連載講座 核 デ ー タ

第 4 回 核データの応用と今後の展望

吉田 正, 井頭政之, 大崎敏郎, 辻 政俊,
大石晃嗣, 千葉 敏, 仁井田浩二, 長谷川 明

最終回である今回は、「核データ」の応用分野としての宇宙工学, 宇宙物理と天体物理を取り上げる。また, 近年, 進展の著しい核反応シミュレーション物理の発展と2001年10月開催予定の核データ国際会議を紹介して本連載講座のまとめとする。

I. 宇宙工学と核データ

一般に知られているように, 宇宙空間は地上とは異なる環境である。宇宙空間を特徴づける主な環境条件は, 高真空, 微小重力および宇宙放射線であり, 特に宇宙放射線は地上の原子力施設の放射線とは, 線質およびエネルギーの点で大きく異なっている。現在, 我々は原子炉の設計や安全解析などに必要な核データの体系を完成させつつあるが, 宇宙工学への核データ利用に関しては, 最近いくつかの検討例^aはあるが歴史も浅く, 将来的なデータ整備の必要性が残されている。それでは宇宙放射線とはどのようなものか? そして宇宙工学に必要な核データとは何か? このような観点から概要を述べる。

1. 宇宙放射線の種類と特徴

第4-1図は地球近傍の宇宙放射線環境を模式的に示している。地球には大気という天然の遮蔽体の存在, および地球磁場が宇宙放射線の侵入を妨げる効果のお陰で, 人類を含む地球上の生物は強い宇宙放射線の影響から防護されている。地球大気圏の外側には放射線防護で考慮すべき3種類の宇宙放射線(源)が存在する。すなわち, 銀河宇宙線, 太陽粒子線, 捕捉放射線帯である。

(1) 銀河宇宙線

銀河系内の恒星から放出される高エネルギー荷電粒子で, 超新星の爆発などが起源と考えられてい

第4-1図 地球近傍に存在する宇宙放射線の模式図
(NASA のホームページ, <http://www-spf.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html> を基に作成)

る。これは銀河系磁場により加速され伝播するため, 宇宙空間のあらゆる場所に存在し等方的な角度分布を持つ。宇宙放射線の中では最も高エネルギーで遮蔽が困難である。第4-2図に銀河宇宙線のエネルギースペクトルを示す。約800 MeV にピークを持ち, 100 GeV 以上の高エネルギー領域にも分布する。粒子成分は軽い原子核から Fe, U などの重い核まで幅広く分布するが, 主成分は陽子で約90%を占める。

(2) 太陽粒子線

太陽系の中心恒星である太陽からは, 核融合反応などによる太陽活動に伴って発生する陽子線が地球へ降り注いでいる。低エネルギーの陽子は太陽風と呼ばれ容易に遮蔽できる。最高10 MeV 程度のエネルギーを持つ通常の陽子線は, 太陽粒子線と呼ばれ遮蔽の検討対象となる。太陽活動の強さは11年周期

Seminar on Nuclear Data—Epilogue: Nuclear Data Applications and the Future

^a 例えば, 「統一的中性子ポテンシャル」研究専門委員会編, 中性子ポテンシャルの現状, 日本原子力学会, (1997)。

第4-2図 銀河宇宙線の各粒子成分ごとのエネルギースペクトル

で変化しており、太陽粒子線の強度はこれに比例して変化する。約数年に一度の頻度で、太陽表面に突発的な爆発現象が起こり、さらに高エネルギーの陽子線が放出されることがある。この現象は太陽フレアと呼ばれ、それに伴い放出される数MeV～数10 GeVの高エネルギー陽子線を、特に太陽フレア粒子線と呼ぶ。太陽フレア時には、地球近傍の宇宙空間における陽子線強度は通常の数100倍にも達し、

その発生は予測困難であるため、放射線防護の面からは最も注意すべき宇宙放射線である。

(3) 捕捉放射線帯(ヴァンアレン帯)

地磁気は北極と南極付近を磁極とする磁気双極子を形成している。宇宙放射線(荷電粒子)が地球磁気圏に入射すると磁力線に沿って螺旋運動を行う。さらに磁力線場の形状のために、そこへ入射した荷電粒子は磁極間で往復運動を行い捕えられてしまう。このように地球を中心とした、地球半径の数倍の宇宙空間に、ドーナツ状の玉ねぎの皮のような形の放射線密度の高い領域が形成される。これが捕捉放射線帯と呼ばれ、100MeV付近の高エネルギー陽子が主成分の内帯と、数MeVまでの比較的低エネルギーの電子が主成分の外帯との二重の領域で構成される。後述するように、捕捉放射線帯は地表からの高度が数100kmの地球低軌道では、放射線防護に対する最も重要な放射線源である。

以上の各宇宙放射線のエネルギーと線束強度に関して整理すると第4-3図のようになる。これらの宇宙放射線は高エネルギーの電子、陽子、重荷電粒子であり、これらの入射粒子に対する断面積は、必要とされる核データの測定値が極めて少ないため、原子核反応理論によって推定されているのが実状である。しかし最近では高エネルギーの加速器が建設、運転されるようになり、これらのエネルギー領域の核

第4-3図 様々な宇宙放射線のエネルギーと強度

(J.W. Wilson, et al., *Transport Methods and Interactions for Space Radiations*, NASA PR-1257 (1991) を基に作成)

データが測定され収集されつつある。

2. 宇宙ステーションと宇宙飛行士の放射線防護

現在、米、露、欧、加、日の国際協力プロジェクトである国際宇宙ステーション(ISS)が建設されつつあり、2006年には第4-4図に示す形で完成の予定である。完成時には第4-5図に示すような宇宙服なしで人間が滞在可能な居住モジュールが備えられ、常時7人の宇宙飛行士が交代で乗組み、様々な宇宙実験や地球および天体の観測活動などを行うことが計画されている。したがって、宇宙飛行士の放射線防護はISSの運用上重要な検討項目である。

ISSは高度400kmの地球低軌道を約90分の周期で周回する。この高度は地球磁気圏の内側にあり、銀河宇宙線は磁場により捕捉されるので被曝には直接寄与しない。考慮すべき放射線は捕捉放射線帯の捕捉粒子と太陽フレアである。捕捉粒子による被曝は軌道の高度と赤道面に対する傾斜角で決まる。一般に高度が高く、また傾斜角が大きくなるほど被曝

第4-4図 国際宇宙ステーション(ISS)の完成予想図
(ISSのホームページ, <http://www.shuttlepresskit.com/ISS.OVR/index.htm>より引用)

第4-5図 ISSの居住モジュールの構造例
(ISSのホームページ, <http://www.shuttlepresskit.com/ISS.OVR/index.htm>より引用)

量が増加する。米国のスペースシャトルはほぼISSと同様の軌道を飛行するので被曝量の推定が可能である。第4-1表は、米国のスペースシャトルで船内の線量を測定した結果である。ISSの場合も第4-5図に示すように、スペースシャトルと同様、積極的な遮蔽体を備えておらず、実質的な遮蔽は船壁のアルミニウム1cm程度である。これらの結果から、通常時のISSの船内は1mSv/d程度の線量になると推定される。

太陽フレアは突発的な現象のため予測が難しいが、太陽からの粒子が地球近傍の宇宙空間に達するまでに数10分程度の時間的余裕があるため、フレアを検出したら直ちに遮蔽の厚い区画へ避難するなどの対策が可能である。第4-6図はロシアの宇宙ステーション(ミール)で観測された太陽フレア時の船内の線量変動を示したものである。この時には1回のフレアによる船内の線量は約20~40mSvと推定されている。

宇宙飛行士のより正確な被曝予測には船壁のほかペイロード(積載された実験装置等)による遮蔽効果

第4-1表 地球低軌道における宇宙船内の線量率

ミッション名	打上げ日	飛行期間(日)	測定器	線量率(mSv/d)
STS-81	1997年1月12日	10	TEPC ^{a)}	0.90
STS-84	1997年3月15日	9	RRMDⅢ ^{b)}	1.0
STS-91	1998年6月2日	9	TEPC	1.2
			RRMDⅢ	0.82

a) TEPC : Tissue Equivalent Proportional Counter

b) RRMDⅢ : Real-time Radiation Monitoring Device Ⅲ型

第4-6図 ミールで観測された太陽フレア時の放射線量測定例
(宇宙放射線被曝管理分科会中間報告, 宇宙開発事業団, 有人サポート委員会 (1999) より引用)

を考慮した解析が必要と考えられ, 1GeV以上の高エネルギー陽子に対する核データが必要である。

3. 有人宇宙ミッションと放射線解析 計算コード

将来的に検討されている有人宇宙ミッションとしては, 月面基地(第4-7図)と有人火星ミッションがある。月面基地建設の主な目的は, 火星有人飛行のベースキャンプの設営, およびD-³He核融合^bの燃料である³Heの確保の2点と考えられている。火星有人ミッションの最終目標は, 大気が存在する惑星である火星への人類移住である。そこでは, コケ類から始めて植物を栽培し, 二酸化炭素が主成分の火星大気を酸素を主成分とする大気へ長期間かけて変換し, 人類が居住可能な環境を作り上げる壮大な計画である。また³Heの確保は, 将来の地上でのD-³He核融合への利用はもちろんのこと, 核融合推進ロケットによる木星への到達も想定している。木星には月面よりも多くの³Heが存在すると考えられており, 木星の³Heを利用した太陽系からの脱出も視野に含まれる。

この壮大な計画の第一歩である, 月面基地建設の最重要課題の一つが宇宙放射線の遮蔽である。月には地球のような大気や磁気圏が存在しないため, 銀河宇宙線および太陽粒子線が直接月面に降り注ぐ。

^b $2D + {}^3\text{He} \rightarrow 4\text{He} + p$ による核融合反応。反応エネルギーのほとんどが荷電粒子に与えられるので, 発電効率が極めて高い。D-T, D-D核融合につく第3世代の核融合と考えられている。

第4-7図 コンクリート製月面基地の想像図

前述の目的を遂行するためには人間の長期月面滞在が必要となり, 宇宙放射線の遮蔽が重要となる。

NASAのJ. Wilsonらは, 1次元ボルツマン輸送方程式を決定論的手法により比較的短時間で解く計算コードシステム(BRYNTRN, HZETRN等)を開発し, 宇宙放射線の遮蔽検討を行っている。第4-8図に, BRYNTRNで計算された太陽フレア粒子の, アルミニウム, レゴリス(月の表土), 水に対する線量減衰の例を示す。表面付近では線量は急激に減衰するが, 深部になるに従い, 2次中性子の影響で減衰傾向が緩やかになり, 遮蔽効果が悪くなる。これは2次中性子評価の重要性を示唆している。

高エネルギー放射線の遮蔽解析手法は, 加速器工学の分野で大きな発展を遂げつつある。これらの計算コードの一つにHETC-MCNPモンテカルロ結合コードシステムがある。HETCは, 主として20 MeV以上の放射線を, 後述する核内カスケードモデルに基づき計算する。それに対して, 20 MeV以下のエネルギーの放射線解析には, 評価済核データファイルを利用するMCNPによって詳細な解析が可能となる。第4-9図に, 月面に入射する銀河宇宙線のうち約90%を占める高エネルギー陽子を線源とした, BRYNTRNとHETC-MCNPによる遮蔽計算結果の一例を示す。低エネルギー側のスペクトルで, 核データを用いたHETC-MCNPとBRYNTRNとの間に不一致が見られる。この点について

第4-8図 アルミニウム、レゴリス、水による太陽フレア線量の減衰

(S. L. Huston, K. Oishi, T. Saito, "Radiation Shielding for Lunar Bases Using Lunar Concrete", 43rd Congress of the Int. Astronautical Federation, Aug.28-Sep.5, 1992, Washington DC. (1992).)

第4-9図 HETCとBRYNTRNによるレゴリス厚さ100cm透過後の銀河宇宙線陽子のスペクトル
(K. Oishi, T. Saito, S.L. Huston, "Verification of a Computational Method for Lunar Base Shielding Based on Direct Solution of Boltzmann Equation by Monte Carlo Computational Code", *Nuclear Technologies for Space Exploration*, NTSE-92, Jackson, Wyoming, Aug.16-19, 1992, p.707~716 (1992).)

ては、NASAでも検討が進められた結果、低エネルギー側の不一致は解消しつつある。高エネルギー側に関しての一致はよいが、両計算コードの精度については疑問が残る。3GeVまでの陽子および中性子入射の核データを格納したJENDL高エネルギーファイル(JENDL-HE)の初版が2001年に公開予定

であり、このJENDL-HEを用いた系統性のある解析が期待される。
(辻 政俊, 大石晃嗣)

II. 宇宙・天体物理と核データ

前回からいままでの記述より、核データの応用分野が極めて広い範囲に広がっていることが理解できたことと思う。ここからは、さらに思考を広げて、我々が見ることのできない星や宇宙のなりたちと核データとの接点について概観してみよう。

1. 星・宇宙の進化と核データ

宇宙は約150億年前にビッグバンによって始まったと考えられている。ビッグバン宇宙論によると、生まれたての宇宙は高温、高密度のため、クォーク、反クォークやグルーオン、ヒッグス粒子などが自由に飛び交い、重力、電磁力、弱い力、強い力は統一され同じ強さを持っていた。その後、宇宙の膨張とともに4つの相互作用の分岐が起こり、クォーク・ハドロン相転移により陽子、中性子、中間子などが作られた。さらに温度が下がると、陽子、中性子を種として重陽子やHe, Liまでの元素が生成された。この時点でビッグバンから約1,000秒後である。その際のバリオンの組成はHeが24%程度で残りのほとんどがHであり、H, He, 電子、輻射とニュートリノからなる我々の宇宙が形成された。それでは現在、宇宙にある様々な元素はどこから来たのだろうか？それは、ビッグバンにより生成されたHとHeから、元素の工場である星の中で作られたのである^d。

星や銀河、銀河団の間にはビッグバンで作られたH, Heを中心とするガスや、前の世代の星で作られ超新星爆発などで放出された重い元素でできた原子、分子、チリ等が浮かんでいる。これらの物質の中の密度の濃い部分が重力により、または超新星爆発による衝撃波を受けて収縮し、原始星が形成される。原始星には次々とガスやチリが落ち込むが、落下する物質がなくなるとゆっくりと収縮する。原始星が収縮してその中心温度が1,000万度に達すると、中心部で弱い相互作用により穏やかに制御されたプロセスによりHがHeに変わる核融合反応が始まる。

^c 池内 了, 観測的宇宙論, 東京大学出版会, (1972).

^d 齊尾英行, 星の進化, 培風館, (1992); マーカス・チャウン著, 糸川 洋訳, 僕らは星のかけら, 無名舎, (2000); E.M. Burbidge, G.R. Burbidge, W.A. Fowler, F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.*, **29**, 547 (1957), など。

すると、星の内部で生まれるエネルギーと重力が釣り合って星の収縮は止まり、これ以後は安定して光り輝く。これが主系列星である。どの星もその寿命の大半を主系列星として過ごす。我々の太陽も主系列星の一つである。

主系列星の中心部でHがなくなり、Heの中心核が形成され始めると星は膨張し、表面温度が下がって赤色巨星となる。このような星ではHの核融合反応が中心核のまわりの薄い殻で起こり、殻燃焼する層の外層は膨張していくためである。この膨張は、収縮する中心核の温度が1億度に上がり、Heの核融合反応(三重 α プロセス)でC、さらにはCの捕獲によってOが生成し始めるといったん止まり、その後C・O中心核ができ、再び膨張が始まる。このように、質量の大きな星では、CやOからNeやMg、さらにSi、最後には結合エネルギーの最も大きい原子核であるFeが生成され、星の終末近くまで赤色巨星として過ごす。

星の終末期の様子は星の質量によって大きく異なる。その質量が太陽の7倍程度以下の星では、その中心でCやOの核融合反応が起こるほど高温にならず、膨らんで赤色巨星になった星の外層部が流出をはじめ、高温の星を取り巻いた惑星状星雲となる。やがて星雲は吹き飛び、中心に残された芯が白色矮星として観測される。白色矮星の質量は太陽の0.6倍程度であるが、その密度は水の100万倍程度である。一方、太陽の7～8倍程度の星は炭素フラッシュと呼ばれる超新星爆発を起こし粉々に吹き飛んでしまう。さらに、質量が太陽の8倍以上の星では核融合反応が最後まで進行し、Feの中心核をもつ玉ねぎ状の構造になる。しかし、中心温度が数10億度近くになると、Feは高エネルギー光子を吸収しHeと中性子に分解する。この吸熱反応のため星の中心温度は一気に下がり、星はその外層を支えられずに重力崩壊を起こす。その時、外層部の温度は落下によって解放された重力エネルギーと中心核からのニュートリノ風で一気に上がり、暴走的な核反応が起こる。その結果、外層は爆発的に膨張、飛散して超新星爆発を起こす。芯は外層の落下により圧縮され、中性子星として残るかブラックホールとなる。中性子星は半径10kmほどの大きさだが、太陽の1.4倍程度の質量をもち、密度は水の1,000兆倍にも達する。現在までに1,000個以上の中性子星が観測されている。

第4-10図 超新星SN1987Aのハッブル宇宙望遠鏡(HST)によるイメージ

(Space Telescope Science Institute(STScI)のホームページ, <http://www.stsci.edu/>より引用。NASAおよびSTScIの厚意による。)

第4-10図は、1987年に16万光年離れた大マゼラン星雲で観測された超新星SN1987Aのハッブル宇宙望遠鏡によるイメージである。爆発によって吹き飛ばされた物質が左右に美しい円環を形成しているが、その中には、将来、次の世代の星や生命を形成するであろう多様な元素が含まれている。中心部からは、初期の頃にはパルスが検出され中性子星が形成された証拠とされたが、その後パルスが止まったためブラックホールができたのではないかという議論がなされている。

さて、ビッグバンでできたHとHeを種として星ができ、星の中では重力による核融合反応によりFeに至る元素が次々と生成されていく。その過程は、温度が低い順に起こるものとして、pp-チェーン、CNOサイクル、 α -過程が挙げられる。重い星では炭素同士や酸素同士の融合も起こる。一方、Feより重い元素は、終末期にある星の中で穏やかに起こるs-過程(slow-neutron capture process)と、超

* 中性子星は強い磁場を持っており、かつ高速回転をしているため、磁気双極子放射により電波をパルス状に発生する“パルサー”として観測される。

新星爆発(または中性子星の合体)の際に起こる r -過程(rapid-neutron capture process)という、中性子を順次捕獲する反応で生成されると考えられている。ここで、slow, rapid は、生成の対象となる核種の崩壊率よりも中性子捕獲率の方が遅いか早いかによって由来する。 r -過程は関与する大半の核の β 崩壊の寿命より短い時間内に次々に中性子を捕獲するため、中性子過剰核を経由して進行していく(超新星爆発の際には様々な元素の存在比が凍結され、統計的平衡が達成される条件が満たされることもある： e -過程)。また、陽子過剰核は p -過程、 rp -過程という陽子捕獲、または (γ, n) 反応で生成されると考えられている。さらに、Be, Bなどの核は高エネルギー宇宙線によるスプレッション反応が起源である。 s -過程および r -過程は中性子入射反応であり、また、元素合成過程は原子炉における核種生成と原理的には同じである。このため、原子力技術のために開発された核データや計算手法が適用できる。

宇宙が誕生してまもなく生まれたと考えられる、古い星の中に含まれる放射性原子核と安定核の存在量の比から宇宙年齢を推定することができる。 ^{14}C を用いる考古学的推定と同様の、宇宙考古学ともいえる方法である。このような原子核対(宇宙核年代計)の候補として、 $^{232}\text{Th}/\text{Eu}$ 比、 $^{238}\text{U}/\text{Eu}$ 比、 $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$ 比が考えられている¹。 ^{232}Th の半減期は140.5億年、 ^{238}U は44.7億年、 ^{187}Re は435億年であり、約150億年と推定されている宇宙年齢の推定にちょうど良い値である。ハワイ、マウナケア山頂で日本の誇るすばる望遠鏡が一昨年夏稼働を始め、このような宇宙考古学を可能にするような世界最高性能のデータが次々と生産されている。一方、この方法により宇宙年齢を推定するためには超新星爆発のメカニズム解明とともに、 r -過程に関連する核データ(数1,000種類にわたる原子核の質量、崩壊半減期、中性子捕獲断面積、 (γ, n) 反応断面積等)が不可欠である。 r -過程に関連する原子核のほとんどは寿命の極めて短い中性子過剰な不安定核である。したがって、その核データを計算、あるいは測定することは大変困難であるが、一方でチャレンジングであり、核データに関する諸技術を大きく進展させる可能性を秘めている。核データの今後の展開の一つとし

て、宇宙物理や天体物理は重要であると考えられる。(千葉 敏)

2. 原子力システムと宇宙における核反応の比較

(1) 原子力開発の現状から宇宙に目を向けて

核分裂熱炉が現在広く商業実用化されているのは、かつてアフリカのガボンに存在したオクロ天然炉にみられるように、自然界においても実現されるような優れたメカニズムが存在していたことから容易にうなずける。また核融合炉は、地上における太陽の再現を目指しているものである。高速炉については、現在のところ商業実用化には至っていない。ところで、自然界において高速炉のようなものは、今まで実現されたことがあるのだろうか。地球や太陽上にその答えを見つけようとしても不可能だろう。それでは、宇宙全体にまで探す範囲を広げてみてはどうだろうか。

宇宙においては、ビッグバンによる開闢から、恒星の誕生、進化、それに恒星の最期のシナリオの1つである超新星爆発など、そのほとんどが重力相互作用と核反応による現象で、その形態は豊富に存在する。これに対して、この地球上においては核反応が支配的な現象は数少なく、多くの人が思いつくのは原子力発電システムであろう。地上における現象のほとんどは、電磁相互作用(すなわち化学反応)と重力相互作用によって支配されているといって過言ではない。このように、地上においては核反応現象は人工的と思われがちであるが、宇宙に目を向けてみると、核反応による現象はありふれた自然のものであり豊富に存在する。むしろ我々のいる地球のほうが特殊な環境といえないだろうか。

(2) 宇宙における核反応現象の注目すべき点

宇宙における核反応現象について興味をひく点が少なくとも2つある。宇宙に存在する元素の多くの種類が中性子による核反応で合成されること。それと、宇宙での核反応、すなわち元素合成反応のほとんどは核融合炉や高速炉とほぼ同じkeVからMeVのエネルギー領域で起っていることである。

まず第1の点についてだが、第4-11図に太陽系の元素の存在度分布を示す。宇宙における存在度分布は場所により多少異なることが知られているが、大体この太陽系の分布と同じと考えて差し支えない。HとHeの2つの和が全体のほぼ98%にも達す

¹ 梶野敏貴, パリティ, 14, 40 (1999); 青木和光, 梶野敏貴, 安藤祐康, 天文月報, 94, 55, (2001).

第 4-11 図 太陽系内の元素存在度分布

Si 原子数を 10^6 に規格化してある。顕著なピークには元素名を記す。Fe 族より重い元素の存在度の合計は高々 1% に過ぎない。

るのが目をひく。Th, U を含めた Fe より重い元素は種類において大半を占めるが、それらの存在度の和は高々 1% 程度である。第 II-1 節で述べたように、太陽のような恒星内での熱核融合反応では、核子当たりの結合エネルギーが最大の Fe 族元素までしか合成されない。そのため、Fe 族より重い元素のほとんどは s-過程と r-過程で合成される。すなわち、太陽系に存在する元素の種類のほとんどが中性子捕獲により合成されている。

第 2 の点についてだが、宇宙での元素合成過程は、ビッグバン元素合成から恒星内の熱核融合反応、s-過程、r-過程など、そのほとんどが keV から MeV のエネルギー領域で起こっている。このことは核物理的には当然といえる。なぜなら、keV 以下ではクーロン障壁により核反応が妨げられ、MeV 以上では場に豊富に存在する高エネルギー線による光分解反応により元に戻されるからである。これらの制約は中性子反応についても適用される。というのは s-過程では、必要な中性子は (α, n) 反応のような荷電粒子反応で生成されるからである。

(3) 原子力開発からビッグバンの発想

このように宇宙における核反応過程である元素合成過程は、地上における原子力システム、それも高速炉システムと共通点が多いが、最初にこの類似性に気付いたのはおそらく G. Gamow である。彼は、いわゆるビッグバン元素合成理論 ($\alpha\beta\gamma$ 理論) を 1948 年に発表している。彼は高速炉の遮蔽材候補選びとして各元素の速中性子捕獲断面積を眺めている時、

各元素の存在度はその速中性子捕獲断面積にほぼ反比例しているのを見てとった。

この洞察から、Gamow はすべての元素は中性子の捕獲により合成されると推測した。捕獲断面積の大きい核種は核変換が早く進むため存在度が小さく、捕獲断面積の小さい核種はその反対に存在度が大きくなるのである。そして、この連鎖反応は宇宙初期での高温高圧の中性子ガスの膨張において、中性子が崩壊して生成された陽子に、残りの中性子が次々に捕獲されることで起こったと考えた。残念ながら、現在知られているビッグバン元素合成理論は、これとは異なる。しかし、高温高圧の状態からの膨張という基本的アイデアは現在でも生きている。また“各元素の合成量がその元素の速中性子捕獲断面積に反比例する”という洞察は、s-過程に当てはまる。

(4) 高速炉中の核分裂生成物生成・変換反応と s-過程

ここでは、自然界に存在する高速炉対応物としての s-過程を考察する。s-過程とは、恒星内の熱核融合反応の最終生成物である Fe 族元素が、 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反応や $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ で生成された中性子の捕獲と崩壊を繰り返して、質量数最大の安定核 Bi で終了する元素合成過程である。s-過程では U, Pu は生成されないため核分裂反応は起こらない (U, Pu は r-過程で生成される)。したがって、s-過程が高速炉に相当するといっても、核分裂後の核分裂生成物 (FP) の生成・変換過程のみが対象である。

この s-過程と高速炉には、すでに述べた中性子エネルギー以外にも類似した点がある。中性子エネルギーは高速炉で約 100 keV、s-過程で約 30 keV と近い値である。また、高速炉内で生成される FP はおよそ $^{23}\text{V} \sim ^{71}\text{Lu}$ であるが、s-過程で合成される元素はすでに述べた通り $^{26}\text{Fe} \sim ^{83}\text{Bi}$ と、これも類似している。しかしながら、両者の間で異なるのは中性子フルエンスである。高速炉では、中性子数密度は約 $2 \times 10^6 / \text{cm}^3$ で、燃焼期間は 1 年程度である。一方、s-過程では数密度は約 $2 \times 10^8 / \text{cm}^3$ で、反応期間は 1,000 年以上もある。したがって、本来のままでは、それぞれの反応後の核種分布は、残念ながら似たものとはならない。そこで高速炉の燃焼期間を十分長くとり、核種分布が平衡状態に達するまで 1 群近似計算をし、s-過程による合成元素分布と比較した。核データである中性子捕獲断面積がこの計算

において非常に重要となる。FPを炉から取り出さずに、ほぼ1万年の燃焼で平衡に達した。ただし臨界性は無視し、一定なフラックスと燃料供給を仮定した。結果を第4-12図に示す。

いずれの分布も1に規格化してあるが、質量数 $A > 80$ ではほぼ一致していることがわかる。いずれの分布でも中性子魔法数 $N=50, 82$ に強いピークが形成されており、また陽子魔法数 $Z=50$ においても微弱ながらピークが存在する。s-過程ではFe族元素を種核として元素合成が進むので、 $A < 60$ の元素の存在度が大きい。一方、高速炉内では核分裂により $A=90, 140$ を中心に常に核種供給がなされるため、 $N=82$ に相当するピークがs-過程によるピークよりも強くなっていることがわかる。またいずれの分布においても、偶質量数の核種の存在度が、隣接する奇質量数の核種のそれよりも大きい。これは、偶質量数核の中性子捕獲断面積が奇質量数核のそれよりも小さく、変換され難いからである。

以上から、s-過程が自然界での高速炉対応物であるというのは憚れるが、高速炉内のFP生成・変換反応とs-過程元素合成反応の間に類似性があるといっていよう。(井頭政之, 大崎敏郎)

III. 高エネルギー核反応 シミュレーション物理

高エネルギー核反応が関与する工学的問題、例えば、核破砕中性子源の設計計算などにおいて、核反応シミュレーションの方法が多く用いられている。

第4-12図 平衡時における高速炉内FP分布(赤丸)とs-過程合成元素分布(青丸)

いずれも1に規格化してある。矢印は中性子、または陽子魔法数を示す。

これは高エネルギー核反応の評価済核データファイルが存在しないということとともに、高エネルギー核反応が基本的にカスケード描像で記述できるという側面による。カスケードモデルの原理は、入射エネルギーが核子の束縛エネルギー(平均で約8MeV)より十分に大きい場合に、原子核を自由独立な核子の集団とし、核反応をそれら独立な核子同士の衝突の重ね合わせとして記述することである。したがって、カスケードモデルでは、入射エネルギーが十分に高く、観測量が原子核の束縛状態の情報を無視できる量であれば高い予測精度を示す。

もちろん、高エネルギー核反応の工学的利用では、カスケードモデルが得意としない観測量も要求される。例えば、遮蔽に重要な低エネルギー中性子の断面積や、放射線損傷に重要なPKAスペクトルを求めるためには、カスケード過程終了後の残留核の励起エネルギー、反跳エネルギーが重要となる。これらの量は、入射エネルギーがいくら高くても、核子の束縛エネルギーと同等の大きさである(それ以上のエネルギーは保持できない)。したがって、これらは純粋なカスケードモデルだけでは記述できない。どうしても原子核の束縛状態という情報が必要となってくる。

このような量を計算するために、NMTC⁸など輸送コードに含まれる核内カスケードモデルBertiniモデルやJAM⁹モデルでは、標的原子核の簡単な一体ポテンシャルを導入し、粒子の放出と束縛、残留核の励起エネルギーや反跳エネルギーを評価している。したがって、これらの量の予測精度は、高エネルギーの放出粒子スペクトルとは異なり、入射エネルギーが十分高くてもカスケードモデルの原理では保証されず、導入したポテンシャルによる。

ところで、より基礎的な核物理における高エネルギー核反応シミュレーションの役割を見てみよう。高エネルギー核反応、特に原子核-原子核衝突の重要な課題は、基底状態とは異なる核物質の状態、例えば、高温、高密度核物質を実験室で作り出すことにより、核物性、特に核物質の相、液体相から気体相、ハドロン相からクォークグルオン相などの相変化を明らかにすることである。有限系の衝突によ

⁸ K. Niita, S. Meigo, H. Takada, Y. Ikeda, JAERI-Data/Code 2001-007, (2001).

⁹ Y. Nara, N. Otuka, A. Ohnishi, K. Niita, S. Chiba, Phys. Rev., C61, 024901 (2000).

り作り出されるこのような状態は、終状態として安定ではなく、表面効果や終状態相互作用により中間状態で作られた核物質の情報はばかされてしまう。そこで、シミュレーションを使って、どんな終状態の観測量が中間状態の情報に敏感か、また、どのようなシグナルが相変化の確証となるかを予測する。

核物理におけるシミュレーションにおいては、原子核の束縛状態をどう扱うかがより重要となる。そこで核物理では、原子核を構成する核子が自由独立ではなく、それぞれに相互作用し合って原子核を形作るという描像を分子動力学的にモデル化したQMD(Quantum Molecular Dynamics)¹⁾が発展してきた。QMDでは、波束で表された核子同士が有効相互作用をしながら自己束縛系を形作る。このような原子核で核反応を起こさせると、核子はカスケードモデルと同様に他の核子と衝突を起こすと同時に、まわりの核子と相互作用しながら放出されたり束縛されたりする。カスケードモデルが、核子入射を前提として標的核の簡単なポテンシャルを仮定したのに対し、QMDでは、核子同士の有効相互作用から自己束縛系を記述するので、カスケードモデルでは不可能な原子核-原子核反応を記述することが可能となる。

これまで核反応シミュレーションは、工学分野と核物理分野で独立に発展してきた。核物理では、特殊な条件下での粒子生成、質量分布などのメカニズムに注目し、工学的利用では、物質内の輸送が関与しているため、中性子の生成断面積に焦点が当てられてきた。しかしながら、両分野の核反応シミュレーションは、基本的に同等のものである。それらは、2つの要素から構成される。すなわち、モンテカルロの手法で取り扱われる二体衝突項と、原子核の束縛状態を記述するポテンシャルである。このような観点から、最近両分野の連携協力が密になり、高エネルギー核反応シミュレーションの新しい展開が見られるようになってきた。

QMDは、主に原子核-原子核衝突を解析するために核物理において用いられてきたが、近年、工学的応用のため、核子入射反応から中性子の解析に積極的に用いられ、その妥当性が検証されてきた²⁾。また、JENDL高エネルギーファイルの計算モデルとしても用いられている。これまでは原子核-原子核衝突からの中性子断面積はあまり測定されていなかったが、放射線医学総合研究所で測定が始められ

ており、基礎的な核データとして重要である³⁾。測定データはQMDの結果との比較が行われており、第4-13図は、核子当たり400 MeVの¹²CがPbに入射したときの中性子生成断面積である。QMDの結果は、核子入射の場合ほどの精度は得られないが、実験値をよく再現している。前方などで見られる不一致は、このエネルギーでの「核子-核子、核子-パイオンなどの二体衝突」の素過程の断面積に大きな曖昧さはないので、二体の有効相互作用の問題といえる。

ここで、そのような有効相互作用の改良に伴って得られた新しい物理の話を紹介しよう。二体の有効相互作用は、一般的には核物質の状態方程式(例えば、核物質は飽和密度 $\rho_0=0.163\text{ fm}^{-3}$ でエネルギー極小値 -16 MeV をとる)を満たすように決められ

第4-13図 核子当たり400 MeVの¹²CがPbに入射したときの中性子生成二重微分断面積¹⁾

¹⁾ この相変化については、本講座第2回の第2-8図を参照のこと。

²⁾ J. Aichelin, *Phys. Rev.*, **202**, 233 (1991).

³⁾ K. Niita, *et al.*, *Phys. Rev.*, **C52**, 2620 (1995); M.B. Chadwick, *et al.*, *Phys. Rev.*, **C52**, 2800 (1995); S. Chiba, *et al.*, *Phys. Rev.*, **C53**, 1824 (1996); **C54**, 285 (1996); **C54**, 3302 (1996).

⁴⁾ Y. Iwata, *et al.*, Private communication.

第 4-14 図 無限系核物質シミュレーションによる温度ゼロの核物質の形状

左から飽和密度 ρ_0 , $0.50 \rho_0$, $0.10 \rho_0$ の密度の核物質。赤が陽子, 白が中性子を表す。(T. Kido, T. Maruyama, K. Niita, S. Chiba, *Nucl. Phys.*, A 663 & 664, 877c (2000).)

なければならない。現実的な有効相互作用を用いる際には、状態方程式の条件から解析的に有効相互作用のパラメータを決定することができなくなるので、無限系核物質のシミュレーションの方法が開発された。この無限系シミュレーションで、飽和密度以下の不安定領域の核物質がプレート状や、棒状の形状異性体を示すことが確認された(第 4-14 図)。このような形状は、中性子星の表面の構造で議論されていたことであり、核反応シミュレーションと中性子星というミクロとマクロをつなぐ、また、工学的応用と基礎科学をつなぐ好例であろう。

次に、二体の衝突項、その基本要素である素過程の断面積について見てみよう。数 GeV までの素過程の断面積であれば、実験値が十分揃っているが、数 10 GeV までにエネルギーを拡張しようとする、最も単純な陽子-陽子衝突においても終状態のチャンネル数は飛躍的に増大し、さらに核子の共鳴状態など短寿命の中間状態も、連続する衝突の時間スケールがそれらの寿命より短い時は、ひとつの粒子として取り扱わなくてはならないので、実験データの情報だけでは、すべての素過程の断面積を評価することができなくなる。したがって、計算モデルの助けが必要となってくる。例えば、JAM モデルでは、素過程の断面積を構築するにあたり、共鳴モデルとストリングモデル^mという 2 つのモデルを用いている。これらのモデルにより、JAM はいかなる組合せのパリオン-パリオン、パリオン-メソン、メソン-メソンの断面積も統一的に記述する。高エネルギー

核データ整備の観点からすれば、このような素過程の断面積の構築がひとつの重要な課題であろう。今後の検証、改良、ファイル化が必要と思われる。

一方、素過程の核物理的側面は、断面積の媒質効果である。シミュレーションの中で取り扱う二体衝突は、核内、すなわち核物質の中の衝突であり、当然、核内では核子や中間子の有効質量は自由空間のものからずれてくるので、断面積も自由空間のものとは異なるはずである。特に、原子核-原子核衝突では、高温、高密度の核物質が中間状態で出現し、その中での二体衝突の断面積は大きく影響される。このような素過程の媒質効果は、核物理では長い間多くの議論を呼んできたが、明確な結論を得るには至っていない。工学的な面からのアプローチ、すなわち中性子などの基本的な観測量に対する影響などの地道な議論も必要であろう。

以上のように、高エネルギー核反応シミュレーションは、工学的利用と核物理の異なる分野からのアプローチにより、互いに刺激し合い、核データの改善と、核物理の基礎的な理解の深まりを伴いな

^m 共鳴モデルとは、実験的にも観測されている個性のはっきりした核子の共鳴状態の断面積とそれらの崩壊チャンネルで全体の断面積を記述するもので、ストリングモデルは、共鳴状態より高いエネルギーで、連続的な中間状態(ストリング)を介して、それらの統計的な崩壊で得られる終状態の断面積を評価するものである。

がら進展している”。

(仁井田浩二)

IV. ND2001:「科学と技術のための 核データ国際会議」

1. 新たな世紀の核データ像を求めて

日本では軽水炉, 高速増殖炉, 核融合炉の研究開発を初めとして, 核廃棄物処理・処分や原子炉解体, 加速器による超長寿命核種の核種変換, 医療利用など, 原子力利用のための多様な研究が行われており, そこでの核データの位置付けには確固たるものがある。また, 最近ではエネルギー利用にとどまらず, 中性子科学による先端的研究開発や, 元素合成にかかわる天体物理応用や, 宇宙工学への応用, 不安定核ビームの利用も開始され大きな関心を集めている。これらはいずれも, 従来の 20 MeV までの中性子を中心とした安定核種に対する核データの範疇を超え, 不安定核種を含めて, 中性子のみならず荷電粒子に対する GeV までといったきわめて高いエネルギーの核データが関与している。

コスト, 効率および安全性が重視される時代にあつて, 原子力開発における新たなプロジェクト実現のためには, 精度のよい核データが不可欠である。また, このような膨大な核データを効率よく求めるには国際協力は欠かせない。このため IAEA や NEA を中心とした国際的な協力活動が古くから進められてきており, 3 年ごとに開催される核データ国際会議は, データ利用者とデータの作成者である測定, 評価のコミュニティとの円滑かつ効率的な橋渡しをするとともに, 国際協力の推進に大きく貢献してきた実績がある。

新たな 1000 年期を迎えて, 理工学への応用にかかわる核データについて, 20 世紀の歩みを総括するとともに, 今後の研究動向と重点領域について世界各国の専門家の議論を深め, 新世紀での研究の方向性を求め, 核データを軸として研究をさらに促進し,

日本のみならず世界の原子力利用技術の発展に貢献することを目的として, 標記国際会議の 2001 年開催が決定された。

2. 開催の経緯

本会議は, 1966 年の Washington 会議(他の国際会議と違い第何回の表現はとらず, 開催地と開催年で区別する, また会議名称は常に同じ)を嚆矢とするが, これまで OECD/NEA の支援の下に, 日, 米, 欧で 3 年ごとに各極持回りで開催されてきた経緯がある。これまで米国で 7 回, 西欧で 6 回開かれていた。日本での開催は 1988 年の水戸会議 1 回のみである。最近の JENDL-3.3 の開発や JENDL 高エネルギーファイルに代表される特殊目的ファイルの開発は, 世界の核データコミュニティの注目的となっている。このような経緯から, 2001 年での日本開催が決定された。

3. 会議概要および準備

会議名称は, 「科学と技術のための核データ国際会議」: International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (ND2001) である。また副題として, “**Embracing the Future at the Beginning of 21st Century**” を選んでいる。21 世紀の本当の初めにあたって, 核データの未来を体感しようという気持ちを表している。開催期間は, 2001 年 10 月 7 日(日)~12 日(金), 場所は, 茨城県つくば市「エポカルつくば」国際会議場である^o。

主催は, 日本原子力研究所とし, 本国際会議を原子力開発に関心のあるすべての人々に周知させるため, 国内はもちろんのこと, 西欧先進国を中心とした OECD/NEA ならびにその他の地域を包含する IAEA を通じて国際的に幅広く呼びかけるべく, 経済協力開発機構原子力機関原子力科学委員会 (OECD/NEA NSC), ならびに日本原子力学会 (AESJ) との共催とした。

会議内容は, 第 4-2 表に示すトピックス分類とした。2000 年 9 月~2001 年 1 月中旬まで論文募集を行い, 600 件を超える応募があった。2001 年 3 月上旬のプログラム部会で, 講演の採択, 拒否の決定, 口頭発表者の選択, プログラムの大枠の作成が行われた。それに先立ち, Abstract Review 作業が NEA の Web サイト上で 1 月 30 日~3 月 5 日まで行われた。応募総数 602 件で 1 件 3 人(本人以外かつ外国人含

^a ここで述べた JAM モデルや QMD (AMD) のシミュレーションは, 以下の URL のホームページで, 核反応の動画として見られ, 高エネルギー核反応の様子を実際に目で見て身近なものにできる。JAM のシミュレーションでは, 反応系やエネルギーのリクエストも可能。JAM: < <http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~ohtsuka/jam/> >, AMD < <http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~ono/anim.html> >

^o < <http://www.ndc.tokai.jaeri.go.jp/nd2001/> >

第4-2表 ND2001会議トピックス(分野と発表予定件数)

	IO ^{a)}	O ^{a)}	P ^{a)}	T ^{a)}
1. 核反応データの評価と評価済ライブラリー				
1.1 評価済ライブラリー	2	2	13	17
1.2 評 価	1	15	30	46
1.3 測 定	3	19	75	97
2. 核構造	4	7	21	32
3. 天体物理学および核物理の最前線における核データ				
3.1 天体物理	5	5	11	21
3.2 核物理最前線	3	1	6	10
4. 実験施設と測定	7	9	23	39
5. データ評価のための基礎核理論	7	15	42	64
6. 評価済核データの処理およびテストと検証	3	14	50	67
7. 核分裂炉応用	4	3	15	22
8. 核融合炉応用	2	2	9	13
9. 加速器応用(加速器駆動システムを含む)	4	7	21	32
10. 医療, 環境, 工業, 宇宙工学およびその他応用				
10.1 医 療	1	6	25	32
10.2 その他	2	6	20	28
11. 標準断面積とドシメトリー	2	2	3	7
12. 安全性と核データ	2	2	3	7
13. データの利用普及と国際協力	3	3	5	11
合 計	55	118	372	545

a) IO: Invited Oral, O: Oral, P: Poster, T: Total number

む)がレビューした。総レビュー件数:1,806件, レビューを行った人:総数105人で, 国際プログラム委員会(IPC), 国内プログラム委員会(LPC)および国際諮問委員会(IAC)が担当した。結果は, Key-note talks 4件, Invited talks 54件, Contributed papers 490件, 口頭発表 118件, ポスター発表 372件で, Rejectが40件, Mergeが50件と決まった。第4-2表には発表形態別の論文件数も示しているが, 核反応データ評価, 測定関連, 核理論, 核データの積分的検証がほぼ拮抗しており, 新たな分野を指向するものとして, 天体物理や核物理先端応用, 医療, 宇宙工学応用が伸びていることがおわかりいただけよう。

現在, アブストラクト集の編集が行われている。アブストラクトの審査の結果により, 会議での講演およびプロシーディングスに掲載する論文作成を依頼している。論文は, 日本原子力学会の学会誌増刊号としての査読規程に基づく査読を経てプロシーディングスに掲載することとしている。アブストラクトはアブストラクト集として, 会議当日参加者に配布する。また, プロシーディングスは, 会議終了後, 参加者に無償配布する。

4. 会議へ向けて

主催者にとって, いつも頭痛の種となるのが, 次

の主催者であるが, 2004年に米国サンタフェ(ニューメキシコ州)が候補に挙がり, ロスアラモス国立研究所の主催が6月にパリで開催されたNEA/NSC会合で決定をみた。今般予定されている参加者は500名にも達しようとしている。外国からの参加が, 日本人の参加を超えるかもしれない。本当の国際会議である。予定されている発表件数も, 前回のフィーバーともいえる, トリエステ会議を凌駕しており, 極めて喜ばしいことである。「エネルギー開発のための核データ」の位置付けは今後も少しも揺ぐことはないと思うが, その応用範囲は, 今回の連載でもおわかりのように大きな広がりを見せている。人類の今後の生存に不可欠なエネルギー応用から, 人類の来し方行く末に思いをはせる天体応用をはじめとする最先端応用まで, そのショウケースがこの国際会議である。21世紀のはじめにあたり, 今後の千年を見渡し, 加速器, 宇宙といった最先端の分野で, 基礎的な核データがまた新たな意味を持って登場してくるという状況が作り出されている。新たな応用には, 新たなデータが不可欠である。核データの今後の発展が楽しみである。読者の積極的な参加をお願いする。

(長谷川 明)

V. おわりに

われわれは, この4回にわたる連載を, 核データ

とは何かを振り返ることからはじめた。それは、工学、理学、医学をはじめとするさまざまな分野で必要とされる、原子核の反応、壊変および構造に関わるデータの総称である。核データの種類はさまざまであり、また問題とするエネルギーによっても、基礎となる物理、測定とその他の技術、データの評価と提供の方法が異なってくる。核データと一口にいっても、その内容は極めて広くまた多様なものであることがご理解いただけたら幸いである。

エネルギー領域も含め、このように多様な核データの種類を横糸に喩えるなら、連載を通じて見てきた、核分裂炉、核融合炉、加速器駆動炉、医療、放射線防護、宇宙工学から天体における元素合成まで、多様な応用分野は縦糸である。かつて、横糸と縦糸は高々10 MeVまでの中性子反応と原子炉工学という限定された領域をカバーするにすぎなかった。しかし、21世紀に一步踏み込んだいま、織物は厚みと広がりを増し、ハドロンを中心として、100 GeVまでに達するエネルギー領域を問題とし、理学・工学にまたがる広い応用分野を擁するに至っている。

原子力開発の初期、核データは、バーンブックと呼ばれる本(BNL 325に代表される)にまとめられ、あるいは磁気テープに数値データとして収納されて、比較的長い期間にわたって同じものが使われ続けた。また、データ提供者と利用者の直接の交渉は

必ずしも重要ではなかった。しかし、さまざまな応用分野の進歩・発展がめざましい現在にあって、データ提供者と利用者との直接の交渉、さらには両者の共同作業が必須のものとなりつつある。

今回触れたQMDなどの核反応シミュレーションを例に取るならば、核物理と核工学は互いに浸透しあい、両者の境界を云々することがあまり意味をなさなくなってきている。これからは、核データコミュニティもデータの一方的な提供者にとどまることなく、分野間の相互浸透を意識的に行い、相互に刺激しあいながら、核科学の新しい地平を切り開いて行かねばならない。

連載講座「核データ」を終わるにあたり、誌面の制約などで、その基本である評価手法や積分テストについての詳細を述べるができなかった。これらは核データ構築の根幹を成していることを付け加えておく。本講座を契機として、多くの方々、特に若い読者が核データに興味を持っていただけたら望外の喜びである。その未来は21世紀を担う若者の活躍によって築かれるであろう。(吉田 正)

記事訂正

前号(Vol. 43, No. 7)掲載の連載講座第3回記事中心p. 665右段10行目の*1を削除

著者紹介

吉田 正(Tadashi YOSHIDA)

武蔵工業大学工学部
教育研究センター
物理部門 教授・理博

井頭政之(Masayuki IGASHIRA)

東京工業大学
原子炉工学研究所
助教授・工博

大崎敏郎(Toshiro OHSAKI)

東京工業大学
原子炉工学研究所
助手・理博

辻 政俊(Masatoshi TSUJI)

東洋エンジニアリング(株)
国内事業本部テクニカル
エキスパート・工博

大石晃嗣(Koji OISHI)

清水建設(株)技術研究所
原子力グループ
原子力土木チーム
主任研究員・工博

千葉 敏(Satoshi CHIBA)

日本原子力研究所
先端基礎研究センター
主任研究員・工博

仁井田浩二(Koji NIITA)

(株)高度情報科学技術研究
機構
開発事業部研究センター長
・理博

長谷川 明(Akira HASEGAWA)

日本原子力研究所
エネルギーシステム研究部
核データセンター室長
・工博