

# 多目的中性子利用に対する中性子標準開発と 中性子計測技術に関する調査研究

松本 哲郎\*

(平成19年4月6日受理)

## A survey on development of neutron standards and neutron measurement technique corresponding to various fields

Tetsuro Matsumoto

### Abstract

Various uses of neutrons are being watched in many fields such as industry, medical technology and radiation protection. Especially, high energy neutrons above 15 MeV are important in a radiation exposure issue of an aircraft and a soft error issue of a semiconductor. Therefore neutron fluence standards for the high energy region are very important. However, the standards are not almost provided all over the world. Three reasons are mainly considered: (1) poor measurement techniques for the high energy neutrons, (2) a small number of high energy neutron facilities and (3) lack of nuclear data for high energy particle reactions. In this paper, the present status of the measurement techniques, the facilities and the nuclear data is investigated and discussed. In NMIJ/AIST, the 19.0-MeV neutron fluence standard will be established by 2010, and development of high energy neutron standards above 20 MeV is also examined. An outline of the development of the high energy neutron standards is also shown in this paper.

### 1. はじめに

中性子はどこに存在するのだろうか？中性子によって我々は生活の中でどのような恩恵を受けているのだろうか？本調査研究では一度原点に立ち返り、これらの問いに対して向かい合い、中性子標準の未来像について考えてみる。

中性子は、「人工的に作られた中性子」と「自然界に存在する中性子」の2種類に分けることができる。「人工的に作られた中性子」は、主に原子力産業で利用されており、原子力発電所における核分裂反応の維持・制御に使われている。また、近い将来のエネルギー源として期待される核融合炉や、原子炉から排出されるマイナーアクチノイドや核分裂生成物の長寿命放射性廃棄物の処理処分のひとつである核変換処理で中性子は重要な役割を果たす<sup>1),2)</sup>。更には、医療、テロ対策等の安全保障、分析など中性子の利用分野は広がっている。

人工的な中性子の発生方法は主に3種類ある。1つ目は、

原子炉においてウランやプルトニウムといった核燃料を用いた核分裂反応によって生成する方法である。十分なフラックスの中性子が得られるという特徴がある。2つ目は、加速器を用いて加速されたイオンビームとの核反応によって中性子を生成する方法である。この方法は、適当な核反応とイオンの加速エネルギーを選択することによって必要なエネルギーの中性子が得られるという特徴がある。3つ目は、放射性同位元素を利用した中性子源であり、安定したエネルギー分布の中性子を簡単に得られるという特徴がある。よく使われるものとして<sup>241</sup>Am-Beや<sup>252</sup>Cf線源がある。

「自然界に存在する中性子」としては、主に宇宙線に起因して発生するものが挙げられ、地上ではほとんど観測されないが、航空機高度では高線量が観測される。

一方で、中性子は放射線の一種であるため、中性子に多く曝されると人体に様々な悪影響を及ぼす。したがって、中性子量の正確な管理や中性子に対する防護は中性子利用施設周辺の住民、中性子利用に従事する人、及び航空機乗務員のリスク管理のために必要となる。その他にも、中性子はパソコンなど多くの機器に搭載されてい

\* 計測標準研究部門 量子放射科

る半導体デバイスに悪影響を及ぼすこともわかっている。

産業、医療等における中性子利用や中性子によるあらゆる影響の評価のために中性子量やそのエネルギーを正確に知ることが重要であり、多くの検出器、線量計や中性子線源が開発・利用されている。そこで、中性子標準は検出器や線量計の感度校正、中性子線源の放出率校正のために必要とされている。中性子はエネルギー毎に物質との原子核反応の性質が異なるという物理的特徴があるので、広いエネルギー範囲に対応した中性子標準が求められている。

産業技術総合研究所（以下、産総研）では1次標準機関として、広範囲のエネルギー領域に対応するため熱中性子から14.8 MeVまでのエネルギー領域で中性子フルエンス率と中性子フルエンス標準を維持、供給している<sup>3)</sup>。<sup>241</sup>Am-Beと<sup>252</sup>Cfの放射性同位元素中性子源の中性子放出率標準の供給も行っている<sup>3)</sup>。産総研では、これまでに上記の標準量について多くの国際基幹比較に参加し、良い成果<sup>4)</sup>を収めてきた。2006年10月には表1に示す9量目の中性子標準について校正・測定能力（Calibration and Measurement Capabilities: CMCs）リストが国際相互承認され、国際度量衡委員会に登録された<sup>5)</sup>。さらに、新しい中性子利用と中性子による影響が注目される多くの分野では、新たな中性子標準の構築とその普及が期待されている。

本報告では、近年注目されている中性子の利用と影響について2章で述べ、その中で特に中性子エネルギーが15 MeV以上の高エネルギー中性子領域の中性子の計測及び標準の現状を3章で述べる。4章では国内外の高エネルギー中性子施設、5章で産総研における高エネルギー中性子標準の開発予定を述べ、6章で本調査研究をまとめる。

表1 産総研で現在供給している中性子標準と校正・測定能力

物理量	参照標準器	不確かさ(%) (包含係数 k=2)
熱中性子フルエンス率	Am-Be中性子線源	2.8
速中性子フルエンス		
144及び565 keV	反跳陽子比例計数管	4.4
5.0 MeV	Thick Radiator検出器	6.2
14.8MeV	随伴粒子計測装置	3.2
Am-Be	Am-Be中性子線源	2.8
Cf	Am-Be中性子線源	3.6
中性子放出率		
Am-Be	Am-Be中性子線源	3.0
Cf	Am-Be中性子線源	3.2

## 2. 近年注目されている中性子の利用と影響

### 2.1 宇宙線起因の中性子

宇宙空間には、太陽からの高エネルギー陽子、地球磁場捕捉放射線帯粒子や銀河宇宙線などの高エネルギー粒子（～10 GeV）が存在する。その中で、一部の荷電粒子は地球磁場で跳ね返されずに地球の大気圏に突入し、大気の構成要素である窒素、酸素、アルゴン原子核と図1に示すような多段階の反応（カスケード反応）を起こし、中性子、陽子、電子、ミュオン粒子の2次粒子を生成し、一部は地上に到達する。地表における宇宙線起因の放射線量は世界平均で年間0.4mSv<sup>6),7)</sup>であり、航空機の飛行高度で放射線量はより多いと考えられる。中性子に注目してみると、宇宙線に起因する全放射線量の約半分が中性子である。大気中で生成する中性子スペクトルの例を図2に示す<sup>6)</sup>。図2が示すように、中性子スペクトルは1 MeV近傍のピークから熱中性子の低エネルギー成分と100 MeV付近にピークを持つ高エネルギー成分から構成されている。特に高エネルギー成分は、前平衡過程や多重フラグメンテーション過程などに起因するものであり、全体の20%を占める。このような宇宙線起因の中性子は航空機乗務員の被ばくや半導体素子の誤動作など我々の生活スタイルの変化に伴ってより身近な問題になりつつある。

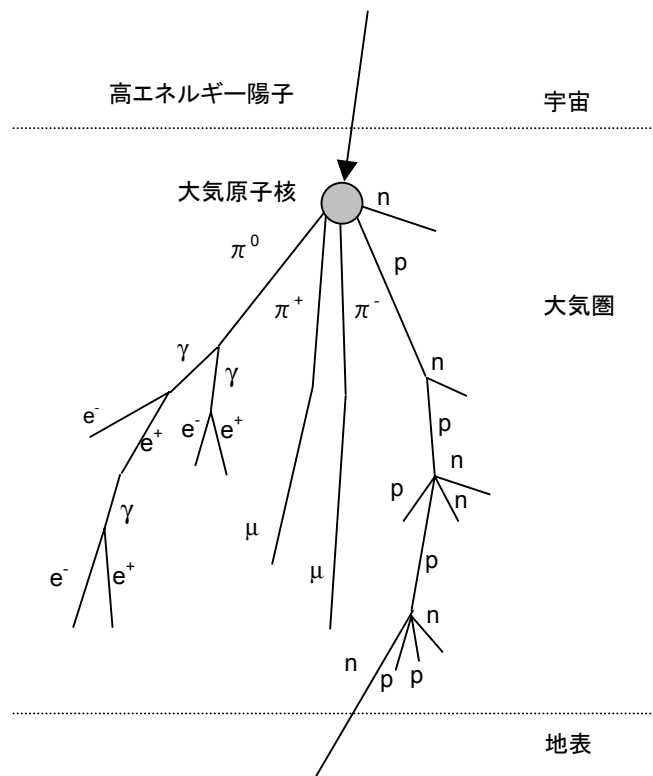


図1 宇宙からの高エネルギー陽子によるカスケード反応のイメージ図

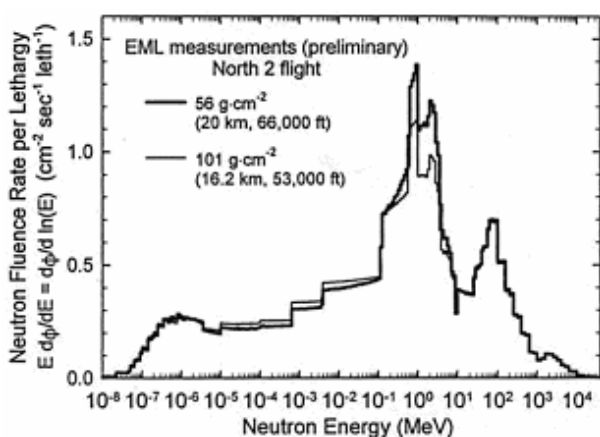


図2 宇宙線起因の中性子スペクトルの例<sup>6)</sup>

### 2.1.1 航空機乗務員の被ばく問題

私たちは、飛行機で海外旅行をする時、機内では地上にいる時よりも多くの放射線に曝されている。たとえば、東京-ニューヨーク間を飛行機で往復した場合には約0.2 mSvの被ばくをすることが知られており、この量は地上で1年間生活した際の被ばく線量の約10分の1に相当する。航空機乗務員（運行乗務員や客室乗務員など）の場合、運航路線の高度、緯度、飛行時間に依存するが5 mSv/年以上の被ばくの可能性がある<sup>8),9)</sup>。これは、放射線障害防止法で定められている放射線業務従事者の被ばく限度（50 mSv/年かつ100 mSv/5年）に比べてかなり小さいが、一般人に比べれば大きな量であると言える。航空機乗務員数は海外路線を持つ日本航空と全日空を合わせて約15000人であるが、客室乗務員には女性が大変多いという特徴がある。女性の場合、妊娠した際の放射線被ばくには大きな注意を払う必要がある。

そこで、国際放射線防護委員会（ICRP）では、1990年に「ジェット機の運航に起因する自然放射線による被ばくを職業被ばくの一部として含める必要があるべきである」<sup>10),11)</sup>と勧告した。この勧告に対して日本では2004年文部科学省技術・学術政策局放射線規制検討会「航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討ワーキンググループ」が設けられ、2005年11月に報告書<sup>6)</sup>が発表された。検討結果として(1)5 mSv/年を管理目標値として、事業者（航空会社）が自主的にかつ適切に航空機乗務員の被ばくへの対応が実施されること、(2)個人線量計など個々のモニタリングの必要はないが、被ばく線量評価は測定・計算によって正確に行うこと、等が決められた。

ヨーロッパ連合（EU）では、1996年5月に発した欧州放射線防護指令（Council Directive 96/29/EURATOM (1996)）<sup>12)</sup>の中で、年間被ばく線量が1 mSvを超える航空機

乗務員の宇宙線被ばく線量の管理に関する国内法等の整備を2000年5月までにするように加盟各国に対して求めた。PTB(ドイツ)では、これを受けて航空機被ばくに対応した中性子標準の整備を進めている。米国では、原子力規制委員会において宇宙線は対象外とされ規制はされていないが、1990年に連邦航空局から運行中の宇宙線と放射性物質輸送物に関する情報、放射線被ばくに関するガイドライン、宇宙線による職業被ばくのリスクなどを内容とする航空機乗務員の放射線被ばくに関する助言が発行されている。1994年には環境保護庁より運行中の宇宙線被ばくに関する航空機乗務員の教育訓練について助言が発行されている。豪州では、豪州全国労働安全衛生委員会より毎回の個人被ばく線量の測定の必要はないとされており、豪州放射線防護原子力安全庁は、事業者への指針を作成している。タイ、インドネシア、マレーシアなど、航空機被ばくに関してまったく対応していない国々もある。

航空機高度における中性子線量測定は、国内において日本原子力研究開発機構（原子力機構）、放射線医学総合研究所（放医研）等がチャータ機などを利用して研究を続けており、線量計や検出器を開発するなど大きな成果（例えば<sup>13)</sup>）を挙げている。2006年には、航空機高度における線量を計算するための航路線量計算システム（JISCARD）<sup>14)</sup>が放医研より発表されている。これにより航路が分かれば事前に被ばく線量の推定値を知ることができるようになった。国外においては、欧州、アメリカ、カナダのグループが計測器や計算コードの開発を行っている。

### 2.1.2 半導体シングルイベント現象

半導体メモリデバイスは、私たちが日常使用しているパソコンや多くの機器に加え、航空機内のコンピュータや宇宙における人工衛星などに組み込まれている。この半導体メモリデバイスは中性子や高エネルギー粒子によって確率的に誤動作を起こすことが分かっており、近年の高集積、微細化に伴い、地上においても故障や誤動作が半導体業界を中心に懸念されるようになってきた<sup>15),16)</sup>。半導体メモリデバイスの誤動作は、地上においてはあらゆる混乱が想像され、航空機の場合には人命に関わる問題となる。また、人工衛星など宇宙で使用される機器は、情報通信、地球観測や気象予測など生活に必要不可欠なものばかりである。従って、ナノスケールの半導体デバイス利用への大きな障害となりうる現象である誤動作はソフトエラーとも言われ、中性子が入射粒子の場合はメモリデバイス（シリコン）との核反応で発生した2次イ

オンによって電気的パルスが発生し、メモリ情報(0と1)が反転するシングルイベントアップセットが主であるとされる。

現在、ソフトウェアについては、宇宙物理、放射線物理、原子核物理、核データの方面からの研究<sup>15)-17)</sup>や半導体デバイスの耐放射線性能に関する研究開発が行われている。一方で、半導体メーカーは新開発半導体デバイスのソフトウェア発生率の検証のため放射線照射試験を行っている。中性子に関しては、米国ロスアラモス国立研究所(LANL)の高エネルギー白色中性子源(WNR)施設内のIrradiation Chips and Electronics (ICE) House<sup>18)</sup>というビームラインが良く使われる。白色中性子源とは、高いエネルギーから熱中性子領域まで連続的なエネルギー分布を持つものであり、様々な波長の中性子が発生されることから「白色」と表現される。LANLのビームラインでは、宇宙線起因の中性子スペクトルに類似した環境で照射試験ができるため、日本からも日立製作所生産技術研究所や日本電気などが実験を行っている<sup>19)</sup>。ここでは、中性子は線形加速器からの800MeV陽子ビームとタングステンターゲットによる核破砕反応によって発生される。日本でも、大阪大学核物理研究センター(RCNP)において2004年から白色中性子源の利用を始めており、半導体ソフトウェアのための中性子試験照射を行うことができる<sup>20)</sup>。

## 2.2 大型加速器施設周辺の中性子線量管理

日本では、戦前から量子ビーム研究開発や利用に力を入れてきて、戦後も1950年代から大規模なサイクロトロン、電子シンクロトロン、電子線形加速器など多くの大型加速器が各地に建設された。さらに、1980年代になると世界的にも最先端の超大型加速器が現原子力機構高崎量子応用研究所、放医研や高エネルギー加速器研究機構(KEK)などに次々と建設され、医療、工業、農業などの分野で利用されるようになった。現在、世界的に加速器の大型化とビームの高強度化が益々進み、日本でも茨城県に原子力機構とKEKが共同で大強度陽子加速器(J-PARC)<sup>21)</sup>と大規模中性子実験施設等の建設を行っている。J-PARCは、図3<sup>22)</sup>に示すように600 MeV線形加速器、3 GeVシンクロトロンと50 GeVシンクロトロンの3つの加速器で構成されており、最終的に光速の99.98%の速さまで陽子を加速することができる。また、この加速器は1パルス当たり世界最高のビーム強度を持つという特徴がある。中性子は、加速陽子ビームと液体水銀との核破砕反応によって生成される。J-PARCは2007年度に完成し、2008年から利用可能になる予定である。この加速器の完



図3 建設中の大強度陽子加速器(J-PARC)完成予想図<sup>22)</sup>

成によって、新しい中性子利用の研究開発、素粒子・原子核物理学、生物学などの分野が進展すると期待されている。

このような大型加速器からは粒子の加速に伴って装置周辺で高エネルギーの2次中性子が発生する。そして、2次中性子は制動放射線と共に施設の構造物(コンクリートなど)を放射化する。したがって、大型加速器施設において中性子の管理が必要であると言われており、これは中性子漏洩に対するリスク管理にもなる。発生中性子エネルギー分布は、加速器の種類や電子の加速エネルギーに依存するため、ひとつに決められないが、従事者及び施設周辺において15 MeV以上の高エネルギー領域も含めた広い領域における中性子線量管理が必要になる。

## 2.3 医療への中性子利用

中性子を利用した医療には、いくつかの種類があるが、現在国内で行われているのは、ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)<sup>23),24)</sup>というものである。脳腫瘍や悪性黒色腫(メラノーマ)などのがん治療に適用されるものであり、臨床研究の段階にある。近年は肝臓がんなど内臓のがん治療にも適用されている。BNCTの原理を図4に示す。この治療法では、ホウ素が腫瘍細胞に集中的に取り込まれ

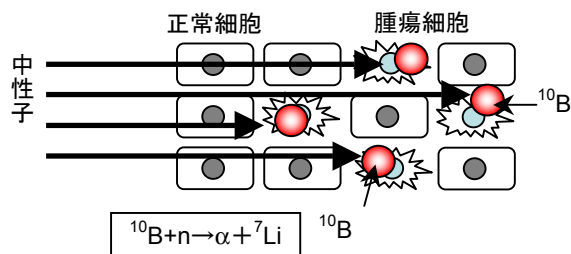


図4 ホウ素捕捉療法のイメージ図。腫瘍細胞は、ホウ素と中性子の反応によって発生する  $\alpha$  と  ${}^7\text{Li}$  によって選択的に破壊される。

るように開発された製剤を用いる。腫瘍細胞にホウ素を運び込んだ後、中性子を照射することによって $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応で発生する $\alpha$ 粒子と $^7\text{Li}$ が腫瘍細胞を死滅させる。この際、 $\alpha$ 粒子の飛程は約 $10\ \mu\text{m}$ 、 $^7\text{Li}$ の飛程が約 $5\ \mu\text{m}$ と短いので、隣接する正常細胞をあまり傷つけず、腫瘍細胞を選択的に破壊することができる。BNCTは国内では原子力機構のJRR4原子炉<sup>25)</sup>と京都大学原子炉実験所KUR原子炉<sup>26)</sup>(2006年から2008年まで原子炉改造のため休止)を利用して、筑波大学医学部、大阪医科大学などで行われている。これまでに、BNCTは国内で250以上の症例があり、多くの治療・研究成果をあげている。最近では医療施設の近くで治療が受けられるように小型加速器を利用した中性子源によるBNCTの研究<sup>27)</sup>や実際の加速器建設の計画も行われている。今後国内の高齢化が進み、がん患者が増加すると予想される中、ますます注目される治療法になるとと思われる。

BNCTにおける中性子計測及び線量の評価には通常金の放射化法を用いるが、積分値でしか線量評価ができないため、最近では光ファイバーと小型中性子プローブを組み合わせた能動検出器による中性子線量モニタも開発されている<sup>28),29)</sup>。また、BNCTで利用される中性子は当初熱中性子であったが、近年はより深層部のがん治療を行うためにeV領域の熱外中性子を利用するようになった。この治療では、照射中性子量のコントロールが結果に大きな影響を及ぼすので、熱外中性子領域のフルエンス精密測定が重要になる。

## 2.4 安全保障のための中性子利用

2001年の9・11同時多発テロ事件以来、安全保障問題への中性子利用研究が盛んになっている。たとえば、アフガニスタンなど戦闘地域にばら撒かれた地雷によって戦後多くの現地住民が被害にあっている。日本では名古屋大学と京都大学が中心となって人道支援目的で、中性子を利用した地雷除去の研究が行われている<sup>30),31)</sup>。原理は、可搬型DD核融合反応中性子源からの2.5 MeV中性子を照射して、地中で熱化した中性子と爆弾の構成物質である窒素との反応で発生する10.8 MeVガンマ線を観測することにより、地雷の位置を特定し、処理するというものである。また、アメリカでは高速道路でテロ組織によるプラスチック爆弾などの自動車を用いた運搬を見つけるためや、飛行場で飛行機への爆弾の持込を防ぐために、中性子源を実際に利用し始めている。

## 2.5 社会から要求される中性子標準

2.1節～2.4節で述べたように様々なエネルギーの中性

子が実は身近にあり、かつ利用されている。そして、それらの中性子が安全に利用され、精密に計測されるためには中性子標準が必要である。特に航空機乗務員被ばくの問題や半導体デバイスの問題、BNCTでは、熱中性子からGeV領域までの広領域の中性子標準が必要であり、特に未整備の領域である15 MeV以上の高エネルギー領域と熱外中性子領域の標準供給の要望も産総研に届いている。本調査研究では、特に高エネルギー中性子の計測と標準に焦点を絞り、現状と技術的課題を明らかにする。熱外中性子に関しても技術的に中性子スペクトル測定、フルエンス測定は容易ではなく興味深い課題であるが、本調査の対象外とし、今後の課題とする。

## 3. 高エネルギー中性子の計測と国内外の標準の現状

### 3.1 高エネルギー中性子標準

15MeV以上のエネルギー領域では、19.0 MeVのみがISO8529-1 (Reference neutron radiations Part 1: Characteristics and methods of production)で基準エネルギー点として決められており、それ以上のエネルギーではまだ規格がない。実際に標準を確立しているのはPTBのみであり、19.0, 33.7, 46.0, 60.6 MeVの単色中性子フルエンス率でCMC登録されており、60-200 MeV領域についても開発中である。19.0 MeVに限定すれば、NPL (イギリス)はフルエンス率の供給を開始しており、IRSN (フランス)は2005年に場を完成している。産総研も物理標準整備計画に基づき2010年にフルエンス標準の供給を開始するために開発を行っている(5章で詳細を記述)。

中性子標準を持っている国は世界で13カ国あるのに対し、高エネルギー中性子標準は必要とされているにも関わらず、世界的に未確立の領域であることを示している。この大きな原因としては、(1)高エネルギー中性子計測技術が発展途上であること、(2)高エネルギー中性子に関する核データが質・量ともに乏しいこと、(3)高エネルギー中性子施設の建設にはコストがかかること、があげられる。これらの課題を詳しく検討することが、今後の高エネルギー中性子標準確立に向けた一歩となる。

### 3.2 高エネルギー中性子計測

#### 3.2.1 中性子源

19 MeV中性子の発生は、静電加速器からの重水素ビームを用いた $\text{T}(d,n)^4\text{He}$ 反応中性子源を用いる。ターゲットは、金属に蒸着したチタンにトリチウムを吸蔵したものをを用いる。このとき、19 MeV単色中性子の他に、ターゲット構成要素やターゲットに打ち込まれた重水素と重水

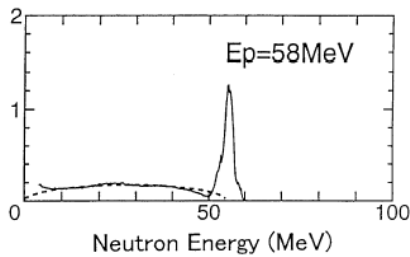


図5 高エネルギー中性子(20 MeV~)スペクトルの例。図は原子力機構TIARAで測定されたスペクトルである<sup>33)</sup>。スペクトルは、高エネルギーの単色成分と低エネルギー側の連続成分に分けられる。

素ビームの反応によって低エネルギーの中性子が発生するという特徴がある。通常はパルスビームを用いた中性子飛行時間法(3.2.3で詳細説明)を用いることによってこれらの中性子と19 MeV中性子を弁別できる。

20 MeV以上では、中性子の生成はサイクロトロンなど大型加速器を用いて行われる。多くの施設では、加速器からの陽子ビームを利用した ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応中性子源を用いている。ターゲットとしては、通常金属Liが用いられる。ビームはパルスで与えられることが主流であり、ビーム電流は最大でも10  $\mu\text{A}$ である。発生中性子スペクトルは、図5に示すように ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応による単色中性子成分とbreakup過程による連続成分で構成されている。そのため、20 MeV以上の中性子については「準単色中性子」と表現されることが多い。連続成分は、通過してきたコリメータなどの散乱成分の他 ${}^7\text{Li}(p,n){}^3\text{He}$  ${}^4\text{He}$ 反応による三体問題で説明できることが分かっている。高エネルギー中性子の場合、目的のエネルギー領域以外に発生する中性子に関する情報を詳細に把握し、校正の際の補正方法を確立する必要がある。

近年では、 ${}^9\text{Be}(p,n)$ 反応を用いた準単色中性子源が特に放射化実験のために開発されている。その他、核破砕反応による白色中性子源がある。

### 3.2.2 フルエンス測定

高エネルギー中性子のフルエンス測定には、主には水素原子核を含有したポリエチレンラジエータを利用した反跳陽子カウンターテレスコープ<sup>(32),(33)</sup>と誘導核分裂を利用したフィッションチェンバー<sup>(34)</sup>が使用されている。

反跳陽子カウンターテレスコープの典型的なタイプを図6(a)に示す。カウンターテレスコープは、中性子と水素との弾性散乱反応によって生成される反跳陽子を後方に設置したガス比例計数管、シンチレーション検出器や半導体検出器などで測定するものである。この測定では、

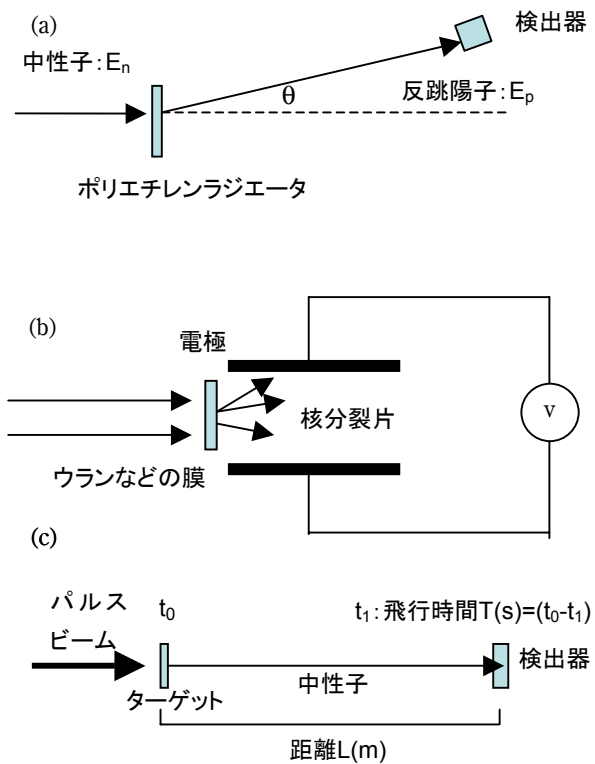


図6 (a)反跳陽子カウンターテレスコープ、(b)核分裂計数管、(c)中性子飛行時間法のイメージ図

結果を大きく左右する中性子と水素との弾性散乱反応断面積が精度良く得られるというメリットがある。しかし、中性子が高エネルギーになると検出器の構造材との間で、非弾性散乱、 $(n,\alpha)$ 、 $(n,p)$ など様々な複雑な反応が起き、生成される2次中性子や2次荷電粒子が測定の際に大きなバックグラウンドとなる。そのために不必要な中性子の遮蔽や信号処理段階での弁別手法の開発などが大きな課題となる。また、後方の検出器に半導体検出器を用いる場合には、中性子による放射線損傷を低減する対策を取る必要もある。

フィッションチェンバーの概略図を図6(b)に示す。この検出器は、中性子と ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ や ${}^{239}\text{Pu}$ による核分裂反応を用いる。核分裂反応で生成される核分裂片の持つエネルギーを収集して電気的信号に変換し、得られる信号から入射中性子数を導出することができる。水素と中性子との弾性散乱反応によって生成される反跳陽子のエネルギーは最大でも入射中性子エネルギーであるのに対して、核分裂反応では約200 MeVという大きなエネルギーを生み出すので、非弾性散乱、 $(n,\alpha)$ 、 $(n,p)$ 反応などに起因するバックグラウンドによる不確かさはとても小さくなる。検出効率曲線も核分裂反応断面積に依存するためフルエ

ンスを導出する際のデータ解析が容易であるというメリットがある。しかし、核分裂反応断面積の不確かさは水素との弾性散乱反応断面積に比べて大きいというデメリットもある。また、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$ や $^{239}\text{Pu}$ は核燃料物質として特別な規制があるため、施設によっては使用に大きな制限がある。

### 3.2.3 エネルギースペクトル測定

エネルギースペクトル測定では、主に中性子飛行時間法（Time of flight method：TOF法）と反跳陽子カウンターテレスコープによる測定が採用される。

TOF法の概略図を図6(c)に示す。TOF法は、ある一定の距離Lを中性子が飛行する時間Tを測定することによって、中性子エネルギー $E_n$ を次式のように導出するものである。

$$E_n = \frac{1}{2} m_n \left( \frac{L}{T} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、 $m_n$ は中性子の質量である。また、超高エネルギーになれば、(1)式に相対論的効果を入れる必要がある。この方法では中性子がパルスで発生される必要があり、連続ビームに対しては適用されない。エネルギー分解能は、距離Lと時間Tの不確かさ、特に中性子発生の際のビームパルス幅によって決定され、通常数ns以下である。TOF法における高エネルギー中性子検出器としては、NE213液体シンチレーション検出器を用いることが多い。

反跳陽子カウンターテレスコープによる測定では、パルス中性子の発生ができない場合に用いられることが多い。原理は、フルエンス測定の際と同じで、中性子と水素原子核との弾性散乱反応によって生成される反跳陽子を観測するものである。ただし、ラジエータとして薄膜を用いる場合が多い。入射中性子軸に対する反跳陽子の発生方向、反跳陽子エネルギー $E_p$ とすると、中性子エネルギー $E_n$ は、

$$E_n = \frac{E_p}{\cos^2 \theta} \quad (2)$$

と得られる。このため、多くの場合中性子の入射方向を限定するために検出器前面にコリメータを設置することが多い。この検出器のエネルギー分解能は、ポリエチレンラジエータ内における反跳陽子のエネルギー損失、後方の反跳陽子検出器のエネルギー分解能と角度測定の不確かさ、すなわち反跳陽子検出器の立体角によって決定される。従って、反跳陽子検出器を小さくすれば角度に対する不確かさが小さくなりエネルギー分解能が良く

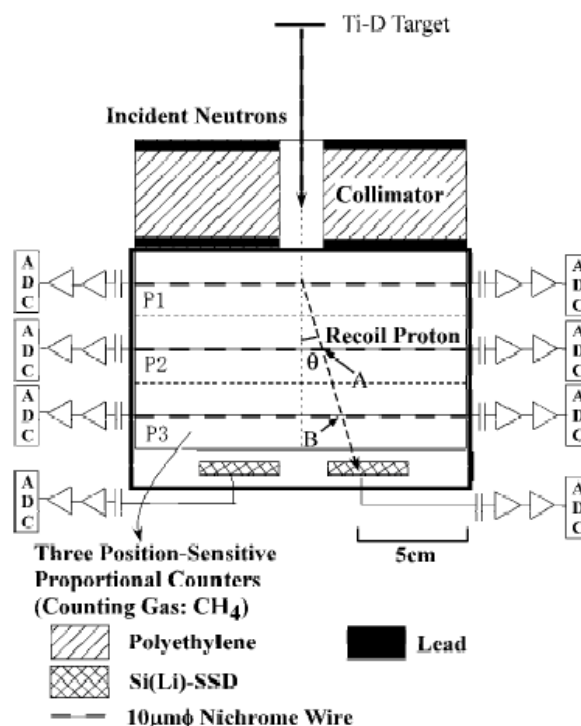


図7 産総研で開発された複合型速中性子スペクトロメータの概略図

なるが、検出効率が悪くなるというデメリットが伴う。この事象を改善するものとして、位置敏感型の反跳陽子検出器を用いる手法が開発されている<sup>35),36)</sup>。産総研では、3~15 MeVを対象として、図7のような複合型反跳陽子カウンターテレスコープを開発した。この検出器は、メタンガスを充填した位置敏感型比例計数管（PSPC）を3つ並べていることが特徴である。1段目のPSPC内で生成した反跳陽子は、2,3段目のPSPCで位置が検出され、反跳角 $\theta$ が精度良く求まる。同時に反跳陽子のエネルギー情報も3つのPSPCとシリコン半導体検出器によって精度良く求まる。結果として、この検出器は5.0 MeV中性子に対して検出効率を大きく損なうことなく1.7%という世界最高レベルのエネルギー分解能を達成している<sup>35),37)</sup>。

### 3.3 核データと不確かさ評価

中性子計測には、必ず原子核反応が利用される。たとえば、産総研5 MeV中性子フルエンス標準で参照標準器であるThick Radiator 検出器は、ポリエチレンラジエータとシリコン半導体検出器によって構成されており、主な構造材物質として水素(H)、炭素(C)、シリコン(Si)、鉄(Fe)、アルミニウム(Al)がある。したがって、水素原子核弾性散乱反応、 $^{nat}\text{C}(n,\gamma)$ 、 $^{nat}\text{C}(n,n)$ 、 $^{nat}\text{Si}(n,\gamma)$ 、 $^{nat}\text{Si}(n,p)$ 、 $^{nat}\text{Fe}(n,\gamma)$ 、 $^{27}\text{Al}(n,\gamma)$ 反応等が検出器内部で起こっており、

これらの反応を考慮した結果検出器の応答（検出効率）が得られ、最終的にフルエンスが導出される。以上のようなそれぞれの原子核反応の断面積（単位：バーン（ $b=10^{-24} \text{ cm}^2$ ））や粒子放出角度分布のデータを核データと呼ぶ。構造材として用いられる原子核に対する核データは実験データやモデル計算を基にした評価済み核データライブラリJENDL-3.3(Japan Evaluated Nuclear Data Library：日本)<sup>38)</sup>、ENDF/B-VI(Evaluated Nuclear Data File：アメリカ)などにまとめられている。評価済み核データライブラリは、前述の日本とアメリカの他、EU、中国、IAEAなどでもまとめられ、高エネルギー中性子の反応や核融合反応を対象とした特殊目的のファイルも数多く存在する。これらのライブラリは常に比較競争しながらデータがアップデートされている。そして、これらの核データには必ず不確かさが含まれていることに注意したい。

15 MeV以上の高エネルギー中性子領域では、数MeV以下のエネルギー領域と異なり、中性子と原子核との反応は大変に複雑なものとなる。たとえば、炭素と熱中性子が反応した場合には、弾性散乱反応と中性子捕獲反応の2種類の反応しか起こらないのに対し、20 MeV中性子が入射した場合には、弾性散乱反応と中性子捕獲反応のほかに、非弾性散乱反応、 $^{nat}\text{C}(n,p)$ 、 $^{nat}\text{C}(n,\alpha)$ 、 $^{nat}\text{C}(n,d)$ 、 $^{nat}\text{C}(n,n'\alpha)$ 反応が起こりうるため、考慮すべき反応の数がとても多くなる。このような反応について、検出器の構造材に含まれるすべての原子核に対して考慮し、測定結果にどの程度の影響を与えているかを評価、検討しなければならない。また、15 MeV以上のエネルギー領域では核反応実験データが質・量ともに乏しいので、核データライブラリに格納されているデータの不確かさも大きなものとなる。最も精度の良い水素の弾性散乱断面積でも5%（包含係数 $k=1$ ）程度の不確かさを持つ。したがって、高エネルギー中性子標準を整備する際には、核データに起因する不確かさの評価手法が大きな課題となる。

#### 4. 国内外の高エネルギー中性子施設

15 MeV以上の単色中性子発生が可能な主な施設を、表2、3にまとめた。表から分かるように高エネルギー中性子施設は世界的に限られているが、中でも日本には多くの高エネルギー中性子施設があり、全施設の能力を合わせれば400 MeVまでのエネルギーを得ることができる。表2の施設のほか、放医研の重イオン加速器HIMACからの高エネルギー重イオンを利用して800 MeVまでの白色中性子を得られる施設もある<sup>39)</sup>。日本は高エネルギー中

表2 日本国内の準単色高エネルギー中性子発生施設

施設名		エネルギー範囲 (MeV)	最大フラックス (n/cm <sup>2</sup> /s)
東北大学	(CYRIC)	20-90	10 <sup>7</sup>
原子力機構	(TIARA)	30-90	10 <sup>5</sup>
理化学研究所	(RIKEN)	70-200	10 <sup>5</sup>
大阪大学	(RCNP)	250-390	3×10 <sup>5</sup>
産総研	(NMIJ)	19(整備中)	----
原子力機構	(FRS)	19(整備中)	----

表3 国外の準単色高エネルギー中性子発生施設

施設名	国名	エネルギー範囲 (MeV)	最大フラックス (n/cm <sup>2</sup> /s)
UC Davis	アメリカ	40-60	6×10 <sup>5</sup>
UCL Louvain	ベルギー	20-65	10 <sup>6</sup>
Uppsala(TSL)	スウェーデン	11-180	3×10 <sup>5</sup>
TRIUMF	カナダ	200-500	10 <sup>5</sup>
iTemba	南アフリカ	60-200	4×10 <sup>4</sup>
PTB	ドイツ	19	1.2×10 <sup>3</sup>

性実験に関する最先端の研究成果を多くあげており、高エネルギー中性子大国と言える。日本は高エネルギー中性子標準について世界の先駆的存在になり得る土壤がある。これらの施設は、中性子検出器や線量計の開発や校正、中性子入射原子核反応の研究、遮蔽のベンチマーク試験、半導体デバイスの照射試験に用いられている。

#### 4.1 国内の施設

##### 4.1.1 東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター (CYRIC)

中性子ビームラインの概略図を図8(a)に示す。AVFサイクロトロンからの陽子ビームと $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ 反応を利用している<sup>40),41)</sup>。中性子は、ターゲットから約10 mの飛行距離を経て、中性子照射室に到達する。途中、20 cm直径の鉄とコンクリートで構成されるコリメータと20 cm直径のポリエチレンとコンクリートで構成されるコリメータがある。東北大の中村・馬場グループは、1990年代に中性子検出器の校正を目的として22,33 MeV準単色中性子場を構築した<sup>40)</sup>。中性子エネルギーは、TOF法で測定され、フルエンスはターゲットから10.22 mの地点に設置された反跳陽子カウンターテレスコープと13.98 mの地点に設置された液体シンチレーション検出器によって測定されている。反跳陽子テレスコープとしては、図9に示すようにシャドーバー、円環状ポリエチレンコンバータ、シリコンPIPS検出器とNaI(Tl)検出器で構成された検出器が開発された。また、エネルギーピークのフルエンス測定は、 $^7\text{Li}$ が放射化して生成する $^7\text{Be}$ から発生するガンマ



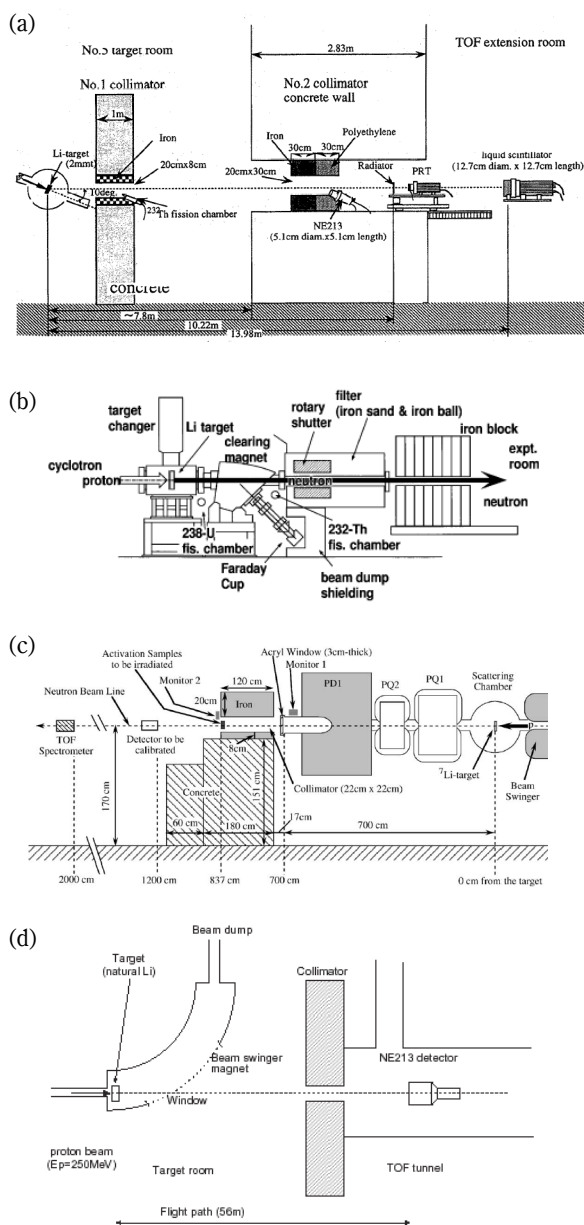


図8 (a)CYRIC<sup>39)</sup>, (b)TIARA<sup>33)</sup>, (c)RIKEN<sup>44)</sup>, (d)RCNP<sup>45)</sup>のそれぞれの高エネルギー中性子施設の概略図

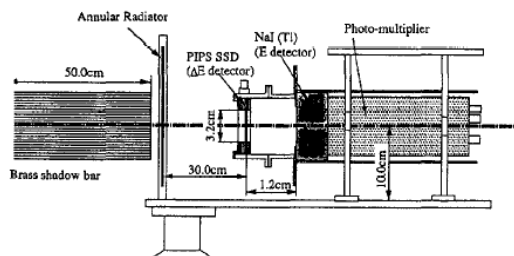


図9 東北大学で開発された反跳陽子カウンターテレスコープ。円環ポリエチレンラジエータとシリコンPIPS検出器、NaI(Tl)検出器で構成されている。

線を高純度Ge検出器を用いて測定することによっても行われた。モニタ検出器としては<sup>232</sup>Thフィッションチェンバーが使われている。

2006年には新しい中性子ビームラインを構築している<sup>42)</sup>。このビームラインは、加速器からほぼ直線的にビームを輸送できるため、ビームロスが少なく前述のビームラインと比較して1桁以上の高強度中性子源を実現している。一方で、照射場が少々小さいという欠点もある。中性子モニタ検出器としてはNE213液体シンチレーション検出器を用いている。

#### 4.1.2 原子力機構高崎量子応用研究所イオン照射研究施設 (TIARA)

中性子ビームラインの概略図を図8(b)に示す。K=110AVFサイクロトロンで加速された陽子ビームが金属Liターゲット(35 mm直径)まで輸送され、<sup>7</sup>Li(p,n)<sup>7</sup>Be反応によって30-90 MeV中性子が発生する<sup>33)</sup>。中性子は、直径10 cmの鉄コリメータを通過して、中性子照射室に到達する。ターゲットから照射室までの中性子飛行距離は約5 mである。1990年代に東北大学馬場グループは、原子核反応研究を目的として40.5, 45.4, 50.9, 55.3, 60.6, 65.2, 75.0, 84.6 MeVの8エネルギー点について特性評価を行っている<sup>33)</sup>。彼らは、中性子エネルギーについて液体シンチレーション検出器を用いてTOF法で測定し、中性子フルエンスは円環状ポリエチレンラジエータ NaI(Tl)シンチレーション検出器とシリコン半導体検出器で構成される反跳陽子カウンターテレスコープを用いて測定した。中性子モニタ検出器としては、<sup>232</sup>Thフィッションチェンバーを用いた。

現在は、原子力機構保健物理部が、J-PARCに対応した独自の校正場とするために、東北大学と同じ方法で中性子場の特性の再評価を行っている<sup>43)</sup>。

#### 4.1.3 理化学研究所リングサイクロトロン施設 (RRC)

中性子ビームラインの概略図を図8(c)に示す。AVFサイクロトロンとリングサイクロトロンの2段階で陽子が加速され、<sup>7</sup>Li(p,n)<sup>7</sup>Be反応を用いて70-210 MeV領域の準単色中性子を発生させている<sup>44),45)</sup>。10 mm厚金属濃縮<sup>7</sup>Liがターゲットとして用いられた。発生中性子は厚さ120 cmの鉄コリメータを通過して8.37 m飛行したところで実験室に到達する。エネルギーピークのフルエンス測定は、東北大と同じく<sup>7</sup>Beからのガンマ線を高純度Ge検出器で測定することで導出している。エネルギースペクトルは、TOF法とターゲットから20 mの地点に設置したNE213液体シンチレーション検出器を用いて測定されている。中

性モニタ検出器として、NE213液体シンチレーション検出器とNE102Aプラスチックシンチレーション検出器を用いている。しかし、残念なことにこの中性子場は現在他の研究に使用されており、中性子を発生できる状態にない。

#### 4.1.4 大阪大学核物理研究センター(RCNP)

中性子ビームラインの概略図を図8(d)に示す。リングサイクロトロンで加速された陽子ビームと ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応によって250-390 MeV領域の準単色中性子<sup>46)-48)</sup>を発生させている。10 mm厚の天然金属Liをターゲットとしている。中性子は、12 cm×10 cm×150 cm厚のコンクリートコリメータを通過して実験室に到達する。エネルギーピークのフルエンス測定は、 ${}^7\text{Be}$ からのガンマ線を高純度Ge検出器で測定することによって導出している。エネルギースペクトルは、TOF法とターゲットから56 mの地点に設置されたNE213液体シンチレーション検出器を用いて測定されている。

#### 4.2 国外の施設

国外の主な準単色高エネルギー中性子施設については、表3にまとめた。カルフォルニア大学 Davis(アメリカ)<sup>49)</sup>、Louvain-la-Neuve(ベルギー)<sup>50)</sup>、Tri-University Meson Factory(TRIUMF)<sup>51)</sup>(カナダ)、ウプサラ大学the Svedberg Laboratory(TSL)(スウェーデン)<sup>52),53)</sup>、iTemba Laboratory(南アフリカ)<sup>54)-56)</sup>が主な施設である。各施設は、全て ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 反応中性子源を利用している。中でもカルフォルニア大学 Davisは高エネルギー中性子施設の先駆的存在であり、中性子入射の原子核物理や核データに関する成果が出されている。LouvainとiTemba Lab.はPTBによってそれぞれ20-60 MeVと60-200 MeVエネルギー領域の中性子標準場としても整備されている。標準場の中性子スペクトルは、図5で示したものと同様な準単色であり、ピーク部分のフルエンス率を標準として設定している。フルエンス率の測定では、反跳陽子カウンターテレスコープ、液体シンチレーション検出器、 ${}^{238}\text{U}$ フィッションチェンバー、ボナー球検出器の複数の検出器を用いて、結果の妥当性を検討している。

#### 5. 産総研における高エネルギー中性子標準

産総研では、高エネルギー中性子標準確立の第1歩としてISO8529-1で定められている19.0 MeV中性子フルエンス標準を2010年に立ち上げる予定である。更に、5~10年の間には20 MeV以上の高エネルギー中性子フルエン

ス標準を立ち上げていくことを予定している。

##### 5.1 19 MeV標準

19 MeV中性子フルエンス標準の開発は2005年から5年計画で行われており、主な研究課題の項目は次の通りである。

- (1) 中性子発生に用いるトリチウム(非密封放射性同位元素)による汚染を最小限にするためのビームラインの改造
- (2) 随伴粒子検出器システムの開発
- (3) 中性子スペクトルとフルエンス同時測定可能な反跳陽子カウンターテレスコープタイプ検出器の開発
- (4) ワーキングスタンダードとなる中性子モニタ検出器の開発

産総研中性子標準場の概略図を図10に示す。19 MeV中性子用には専用のビームラインが設置され、トリチウム汚染に対する対応は終了している。

4 MVペレット加速器から加速された重水素ビームを銅板へ蒸着したチタンにトリチウムを吸蔵させたターゲットに当てることによって $\text{T}(d,n){}^4\text{He}$ 反応で19 MeVの中性子を発生させることができる。同時に、加速器からの重水素イオンがターゲット中に打ち込まれ、蓄積した重水素と重水素ビームによる $\text{D}(d,n)$ 反応によって2.5~6 MeVのバックグラウンド中性子も発生する。また、ターゲットの構成要素であるチタン、銅、炭素、酸素と重水素が反応することによっても低エネルギーのバックグラウンド中性子が発生する。このバックグラウンド中性子を精度良く定量することが主な技術課題となる。そのため、19 MeV中性子フルエンスの絶対測定用に、(a)随伴粒子検出器と(b)中性子スペクトルとフルエンス同時測定可能な反跳陽子カウンターテレスコープタイプ検出器の2種類の検出器を開発することを予定している。

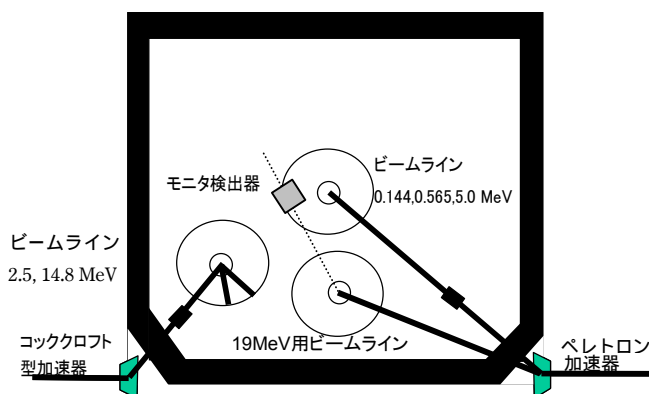


図10 開発中の産総研19MeV中性子フルエンス標準場の概略図

随伴粒子検出法（図11）は、中性子と同時に発生する<sup>4</sup>Heイオン（随伴粒子）を観測することにより運動学的に中性子の発生量を決定する方法であり、 $T(d,n)^4\text{He}$ 反応断面積に依存せず絶対測定することができるため、小さな不確かさを実現できる。この方法は、現在産総研14.8 MeV中性子フルエンス標準で採用されている。随伴粒子検出法では、加速重水素イオンがターゲットで散乱して検出器に入射することを防ぐ必要がある。14.8 MeV中性子の場合、重水素の加速エネルギーが230 keVであるのに対し、随伴粒子のエネルギーは980 keVであるため、検出器直前に薄膜を設置して散乱重水素イオンを止める工夫をしている。しかしながら、19 MeV中性子の場合には加速エネルギーが約2.6 MeVと大きく、散乱重水素イオンエネルギーが随伴粒子のエネルギーよりも大きくなるため、散乱重水素イオンの入射を防ぐことは容易でない。随伴粒子検出法を採用するためには、新たな技術要素の開発が必要となる。

反跳陽子カウンターテレスコープタイプでは、ラジエータや後方の検出器の選択によってフルエンス測定またはスペクトル測定が可能となる。今回は、中性子のエネルギーを弁別して、かつフルエンスの情報を得る必要があるので、反跳陽子カウンターテレスコープによる中性子フルエンスとスペクトルの同時測定を目指す。この検出器は、開発が成功すれば20 MeV以上の高エネルギー領域への拡張も可能になると考えられる。

中性子エネルギーの弁別にはTOF法を用いることもできるが、パルスビームの発生が可能になるように加速器にパルス化装置を取り付けなければならない。この改良には、コストとマンパワーが必要なため当面の予定はないが、パルスビームは中性子計測において必要不可欠なツールであり、中性子標準の信頼性を大きく高めることができる。

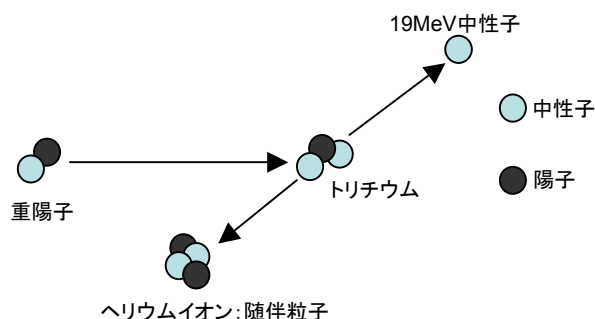


図11 随伴粒子検出の原理

19 MeV中性子フルエンス標準は、2009年度までに多くの技術的課題をクリアし、最終的に2010年度より標準供給を開始する予定である。

## 5.2 20 MeV以上高エネルギー中性子標準

20 MeV以上の高エネルギー中性子標準については、19 MeV中性子標準同様に技術的課題は多くある。しかしながら、19 MeV中性子フルエンス標準の開発が成功すれば、計測に関わる技術的課題の多くは見通しが付くと考えられる。残る大きな課題としては、産総研において新たに高エネルギー中性子施設を建設することは現実的ではないので、国内のほかの施設を利用した中性子標準の確立を目指すということである。4章で述べたように、日本には高エネルギー中性子施設が多くあり、施設利用に際していずれも大きな支障はないが、ビーム利用時間に制限があり、他の研究利用と共有することになる。PTBが他国の中性子場を利用して標準を立ち上げたことが、今後の産総研中性子標準の方向性を決める道しるべになると考える。

## 6. まとめ

私たちの身近にある中性子について調査を行い、現在社会で必要とされている中性子標準について紹介した。中でも高エネルギー中性子に着目し、世界における標準の現状と技術的課題について明らかにした。高エネルギー中性子標準の開発は、原子核物理、検出器開発や核データなど様々な研究分野の総合力で達成されるものであり、世界最先端の技術力が必要であることが明らかになった。一方で、本調査研究を通して、現在の産総研中性子標準を広く産業に普及させていくことの重要性を再認識した。更に、他の研究分野とも協力することによって、中性子標準の高度化と高エネルギー中性子標準確立に繋げる努力をしていきたい。

## 謝辞

本調査研究を進めるにあたり東北大学の馬場護教授とPTBのR. Nolte博士には高エネルギー中性子に関してご教示を賜りました。量子放射科科長工藤勝久博士、放射能中性子標準研究室室長柚木彰博士、原野英樹博士、及び量子放射科の皆様にはご助言、ご指導を頂きました。ここに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 高野秀機：加速器駆動炉核変換における核データ，日本原子力学会，43-7 (2001) 659.
- 2) 向山武彦「アクチニド燃焼用高速炉」，日本原子力学会誌，35-5 (1993) 33.
- 3) H. Harano: A survey on the neutron fluence standards, AIST Bulletin of Metrology, 2-4 (2004) 587.
- 4) K. Kudo, A. Uritani and N. Takeda: International key comparison of neutron fluence at 144 keV, 5.0 MeV and 14.8MeV, AIST Bulletin of Metrology, 2-1 (2003) 61.
- 5) 校正・測定能力 (CMC) リスト：  
<http://kcdb.bipm.org/AppendixC/default.asp>
- 6) 放射線安全規制検討会報告書：航空機乗務員等の宇宙線被ばくに関する検討について，文部科学省科学技術・学術政策局 (2005)
- 7) 国連科学委員会2000年報告書：放射線の線源と影響 (2000).
- 8) 航空機搭乗者の宇宙線被ばくに関する専門研究会報告書，日本保健物理学会 (2006).
- 9) 人為的に高められた環境放射線専門研究会報告書，日本保健物理学会 (2003).
- 10) ICRP Pub. 60：国際放射線防護委員会の1990年勧告，日本アイソトープ協会編集・発行 (1991).
- 11) ICRP Pub. 75：作業者の放射線防護に関する一般原則，日本アイソトープ協会編集・発行 (1998).
- 12) European Union, Council Directive 96/29/Euratom; Basic Safety Standards Directive (Radiation Protection 88); and Exposure of Air Crew to Radiation (Radiation Protection 85).
- 13) H. Yasuda and K. Fujitaka: Cosmic radiation protection dosimetry using the electronic personal dosimeter (EPD) in satelec international flight, J. Rad. Res. 42 (2001) 57.
- 14) 航路線量計算システム (JISCARD)：  
<http://www.nirs.go.jp/research/jiscard/index.html>
- 15) D. Binder, E. C. Smith and A. B. Holman: Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-22, 6 (1975) 2675.
- 16) 大西一功: 半導体シングルイベント効果研究の現状，放射線，30-3 (2004) 235.
- 17) T. Ikeuchi, Y. Watanabe, W. Sun and H. nakashima: Calculation of Light-Hadron Induced Single-Event Upset Cross Section for Semiconductor Memory Devices, J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 2 (2002) 1380.
- 18) <http://lansce.lanl.gov/NS/instruments/ICEhouse/index.html>
- 19) 執行信寛，石橋健二，中島宏，渡辺幸信：我が国の核データ測定施設展望と世界情勢 (4)：海外施設における中高エネルギー核データ測定の情勢，核データニュース 78 (2004) 17.
- 20) <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-a/n0/index.html>
- 21) 永宮正治：大強度陽子加速器プロジェクト，日本原子力学会誌，43-8 (2001) 740.
- 22) 日本原子力機研究機構ホームページ：  
[http://www.jaea.go.jp/04/4\\_9.shtml](http://www.jaea.go.jp/04/4_9.shtml)
- 23) Y. Sakurai and T. Kobayashi: Characteristics of the KUR Heavy Water Neutron Irradiation Facility as a neutron irradiation field with variable energy spectra, Nucl. Instr. Meth. A453 (2000) 569.
- 24) Matsumura, Sakurai, Shibata, Yamamoto, Nakai, Torii, Yokoo, Horiguchi, Nakagaw: Nose; Planning of BNCT using a new medical irradiation facility at JRR4, Clinical Physiology and Functional Imaging 18 (1998) 289.
- 25) F. Sakurai, Y. Toni, T. Kishi, H. Kumada, K. Yamamoto, K. Yokoo and K. Kaieda: Medical irradiation facility at JRR-4, IAEA-TECDOC-1223 (2001) 142.
- 26) T. Kobayashi, Y. Sakurai, K. Kanda, Y. Fujita and K. Ono: The modeling outline of the neutron irradiation facility of the Kyoto University research reactor mainly for neutron capture therapy, IAEA-TECDOC-1223 (2001) 131.
- 27) S. Yonai, T. Itoga, M. Baba, T. Nakamura, H. Yokobori and Y. Tahara: Benchmark experiments for cyclotron based neutron source for BNCT, Appl. Radiat. Isot 61-5 (2004) 997.
- 28) M. Ishikawa, K. Ono, Y. Sakurai, H. Unesaki, A. Uritani, G. Bengua, T. Kobayashi, K. Tanaka and T. Kosako: Development of real-time thermal neutron monitor using boron-loaded plastic scintillator with optical fiber for boron neutron capture therapy, Appl. Radiat. Isot. 61 (2004) 775.
- 29) Y. Ito, G. Katano, H. Harano, T. Matsumoto, A. Uritani, K. Kudo, K. Kobayashi, T. Yoshimoto, Y. Sakurai and T. Kobayashi: Development of a Tiny Neutron Probe with an Optical Fiber for BNCT, Radiat. Prot. Dosim. 110 (2004) 619.
- 30) <http://www.mext.go.jp/english/news/2002/05/020602.htm>

- 31) T. Iguchi, J. Kawarabayashi, K. Watanabe, K. Nishimura, T. Handa and H. Sawamura: Development of advanced neutron induced prompt gamma ray analysis system for survey of anti-personal mine, Proc. 16<sup>th</sup> WCNDT 2004, paper code 664 (2004).  
<http://www.ndt.net/abstract/wcndt2004/664.htm>.
- 32) V. Dangedorf, R. Nolte, F. Roos, H. Schuhmacher, B. R. L. Siebert and M. Weyrauch: Proton recoil telescopes for fluence measurement in neutron beams of 20-200 MeV energy, Nucl. Instr. Methods A 469 (2001) 205.
- 33) M. Baba, Y. Nauchi, T. Iwasaki, T. Kiyosumi, M. Yoshioka, S. Matsuyama, N. Hirakawa, T. Nakamura, Su. Tanaka, S. meigo, H. Nakashima, Sh. Tanaka, N. Nakao: Characterization of 40-90 MeV  ${}^7\text{Li}(p,n)$  Neutron Source at TIARA using a Proton Recoil Telescope and a TOF Method, Nucl. Instrum. Methods A428 (1999) 454.
- 34) D. B. Gayther: International intercomparison of fast neutron fluence rate measurements using fission chamber transfer instruments, Metrologia 27 (1990) 221.
- 35) T. Matsumoto, H. Harano, A. Uritani and K. Kudo: Fast Neutron Spectrometer Composed of PSPCs and Si(Li)-SSDs with Excellent Energy Resolution and Detection Efficiency, IEEE Trans. Nucl. Sci. 52 (2005) 2923.
- 36) G. Wakabayashi, T. Kitano, H. Yanagawa, S. Aoki, M. Matoba, T. Sakae, Y. Watanabe, S. Sagara and N. Ikeda: A ray-trace-type counter telescope for neutron spectrometry, IEEE Trans. Nucl. Sci. 48 (2001) 320.
- 37) T. Matsumoto, H. Harano, Y. Ito, A. Uritani, K. Emi and K. Kudo: Development of a fast neutron spectrometer composed of Silicon-SSD and Position sensitive proportional counters, Radiat. Prot. Dosim. 110 (2004) 223.
- 38) K. Shibata, T. Kawano, T. Nakagawa, O. Iwamoto, J. Katakura, T. Fukahori, S. Chiba, A. Hasegawa, T. Murata, H. Matsunobu, T. Ohsawa, Y. Nakajima, T. Yoshida, A. Zukeran, M. Kawai, M. Baba, M. Ishikawa, T. Asami, T. Watanabe, Y. Watanabe, M. Igashira, N. Yamamuro, H. Kitazawa, N. Yamano and H. Takano: Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3, J. Nucl. Sci. Technol. 39 (2002) 1125.
- 39) T. Kurosawa, N. Nakao, T. Nakamura, Y. Uwamino, T. Shibata, N. Nakanishi, A. Fukumura and K. Murakami: Measurements of secondary neutrons produced from thick targets bombarded by high-energy helium and carbon ions, Nucl. Sci. Eng. 132-1 (1999) 30.
- 40) M. Takada, T. Nakamura, M. Baba, T. Iwasaki and T. Kiyosumi: Characterization of 22 and 33 MeV quasi-monoenergetic neutron fields for detector calibration at CYRIC, Nucl. Instr. Method A372 (1996) 253.
- 41) Y. Shikaze, Y. Tanimura, J. Saegusa, M. Tsutsumi and Y. Yamaguchi: Evaluation of the property for quasi-monoenergetic neutron calibration fields of high energies at TIARA, Tenth Symposium on Neutron Dosimetry, A4-9 (2006).
- 42) A. Terakawa, H. Suzuki, K. Kumagai, Y. Kikuchi, T. Uekusa, T. Uemori, H. Fujisawa, N. Sugimoto, K. Itoh, M. Baba, H. Orihara and K. Maeda: New fast neutron time-of-flight facilities at CYRIC, Nucl. Instr. Methods A491 (2002) 419.
- 43) M. Baba, H. Okamura, M. Hagiwara, T. Itoga and S. Kamada: Installation and application of an intense  ${}^7\text{Li}(p,n)$  neutron source for 20-90 MeV region, Tenth Symposium on Neutron Dosimetry, A1-3 (2006).
- 44) N. Nakao, Y. Uwamino, T. Nakamura, T. Shibata, N. Nakanishi, M. Takada, E. Kim and T. Kurosawa: Development of a quasi- monoenergetic neutron field using the  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  reaction in the 70-200 MeV energy range at RIKEN, Nucl. Instr. Methods A420 (1999) 218.
- 45) S. Taniguchi, N. Nakao, Y. Iwamoto, D. Satoh, N. Nakane, H. Nakashima, H. Yashima, T. Itoga, T. Nakamura, A. Tamii and H. Hatanaka: Development of a quasi-monoenergetic neutron field using the  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$  reaction in the energy range from 250 to 390 MeV at RCNP, The 10<sup>th</sup> Neutron Dosimetry Symposium, A1-5 (2006).
- 46) <http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-a/n0/index.html>
- 47) N. Nakao, T. Nakamura, M. Baba, Y. Uwamino, N. Nakanishi, H. Nakashima and S. Tanaka: Measurement of response function of organic liquid scintillator for neutron energy range up to 135 MeV, Nucl. Instr. Methods A362 (1995) 454.
- 48) N. Nakao, T. Kurosawa, T. Nakamura and Y. Uwamino: Development of a quasi- monoenergetic neutron field and measurements of the response function of an organic liquid scintillator for the neutron energy range from 66 to 206 MeV, Nucl. Instr. Methods A476 (2002) 176.
- 49) J. A. Jungerman and F. P. Brady: A medium-energy

- neutron facility, Nucl. Instr. Methods 89 (1970) 167.
- 50) A. Bol, P. Leleux, P. Lipnik, P. Macq and Ninane: A novel design for a fast intense neutron beam, Nucl. Instr. Methods A256 (1983) 169.
- 51) R. Helmer: TRIUMF charge-exchanged facility, Can. J. Phy 65 (1987) 588.
- 52) H. Conde, S. Hultqvist, N. Olsson, T. Ronnqvist, R. Zorro, J. Blomgren, G. Tibell, Hakansson, F. P. Brady and Z. Szeflinski: A facility for studies of neutron induced reactions in the 50-200 MeV range, Nucl. Instr. Methods A292 (1990) 121.
- 53) A. V. Prokoflev, O. Bystrom, C. Ekstrom, V. Ziemann, J. Blogren, S. Pomp, M. Osterlund, U. Tippawan: A new neutron beam facility at TSL, Proceedings of International Workshop on Fast Neutron Detectors University of Cape Town, South Africa, 2006, PoS(FNDA2006)016 (2006)
- 54) <http://www.tlabs.ac.za/public/Links.htm>
- 55) R. Nolte, M. S. Allie, P. J. Binns, F. Brooks, A. Buffer, V. Dangendorf, J. P. Meulders, F. Roos, H. Schumacher, B. Wiegel: Quasi-monoenergetic Neutron Beams with Energies from 25 to 70 MeV, Nucl. Instr. Methods A292 (1990) 121.
- 56) W. R. McMurray, D. G. Aschman, K. Bharuth-Ram and R. W. Fearick: The faure cyclotron neutron source and a particle spectrometer for neutron induced emission of charged particles at energies between 60 and 200 MeV, Nucl. Instr. Methods A329 (1993) 217.