各概念 (MA 核変換か核破碎中性子源か、固体または液体ターゲット等の違い) によって異なるので、一概に言うことは難しいが、中性子生成量推定のための輸送計算には、中性子二重微分断面積が、メンテナンスなどのためには放射化断面積が必要

となる。また、熱設計のためには、荷電粒子及び γ 線生成断面積が重要である。必要な元素をまとめると次のようなものが挙げられる。

Target: Ta, W, Hg, Pb, Bi

Beam Window: V, Mo, W

Beam Window (HT-9): Cr, Mn, Fe, Ni, Mo

Beam Window (ceramics): C, O, Al, Si, Ti, Zn, Ba

Moderator: D

Reflector: Be, Ni, W, Pb

Coolant: H, O, He, Na, Hg, Pb, Bi

遮蔽のためには輸送断面積（二重微分断面積）及び放射化断面積が重要である。放射化断面積に関しては、構造材だけでなく、冷却材、空気、土などに関連する核種のデータも必要となる。例えば、高エネルギー加速器によって構造材に生成される主な放射性同位元素は Na-24, Sc-46, Mn-52,54, Co-56,57,58 等であり、空气中に生成されるものは T, Be-7,11, C-10,11,14,15, N-13,16, O-14,15, Ar-37,41 等である。遮蔽のために核データが必要な元素をまとめると以下のようになる。

Structural Material: V, Fe, Ni, Cu, Nb, Mo

Magnet: Na, Ca, Cr, Fe, N, Cu, Nb

Beam Window: V, Mo, W

Beam Window (HT-9): Cr, Mn, Fe, Ni, Mo

Beam Window (ceramics): C, O, Al, Si, Ti, Zn, Ba

Beam Tube: Na, Al, Ca, Cr, Fe, Ni

Beam Dump: C, Fe, Cu

Moderator: D

Reflector: Be, Ni, W, Pb

Coolant: O, Ga, Pb, Bi

Soil: C, Si

Air: N, O, Ar

上記の核データは各国の努力で、整備されつつあるが、その絶対量及び精度は未だ不十分である。核データの精度を上げるためには、実験データの蓄積が不可欠であるので、高エネルギー核データ測定を進展させるための国際協力が重要となろう。

9. その他の核データニーズ

その他の核データニーズに対して、深堀が宇宙工学や材料損傷研究分野に関して、C. Tuniz (IAEA) が地球物理学的な時計とするための宇宙線起源の中性子による地中深くの核反応等の地学分野へのニーズに関する報告を行った。

10. パネル討論及び各セッション毎のサマリーの作成

上記発表をふまえて、パネル討論及び各セッション毎のサマリーの作成を行った。大まかに言って、人的資源、国際を含む研究協力（ボランティア）、予算に関する話が多かったように思われる。以下、個別に概略を記す。

10.1 医学利用のための核データニーズ

将来のための提案が、核データ編集（特に荷電粒子核データ）及び開発を通しての長期的考察が研究を支援するためになされた。活動の提案として、

- 診断用放射性同位元素のサイクロトロンによる生成のための近年データベース構築の努力は継続されるべきである。データベース間の差異を除くために努力を集中する必要がある。データの信頼性評価が、可能になった時点及び必要性が時点においてタイムリーに行われるべきであろう。
- 治療用放射性同位元素に対して特に注意すべきである。放射性薬品を短時間で生成できる場（施設）のためには関連する同位体の崩壊の特徴及びその生成に係わる反応断面積に関する注意深い観察が必要である。核反応及び崩壊データに対する利用可能なデータの評価、データ間の差異の除去、不足データの認識は適時に与えられるべきである。
- 内部被曝量推定の観点に立ったいくつかの典型的なケースに注意すべきである。オージェ電子放出や連続スペクトルの形状はもっとよく記述されるべきである。この活動は治療及び診断に有効である。
- 中性子及び陽子を用いた放射線治療のためのデータは一般的に改善されたといえる。しかし、データベースの時々刻々の改訂は継続すべきである。C, O に対するデータ不足の解消は急務である。中性子及び陽子による人体組織の放射化に関する情報も必要である。
- 診断用及び治療用放射性同位体、核子による放射線治療の3分野における新しい開発が継続的にモニターされ、データニーズのレビューが定期的になされるべきであろう。

が挙げられる。

10.2 イオンビーム解析と関連する技術のための核データニーズ

イオンビーム解析と関連する技術のための核データの現状は以下の通りである。

- いくつかの微分断面積実験の生データは、SigmaBase や NRABASE に既に収録済みである。
- EXFOR に上記データを組み込む努力が進行中である。
- 現在の実験データ間に重大な差異が認められる。
- 低エネルギー領域における荷電粒子微分断面積評価の実現性は現存の原子核物

理モデルの枠組みで可能であることが確認されている。

- 陽子及び α 粒子のラザフォード散乱以外の弾性散乱断面積はいくらか評価されている。
- 関係するデータの測定は、多くの研究機関で行われつつある。
- 理論的研究はロシアとフランスで行われている。
- 原子核物理における専門家不足がイオンビーム解析分野での進展を大きく妨げている。

これを踏まえた技術的提案を以下のように行いたい。

- 顕在、潜在にかかわらずイオンビーム解析の対象となる断面積すべてに関する詳細なリストが必要である。
- 利用可能なデータの詳細な評価が整合性確認のために必要である。
- イオンビーム解析に関するデータベースの情報及びこの分野における新しい測定結果は、EXFOR に寄与すべきである。
- イオンビーム解析におけるシミュレーションコードのためのフォーマットとして継続的に利用できるようにするため、R33 フォーマットは標準コンピュータフォーマットとして整備されるべきである。
- 適当なフォーマットで断面積をダウンロードするために、必要なコードが開発される必要がある。
- イオンビーム解析を研究する研究所における断面積測定は、うまく調整されるべきである。
- 陽子及び α 粒子の非ラザフォード散乱断面積やC, N, Oに対する重陽子入射反応における荷電粒子放出チャンネルの測定に注力すべきであろう。
- イオンビーム解析データ評価のための活動を組織するために実質的な努力が必要である。
- SignaCalc ソフトウェアは既に評価された断面積に対する励起関数をユーザに与えるが、公開のための開発を速やかに行うべきである。
- IAEA 核データ活動のスコープの中で、イオンビーム解析分野の協力体制を築くべきである。

組織に関する提案は以下の通りである。

- イオンビーム解析分野は、IAEA 核データセクション及び核データネットワークとのリンクを強化するために、IAEA 予算以外の「イオンビーム解析のための核データ連絡官」を提案することを求められるべきであろう。
- IAEA は「イオンビーム解析のための核データ収集・評価・測定」に関する研究協力計画（CRP）を発足させる。
- IAEA はイオンビーム解析分野の研究者に関連する核データに関するトレーニングを施す。

10.3 宇宙物理学のための核データニーズ

宇宙物理学は、宇宙で観測される物体及び過程の定量的な理解を目的とする。実際、原子核宇宙物理学は元素の起源、恒星中での元素の生成メカニズム、恒星の進化などを扱う。したがって、銀河や宇宙の進化に関する関心に対する重要な情報源を構成する。

核エネルギー生成を特徴づけるための関連する恒星の反応や崩壊割合の決定や定量的な方法での様々な元素合成過程の研究は、長期的な活動を必要とする。必然的に原子核宇宙物理学は他の多くの核物理分野とオーバーラップし、影響を受ける。

原子核宇宙物理学における実験は、恒星中の限られた温度から結論される比較的低いエネルギーを説明しなければならない。これは、荷電粒子反応が μbarn 以下まで落ちる断面積値しかないクーロン障壁以下のエネルギーまで研究されねばならないことを意味する。中性子入射反応は、詳細な解析のためには高い精度が要求されるので、困難である。関連して、先進的・先端の実験技術がこの目的のために開発されつつある。

評価に関しては、様々な元素合成過程に含まれる膨大な反応、データの収集、評価、宇宙物理モデルのための入力データの普及などにおいて、この分野への重要性が増してきている。これはまだ満足行く方法で組織されているとは言えない。現状のバラバラな活動は、よりよく組織化され、共通の標準や形式に集中され、拡張されるべきである。

原子核宇宙物理学における計算は、膨張する元素合成から来る要求を満足するには、不十分である。非常に高い温度及び粒子束の条件の下で、反応過程は安定領域からずれ、膨大な数の原子核及び反応を包含している。これら原子核の多くは、非常に短寿命で、実験室で直接反応率を測定する十分な量を製造することは困難である。加えて、高温・高密度のプラズマの特徴は、理論を宇宙物理学モデルの欠くことのできないツールとしている。関連して、理論はこの多くのデータを要求される。完璧に知られていない高温・高密度下の原子核に外挿する必要があるので、理論的挑戦はよりミクロな物理概念を用いることである。芸術的な核物理モデルは、より現象論的なアプローチ（原子炉や加速器駆動炉などで利用されているようなモデル）の精度に到達するために改良されなければならない。

原子核宇宙物理学分野に関連する提案は以下の通りである。

- 他の分野とオーバーラップしている部分の特定及びこれらの調整を図る。例えば、長寿命 FP の中性子捕獲断面積、低エネルギー荷電粒子入射反応断面積、エネルギー減衰測定、核物理モデルの開発など。
- 原子核宇宙物理学で利用する核データニーズを考察する。1) EXFOR や現在あるデータベースへの新しい実験データの提供のため測定者に協力・奨励する。2) 原子核宇宙物理学分野の過去の実験データ（特に荷電粒子データ）をデータベース化することを奨励する。3) 原子核宇宙物理学分野の研究に必要な優先度の高い核データニーズのリストを作成し、核データネットワークに配布する。

等に関する国際的な格納作業や普及活動を行う。

- CRP 等の先端的な反応モデル及び関連するパラメータに関する長期計画を調整する。これは、ドリップラインへの核物理の拡張のための基礎となる。更に、これは ADS 等の目的のためにも有用であろう。
- 原子核宇宙物理学分野における高優先度核データ要求リスト (HPRL) を公開する。(C-12(α,γ), Ne-22(α,n)等)
- IAEA は原子核宇宙物理学分野の進展及び核データに対する要求を広くアピールし、将来の調整機能の中核としての役割を果たす。
- 原子核宇宙物理学分野で構築された実験及び理論的な努力を他の分野とより頻繁に交換する。これにより、すぐにでも利益があると思われる。したがって、IAEA が原子核宇宙物理学分野をその長期計画の中に位置付けることを提案する。

10.4 保障措置と関連する技術のための核データニーズ

保障措置のための核データニーズに関する提案

- 精度の高い核データは、保障措置検査活動の主要な要素である。現状の保障措置のための要求は、一般的には満足されているが、改訂が非破壊検査により寄与する若干の選択された分野がある。
- 保障措置に利用される長期的な核データニーズは、原子力発電の先進的概念に強く左右される。これらの概念が送出する核データ要求の方向に関する現状の観察を仮定すると、現行の活動を支援し、将来の検査を支えるものと思われる。将来の保障措置活動は現状のものと同様の原則を持って行われるものと予測される。
- マイナーアクチニドに対する精度の高い自発核分裂半減期及びその放出中性子数 (P_v を含む) は、受動的及び能動的な中性子検出に対し、要求されるであろう。
- U-235, Pu-239,240,241 の中性子核分裂に対する入射エネルギー依存の P_v 分布は、改訂が必要である。マイナーアクチニドに関しても同様である。
- U-234,236, Np 同位体の中性子核分裂に対する 6 群崩壊定数及び遅発中性子収率は、現行の活動に有効である。マイナーアクチニドに対する同様のデータは、将来的に必要となるであろう。
- 将来の活動に関して、(α,n)反応は中性子検出補正のより重要な資源となる。より良いデータが望まれる。
- 全てのマイナーアクチニドの崩壊データの解析は、将来の精度良い同位体構成割合同定をより確実にするために必要である。
- IAEA 核データセクションは、保障措置のための核データハンドブックを継続的

に改訂し、核データ要求を予測するために先進的な原子力発電概念の観測を行うよう提案する。

非破壊検査のための核データニーズに関する提案

- 7~10, 14 MeVでの C-12(n,n' γ)からの 4.44 MeV の γ 線に対する角度分布の実験値が必要である。
- Be(p,n),(d,n)の 2~10 MeV での中性子スペクトル及び角度分布の実験値が必要である。
- U-235,238, Pu-239,240 の (γ ,f)+(γ ,n)反応の中性子収率データの実験値が必要である。
- O, N, Cl(n,n' γ)反応による即発 γ 線収率及び角度分布の実験データが 7~10 MeV で必要である。
- 2~4 MeVにおける C, O, S, Ti, Fe, Ni, Cu, Au の厚いターゲットに対する陽子入射中性子収率及びスペクトルの実験値が必要である。
- Ge の中性子核データの評価済ファイル改訂が必要である。

注目すべき物質

- 環境、生物学、冷中性子法が PGAA に必要である。
- 即発 γ 線スペクトル、冷、熱、熱外、速中性子断面積、C, O の非弾性散乱、半減期、核分裂収率、遅発中性子などに対する新しい実験データが必要である。
- 熱中性子断面積、中性子共鳴、散乱長などのデータの新しい評価が必要である。

普及のためのニーズ

- 全ての関連するデータ（誤差、元データを検索できることを含む）が一カ所にあることが必要である。
- データの形式は、ハンドブック、web、CD-ROM、コンピュータ可読 (spreadsheet, MCNP ライブラリー等) を考慮する。

10.5 原子炉及び核燃料サイクルのための核データニーズ

高速炉開発のシフトの新しい傾向に対する従来の核分裂性同位体、構成材料、マイナーアクチニドに対する Na 冷却などの核データ改良に関するニーズがある。高速炉スペクトルで核変換されるリサイクル燃料要素（鉛ベースの液体重金属冷却材など）として、閉燃料サイクルオプション（ここでは、高い反応率を持つ燃料要素が様々な減速材及び反射材環境に置かれる）に対する核データが、低エネルギー中性子データについて必要である。U-233-Th 燃料を用いる原子炉及びその燃料サイクルの開発では、U-233, Th-232, Pa 等の核データを改訂しなければならない。同時に、討論の中で現存の核データライブラリーの精度は過小評価されるべきではないことが指摘された。これらライブラリーは、マクロ定数の様々なシステムを用いた原子力施設の設計者と操作者の協力により更なる開発について確固たる基礎を築いた。また、相対的に短い自発核分裂周期を伴う最

重核の蓄積は使用済み核燃料の中性子放出を増加させ、捕獲断面積が特に重要であることが認められた。リサイクル中の Pu の低下のためには Pu 同位体の核データ改訂が必要である。

臨界炉のためには核データの精度向上が必要である。提案として以下のものが挙げられた。

- マイナーアクチニドに関して、増殖炉及び核変換炉の高速スペクトル、閉核燃料サイクル中の貯蔵、輸送、再処理の過程での異なった炉心外環境に関連するより柔らかいスペクトルに対する核データが必要である。
- トリウムサイクルに関連する軽いアクチニド (Th-232, U-233, Pa など) の核データが必要である。
- 冷却材として有望視されている、高沸点で化学的に安定な液体金属としての鉛に関する核データが必要である。

10.6 加速器駆動型未臨界炉のための核データニーズ

加速器駆動型未臨界炉のための核データニーズに関する提案を以下のように行った。精度要求が核分裂断面積で 5%、捕獲断面積で 10%、非弾性散乱断面積で 15%程度であり、これがまだ満たされていないので、マイナーアクチニド (Am-241,243, Cm 同位体) データに関する組織的な活動がまだ重要である。

- データの整合性や物理的でないデータ改善のためのレビューを行う。
- 種々の未臨界炉心 (Pu/MA 装荷率、冷却材 (鉛-ビスマス、ガス) 等の違い) の初期及びサイクル終期における重要なパラメータ (実効増倍率、反応度係数、ピーク出力、DPA 成長率など) に対する拡張された感度解析を行う。
- 新しい実験の提案をする前に、上で示したシステムに対する β_{eff} 、崩壊熱、 γ 線発熱計算の誤差、更に一般的に現状のレビューを行う。

また、

- 新しい炉心支持体候補材核種 (MgO, Zr, Ti 等) のためのデータの現状をレビューする。
- 20MeV 以下の Pb, Bi, N, N-15 に対する全断面積、捕獲断面積、弾性・非弾性散乱断面積、(n,p)反応断面積も同様である。

核変換システムに係わるメジャーアクチニドと同様に、

- Pu-238,242 の特に捕獲断面積の精度のレビューを行う。
- 1~20 MeV におけるマイナーアクチニド及び Pu の核分裂断面積の精度を評価する (要求精度は 5%) 。

10.7 核破碎中性子源ターゲット及び中高エネルギーにおける放射線遮蔽のための核データニーズ

核破碎中性子源ターゲット及び中高エネルギーにおける放射線遮蔽のための核データニーズは主に 20 MeV 以上に対してである。膨大な要求リストがあり、加速器関連の構成要素（遮蔽、ターゲット、ビーム窓など）についての多くの断面積が含まれている。これらの核データニーズを満足させるための方法は、明白で、全ての要求に対する実験的なデータ生成は不可能であるので、注意深く選択した実験データとモデル計算によるしかない。

対象分野としては 200 MeV 周辺を境としたエネルギー領域に分けることができる。200 MeV 以下は、モデル計算に大きく依存しているが核データライブラリーでカバーできる。200 MeV 以上はカスケード計算が利用可能である。それぞれに対する提案は以下の通りである。200 MeV 以下の領域に対しては、

- 20 MeV 以上の領域では計算が主体に成らざるを得ないが、実験と比べてモデル開発はまだ十分とはいえない。多くのアプローチが一致協力し、役割分担を果たすべきである。
- Reference Input Parameter Library (RIPL)に関する現在の IAEA 研究協力を拡張すべきであり、モデル計算モジュール及びモデル自身の開発に専門家の寄与を仰ぐべきである。
- 200 MeV までのエネルギー領域での信頼性検証及び核データ処理に、特に、注目すべきであろう。
- 原研 TIARA の 68 MeV における透過実験以外にもこのエネルギー領域でのベンチマークを行うべきである。

等が挙げられた。200 MeV 以上の領域に対しては、

- 核物理モデルには存在する実験データに対するテスト及び改良が必要である。新しい理論的アプローチも必要である。核分裂は特に大きな問題である。
- 最近の 2～3 年で多くの実験的努力がなされたが、まだ実験値と計算値間の差が存在する。特に、中性子入射反応、陽子入射軽粒子放出反応、 $A=100$ 領域の同位体生成等が問題である。新世代の exclusive な実験が、これらモデルの問題を解決できる。
- 高エネルギー核物理モデルと比較できる推奨された実験データセットが待たれる。これは、全ての反応チャンネルについて行われるべきものである。
- モデル開発のためには、より多くの人的資源が必要である。

等が挙げられた。

下記の元素に対する核データニーズがこの分野において特に重要である。ターゲット部については

Target: Ta, W, Hg, Pb, Bi

Beam Window: V, Mo, W

Beam Window (HT-9): Cr, Mn, Fe, Ni, Mo

Beam Window (ceramics): C, O, Al, Si, Ti, Zn, Ba

Moderator: D

Reflector: Be, Ni, W, Pb

Coolant: H, O, He, Na, Hg, Pb, Bi

であり、遮蔽に関しては、

Structural Material: V, Fe, Ni, Cu, Nb, Mo

Magnet: Na, Ca, Cr, Fe, N, Cu, Nb

Beam Tube: Na, Al, Ca, Cr, Fe, Ni

Beam Dump: C, Fe, Cu

Soil: C, Si

Air: N, O, Ar

である。

20 MeV 以上の核データに関する問題解決は、核物理モデルの開発に主に依存する。したがって、IAEA の積極的な参入をこの分野に関して提案したい。モデルの相互比較及び中高エネルギー領域でのモデル開発が必要である。

上記の他、データの収集（存在する全ての実験データベースを EXFOR に集約する）、ユーザインターフェース等について議論された。IAEA における長期的核データニーズのキーワードは「荷電粒子核データ」ではないか、新しいニーズに関しては受益者負担が必要ではないか、人的資源不足を補うためには IAEA のコーディネーションが重要ではないか、等の意見があった。

11. おわりに

多くの分野の核データニーズをそれぞれの専門家から直接聞くことができたのは、大変興味深く、大きな収穫であった。しかし、筆者の個人的な感想であるが、上記で報告された核データニーズは、核データセンターでは日頃から認識できていると思われる。したがって、特に目新しいものは多くはなかった。今後も、核データセンターとしては、アンテナを高くたて、各方面のニーズに注意しながら、タイムリーに核データを提供できればよいと思った。