



## J-PARC MLF 中性子源と核データ測定計画

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

日本原子力研究開発機構

J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン

前川 藤夫

maekawa.fujio@jaea.go.jp

### 1. はじめに

J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) の中性子源に 2008 年 5 月 30 日に初ビームが供給され、MLF に製作中の中性子核反応実験装置 (NNRI) のビームライン BL04 でも、同日初ビームが観測された。KEK の加速器中性子源施設 KENS (加速器パワー約 3 kW) が 1980 年に完成してすぐ、1982 年にイギリスの ISIS (160 kW) ができた。このような状況であったため、日本の次期計画の検討を KENS 完成直後から始めてきた。以来、ISIS を超える大型加速器中性子源施設の建設は長い間の悲願であり、紆余曲折を経て大強度陽子加速器計画として予算がついて今日に至ったが、最初の計画から数えると実に四半世紀以上の年月を経ての念願の成就となる。

J-PARC・MLF は最終目標が 1 MW の大強度陽子加速器中性子源で、KENS の約 300 倍、長い間世界最高の強度を誇ってきたイギリスの ISIS の 5 倍以上、現在、コミッションング中のアメリカの SNS と比較しても同程度のパワーとなっている。1 MW に到達するには、線形加速器のエネルギー増大、中性子ターゲットの耐久性の改善などが必要であるが、現状で可能である 0.5 MW レベルでも、世界最高にランクされる大強度加速器中性子源であることに変わりはない。

J-PARC 中性子源は本質的に中性子散乱を目的に設計されており、加速器の繰り返しが 25 Hz と低く、飛行時間法で測定できる中性子エネルギー範囲が広くとれるため、熱中性子から冷中性子までの情報を一度の測定に必要な強度・分解能で得られるように、すべての減速材が極低温水素減速材 (20 K) となっている。減速材としては、強度を重視し

た結合型水素減速材、中間性能を狙った非結合型水素減速材、高分解能を狙ったポイゾン型水素減速材の 3 種となっている。初ビームの特性評価では、まだパワーは低いものの、所期の性能となっていることが実証された。

核データは原子力科学の展開において基盤となるものであり、その整備はこれからの原子力発電の世界的普及に対しても重要な役割を担うものである。特に、マイナーアクチニド (MA) や長寿命核分裂生成物 (LLFP) の発生量を正確に評価する、また、その燃焼量を正確に見積もるためには、核データの整備が必須である。中性子捕獲断面積は核データとして重要な要素の一つであり、エネルギー依存でその値を求めるためには、パルス中性子源を用いて飛行時間法で測定することが望まれる。しかし、MA や LLFP の捕獲断面積データはまだ不十分である。たとえば、Cm アイソトープの精度は 4 eV 以上で 40 %程度である。革新炉などの設計に供するために、高い精度の捕獲断面積の測定が、ヨーロッパの CERN (n-TOF プロジェクト) やアメリカの LANL で行われている。最近、LANL では  $^{237}\text{Np}$  と  $^{241}\text{Am}$  のデータを報告している[1,2]。また、n-TOF では  $^{243}\text{Am}$  の予備的データが取得されている[3]。日本でも、全立体角 Ge スペクトロメータを開発し、 $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241,243}\text{Am}$  の捕獲断面積が京都大学原子炉実験所の電子加速器中性子源を用いて測定された。しかし、高エネルギー領域のデータを得るためには、また、少量のサンプルでの測定を実現するためには大強度中性子源が必要である。日本では京都大学原子炉実験所の電子加速器や東工大のペレトロン加速器で捕獲断面積の測定が行われているが、いずれも長年月を経た加速器であり、早急に新規の測定サイトができることが望まれている。J-PARC 中性子源は、その要求に応えるものであり、核データ測定のための世界の拠点の一つとしても重要なものである。

ここでは、稼働を始めたばかりの J-PARC 中性子源の中性子特性と NNRI が設置される BL04 の中性子特性、捕獲断面積測定の前準備状況について述べる。

## 2. J-PARC 1MW パルス核破砕中性子源

### 2.1 概要

J-PARC の 1 MW パルス核破砕中性子源は図 2-1 に示すとおり、ミュオン源と共に物質・生命科学実験施設 (Materials and Life Science Experimental Facility, MLF) に設置されている。J-PARC の中性子源は、米国 ORNL の Spallation Neutron Source (SNS: 1.4 MW、2006 年運転開始) と共に、世界初の MW 級出力のパルス核破砕中性子源として建設された。図 2-2 に中性子源の詳細を示す。3 GeV シンクロトロンで加速された 1 MW の陽子ビーム (毎秒  $2 \times 10^{15}$  個の陽子) を水銀ターゲットに入射させる。従来の固体ターゲットでは MW 級ビームに伴う高密度の発熱を十分に除去できないため、液体である水銀をターゲット材料として選択し、これを SUS-316LN 製のターゲット容器内を循環させている。陽子ビームは水銀の原子核と核破砕反応を起こし、陽子 1 個あたり約 75 個、1 MW 出力時には



図 2-1 大強度陽子加速器計画 (J-PARC) 全体図。

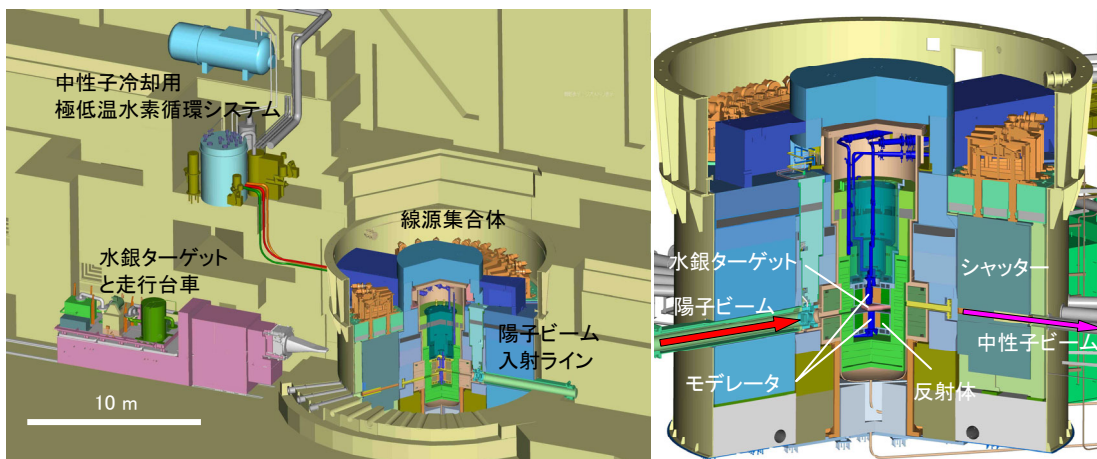


図 2-2 J-PARC 1MW パルス核破砕中性子源の全体像 (左) と中心部詳細 (右)。

毎秒約  $10^{17}$  個の中性子を生成する。

生成したばかりの中性子エネルギーは MeV オーダーで、中性子散乱実験等多くの応用にとってはエネルギーが高すぎるため、モデレータで meV オーダーまでエネルギーを落とす。J-PARC の中性子源には性格の異なる 3 台のモデレータがあるが、どれも温度 20 K、圧力 1.5 MPa の超臨界水素を循環している。こうして得られた冷／熱中性子が、MLF の 2 つの実験ホールに設置される 23 台の中性子実験装置に送り届けられる。

ターゲットやモデレータは、中性子の漏えいを抑制して中性子強度を増すために、その周囲をベリリウム反射体で囲まれている。さらにその外側は高エネルギー中性子遮蔽のための鉄鋼製あるいはコンクリート製の遮蔽体で囲まれていて、生体遮蔽体外側までの直径は約 15 m である。中性子ビームは、実験装置毎に独立で駆動できる中性子ビームシャッター (鉄鋼 1.8 m+ポリエチレン 0.2 m) により出したり止めたりでき、陽子ビームの on/off に関係なく実験者は試料の交換や実験装置の調整が行える。

## 2.2 2008年5月30日、初中性子発生に成功

J-PARCの全体スケジュールの中で、中性子源に初めて陽子ビームを導入する日 (Day-1) は2008年5月とされていた。中性子源を構成する機器は2002年度から発注を始めたが、その当時は2008年とは遥か将来のことと感じていた。2007年夏前には大部分の機器据付が完了し、その後の約1年間はDay-1までにすべての機器の準備が完了するよう、オフビームでの試運転調整を進めた。なにしろ、人類が経験したことの無い1 MW核破砕中性子源という未知の巨大装置が相手であるため、様々な技術的課題に直面し、それらと格闘しているうちに最後の1年はあっという間に過ぎ去ってしまった。そして、Day-1である2008年5月30日を迎えた。

当日、朝8:30から、MLF制御室にて関係者を集めたミーティングが行なわれ、陽子ビーム輸送系、ミュオン系、水銀系、水素系、冷却水系、制御系、中性子利用系など、すべてのシステムに異常が無いことを確認した。9:00からJ-PARC中央制御室 (CCR) で行なわれる加速器デイリーミーティングで、加速器側も順調であることを確認した。10:05には、MLFが陽子ビームを受け入れるための条件がすべて整った。事前の準備作業を十分に行なっていたとはいえ、すべての手続きが極めて順調に進行し、まだ朝も早いというのに心の準備が間に合わないほどであった。そして10:12、MLF制御室からCCRにビームを要求、10:15に初めてのパルスビームが3 GeVシンクロトロンからMLFに向けて出射された。MLF制御室では、数十名のスタッフが大型ディスプレイに写し出された陽子ビームモニターの信号に注目していた。その瞬間、陽子ビーム輸送ラインの上流から下流に向けて設置された9台の強度モニターがすべてほぼ同じ値 (400 GP =  $4 \times 10^{11}$  protons) を

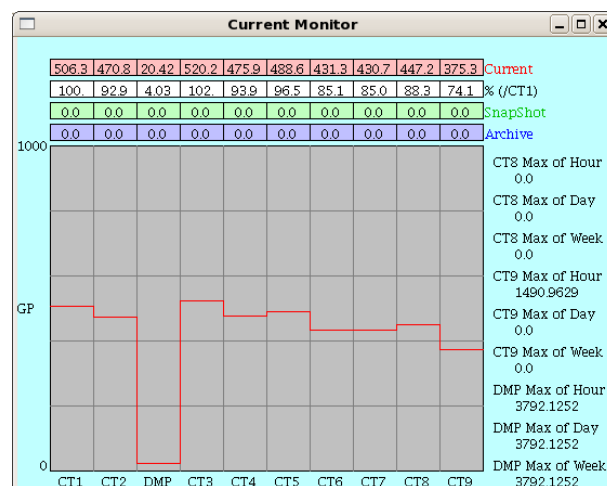


図 2-3 初陽子ビームパルス入射時の強度モニター表示画面。図の左から右、上流から下流に向けて、計9台のモニター (CT1~CT9) で計測した陽子数が記録されている。縦軸 GP は Giga Protons。左から3番目 (DMP) はビームダンプへ向かうモニター値で、通常運転時は0を示す。

示した（図 2-3）。これにより、最初の 1 発で見事に陽子ビームが MLF 水銀ターゲットに到達したことを確認した。3 GeV シンクロトロンから MLF 水銀ターゲットまでの全長約 300 m に及ぶ陽子ビーム輸送を最初の 1 発で決めたことは、加速器の専門家によると極めて珍しい成功と言えるそうである。

その後、10~20 分間隔で計 19 発のシングルショットのビームを入射しながら、陽子ビームラインの強度モニター、ロスモニター、プロファイルモニターの粗調整を行ない、14:16 に完了した。これで陽子ビームを概ね安定して中性子源に輸送できる状態となり、初中性子観測へ移行する条件が整った。中性子源には 23 本のビームポートがあるが、中性子源性能確認を目的に MLF 第 1 実験ホールの 10 番目のポート（BL10）に設置された中性子源特性試験装置（NOBORU）[4, 5]で初中性を観測するべく、準備を進めてきた。中性子検出器はリチウムガラスシンチレータを光電子増倍管に貼付けたもので、光電子増倍管から出力される電流信号を抵抗に流して電圧信号に変換、これをオシロスコープで観測する。構造が極めて簡単で信頼性が高いと同時に、シングルショットでも中性子の時間スペクトルを測定できる、まさに Day-1 に相応しい測定系である[6]。14:20 に中性子ビームシャッターを開放、そして 14:25、シングルショットビームが MLF に打ち込まれた。ほぼ同時に、オシロスコープの画面に記録された中性子の TOF スペクトル（図 2-4）が MLF 制御室の大型ディスプレイに写し出され、初中性子観測の成功を確認し、拍手喝采となった[7]。

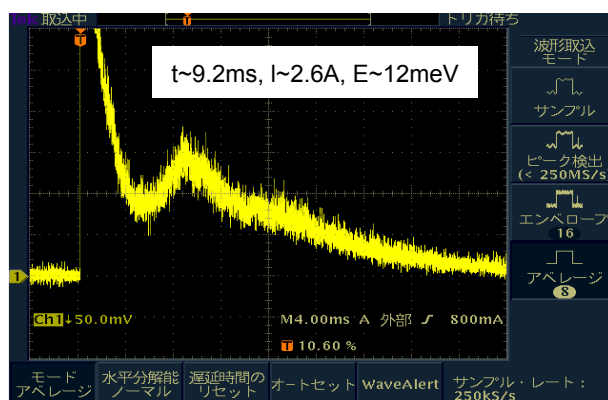


図 2-4 初中性を記録したオシロスコープ画面。横軸は中性子の飛行時間を（1 目盛り 4 ms）、縦軸は中性子数に比例した電圧（1 目盛り 50 mV）を示している。

その後も中性子の測定を継続したが、16:00 頃に岡崎俊雄・原子力機構理事長が急遽お祝いに駆けつけて下さることとなったため、ビーム試験を一時停止して祝賀イベントへと移行した。池田裕二郎・J-PARC センター物質・生命科学ディビジョン長の初中性子生成成功の報告後、岡崎理事長他により職員手作りの、くす玉が見事に割られた（図 2-5

左)。その後、岡崎理事長、KEK の下村理・物質構造科学研究所長からご祝辞をいただき、そして記念撮影（図 2-5 右）を行なったが、気がつけば MLF 制御室が約 100 名もの関係者で溢れかえり、とても盛大な祝賀イベントとなった。J-PARC 中性子源は、順調にその第一歩を踏み出した。



図 2-5 祝賀イベントの様子。(左) くす玉割り、右から岡崎俊雄 原子力機構理事長、大山幸夫 副センター長、池田裕二郎 物質・生命科学ディビジョン長、山崎良成 副センター長 (右) 全員で記念撮影。

### 2.3 核データコミュニティの輝かしい成果の結晶

GeV オーダーの高エネルギー陽子を物質に入射すれば、中性子は必ず発生する。水銀ターゲットに陽子ビームを入射し、中性子源中心から中性子検出器まで中性子ビームの通り道が確保されていれば、中性子は確実に検出器に到達する。この意味において、水銀ターゲットへの陽子ビーム入射に成功した時点で、中性子は観測できて当然である。しかし図 2-4 の中性子 TOF スペクトルは、中性子源が所期の性能を有し、粒子シミュレーションによる設計が実的に的確であったことを物語っている。これは、核データコミュニティの輝かしい成果の結晶であると、筆者は考えている。

図 2-4 の TOF スペクトルの面積から、実際に観測した熱／冷中性子数が分かるが、実測した陽子 1 個あたりの中性子数が、設計計算値と、現状の実験誤差と想定している  $\pm 30\%$  の範囲内で一致した。設計計算では、水銀ターゲットに 3 GeV 陽子を入射するところから計算機シミュレーションを開始する。水銀の原子核内での核子-核子散乱、前平衡過程、そして残留核からの蒸発による中性子の生成、そしてこれらの中性子がベリリウム反射体や水銀ターゲットで数十回から数百回も散乱されながら、MeV から meV までエネルギーを減じ、時には周辺の材料に吸収され、時には機器の隙間から漏えいし、最後は 20 K の超臨界水素中で干渉性／非干渉性散乱を繰り返しながら熱／冷中性子となり、中性子源中心から 10 m 以上離れた実験ホールの検出器まで到達する。これらすべての物理過程をシミュレートした結果、検出器に届く中性子数が計算される。3 GeV から数 meV

の約 12 桁に及ぶエネルギー範囲、そして水銀ターゲット中から中性子実験装置に至る約 10 桁に及ぶ中性子数変化をすべてシミュレーション計算で解き明かし、その結果、約 30 % の精度で観測される中性子数の絶対値を言い当てたのである。

この素晴らしい予測を可能にしたのは、高精度な JENDL の整備、20 MeV 以上の核反応を理解するための様々な高エネルギー実験と理論の発展、シミュレーション技術開発など、まさに核データコミュニティが近年中心となって行なって来た研究開発の賜物である。物理をエンジニアリングへと進化させ、GeV から meV までの粒子輸送を高い確度で取り扱えることを、J-PARC 中性子源が実証したと言える。また、J-PARC プロジェクトの設計を行なうことを目的として NMTC/JAM コード[8]が開発され、同コードが核となって PHITS コード[9]へと発展し、現在非常に広い分野で利用されていることは、J-PARC 中性子源開発の一つの大きな副産物であり、喜ばしい限りである。

## 2.4 世界一の性能を実証

J-PARC の中性子源にはそれぞれ特徴のある水素モデレータが 3 台ある。鋭いパルスを目指した高分解能型、出来るだけ高い時間積分中性子強度を目指した大強度型、そしてその中間のバランス型である。2008 年 5～6 月に行なった中性子源の運転で、2 つの世界一の性能が実証された。

1 つは、図 2-6 に示すとおり、高分解能型のモデレータに設置された超高分解能粉末回折装置 (SuperHRPD) という実験装置で、世界最高の分解能が達成されたことである[10]。これまでは、英国の ISIS という 160 kW の核破砕中性子源で達成された  $\Delta d/d = 0.05\%$  ( $d$  は結晶の格子面間隔) の分解能であったが、J-PARC では 0.037 % の分解能を達成した。さらに検出器のチューニングを行なうことにより、0.030 % まで向上する見通しである。これにより、物質の原子レベルでの構造をこれまでよりもより詳細に知ることが可能と

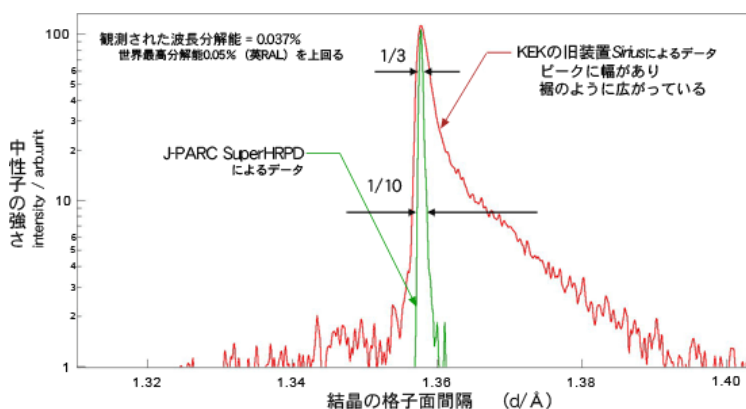


図 2-6 シリコンを用いた回折実験のデータ。高エネ機構にあった世界有数の回折装置 Sirius のデータとの比較。ピークの形がシャープなほど分解能が高いことを示す。SuperHRPD は分解能 1/3 以下を達成しただけでなく、ブラック回折線に大きな裾がなくなり、1/10 線幅では 10 倍以上改善された。

なる。

もう 1 つは、大強度型モデレータによる高い時間積分中性子強度である。中性子源の出力は現時点ではまだ弱い、実測した中性子強度を 1 MW 運転時に換算すると、ほぼ  $1 \times 10^9$  [n/s/cm<sup>2</sup>]になる。米国 SNS (1.4 MW) と比較すると、J-PARC 中性子源は出力で 1/1.4 倍と若干劣るものの、優れた線源の設計により時間平均中性子強度では逆に SNS の約 3 倍となり、将来出力が 1 MW に近づけば、世界最強の核破砕中性子源となる見込みである。さらに、 $1 \times 10^9$  [n/s・cm<sup>2</sup>]という中性子強度は原子力機構の JRR-3 原子炉の強度と肩を並べる値であり、原子炉中性子源を目標に大強度化を目指して来た加速器型中性子源が、ようやく原子炉に追いつきそうだという事実を肌で感じることでできるデータが得られた。

## 2.5 中性子源特性試験装置 (NOBORU) [1, 2]

2 章の最後に、2.2 節の初中性子観測を行った中性子実験装置である中性子源特性試験装置 (NOBORU) の紹介をさせていただきたい。NOBORU の概要は図 2-7 に説明されている。

J-PARC 中性子源に設置される計 23 台の実験装置は、その大半が中性子散乱実験専用マシンである。その中で、次章で紹介される中性子核反応実験装置と共に、NOBORU は核データ測定や検出器テスト、分析、照射実験など、中性子散乱以外の実験を行いやすい汎用目的の実験装置として、貴重な存在である。また、NOBORU は中性子源建設を担

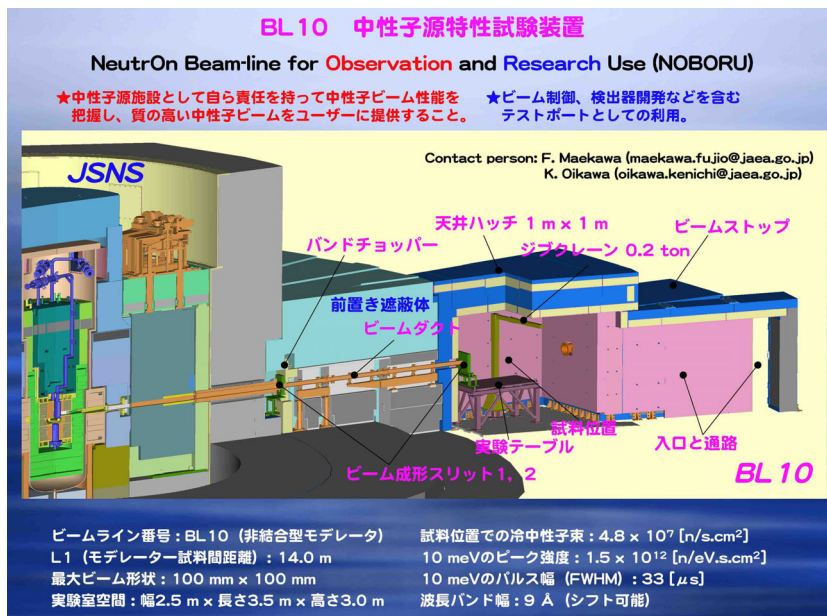


図 2-7 J-PARC 中性子源の実験装置の 1 つ、中性子源特性試験装置の概要。テストビームポートとして、様々な実験に対応可能である。



ってきたメンバー中心に運営されており、そのメンバーの大半は核データコミュニティ出身者である。そこで、読者の方々には是非とも J-PARC の中性子を使った実験をご提案いただき、J-PARC 中性子源の可能性を少しでも多く引き出していただきたい。そしてその際には、NOBORU の担当者（連絡先は図 2.7 中に記載）にお気軽に声をかけていただきたい。

### 3. 中性子核反応実験装置用ビームライン BL04 の特性と捕獲断面積測定の準備状況

#### 3.1 NNRI ビームラインの概要

NNRI 用の BL04 ビームラインは、北大、東工大、JAEA が共同で設計・製作を進めている。また、捕獲断面積測定用の全立体角 Ge スペクトロメータの高性能化を JAEA が、J-PARC 捕獲断面積測定のための不純物元素の測定等を JAEA、京大、東工大、北大が既存施設で行っている。

中性子核反応実験装置 NNRI は、結合型水素減速材のビームラインに設置されている。この減速材は水素減速材の欠点である冷中性子強度がメタン減速材より大きく劣るといふ欠点を補うために開発されたものである[11]。構造上の特徴は減速材の周囲に吸収体を置いていないことである。他の減速材は AIC 吸収体を減速材周囲に設置しているため、それらと比べると熱中性子領域では中性子パルスが大分広がっているが、eV 以上の領域ではその差は大きくない。高エネルギー領域から熱中性子領域まで広い範囲の捕獲断面積を測定することを考えているので、この減速材を選んでいる。

中性子ビームラインの遮蔽体の設計・製作では、遮蔽体外表面で J-PARC の規制値以内に線量率をさげることが必須条件であり、それを最適に行うことは遮蔽体量とコストを削減する上で重要である。遮蔽体の構造を図 3-1 に示す。遮蔽体内には捕獲断面積測定

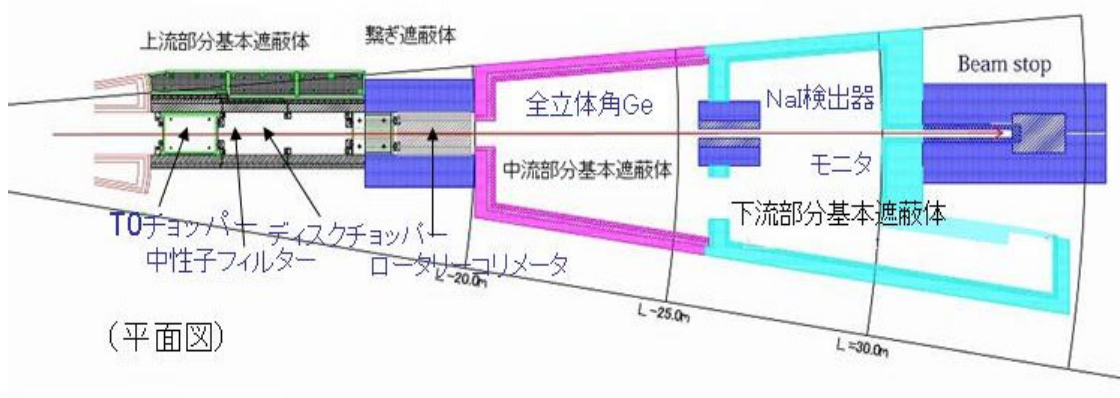


図 3-1 中性子核反応実験装置 (NNRI) ビームラインの遮蔽体構造。

ための検出器など、測定に必要な種々の機器を設置しなければならない。エネルギーの高い中性子の測定を考えると飛行路長として最低 20m を確保するように全体の遮蔽設計を

行った。遮蔽体は減速材側、即ち上流側から、生体遮蔽、前置遮蔽体、上流部分基本遮蔽体、繋ぎ遮蔽体、中流部分基本遮蔽体、下流部分基本遮蔽体からなっている。前置遮蔽体は 12m 位置までで、ここまでは J-PARC 側で設置を行っている。我々はそれ以後の遮蔽体の設計・製作を行った。核破砕中性子源では、中性子とガンマ線の遮蔽が必要であり、また、中性子のエネルギーも非常に高い所から始まるので、遮蔽はかなり厚いものとなる。PHITS コードによるシミュレーションを行い、遮蔽体の厚さ、構造を決定した。遮蔽材は内側から、硼砂レジン、鉄、コンクリートとなっている。下流部分基本遮蔽体だけは、距離が遠いことによる種々の効果のため、鉄遮蔽体が無い構造になっている。当然ながら、上流部分が厚くなり、下流部分は薄くなっている。平成 19 年度に完成した遮蔽体の写真を図 3-2 に示す。

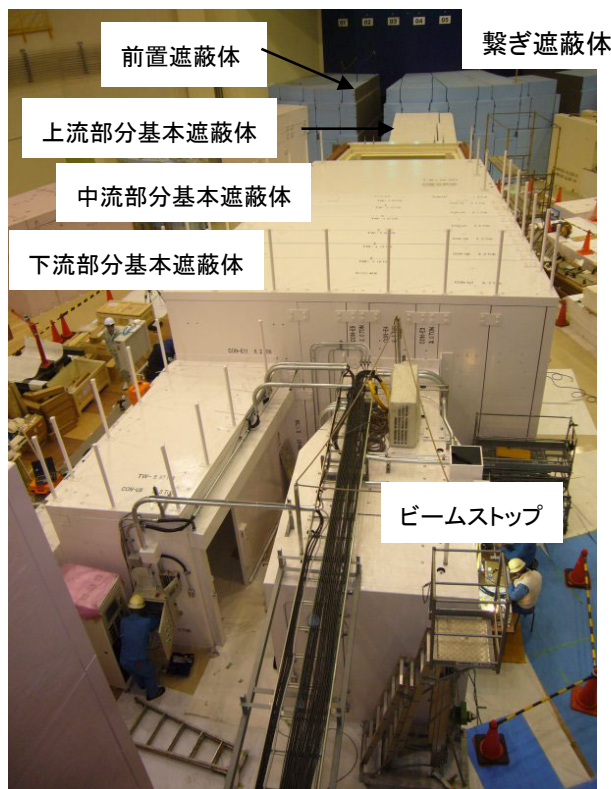


図 3-2 平成 19 年度に完成した NNRI の遮蔽体の写真。

図 3-1 に示すように、ビームラインの途中には、T0 チョッパー、中性子フィルター、ダブルディスクチョッパーが設置されビーム特性の調整に使われる。さらに、捕獲実験用ビームラインにおいて最も重要なことのひとつは、サンプル量が少ない測定において、いかにバックグラウンドを減らすかということである。バックグラウンドを減少させるためには、ビームコリメートを最適にし、必要な場所以外へのビームの浸みだしが少な

い、切れの良いビームを作成することが必要である。図 3-3 にビームコリメータの配置図を示す。サンプル位置の 21.5 m でサンプルサイズに応じて 4 種類のビームサイズが確保できるように、繋ぎ遮蔽体の中にロータリーコリメータを設置している。この図では 22 mm の場合を示している。設計においては、サンプル位置からコリメータ表面を見る大きさをできるだけ小さくして、そこから検出器に入る中性子量を極力少なくなるようにするため、鋸歯状のコリメータ内面としている。さらに、中性子の漏えいを減らすために、鉄遮蔽体だけでなく最下流には硼酸ポリエチレンを使用している。ロータリーコリメータの下流側、中流部分基本遮蔽体の中に全立体角 Ge スペクトロメータが設置される。完成予想図を図 3-4 に示す。全立体角 Ge スペクトロメータは検出器架台にセットされ、全体がシールドで覆われる構造となっている。また、下流部分基本遮蔽体の中では、NaI 検出器によるクロスチェック測定やビームモニターによる測定を行うために、40 mm までのビームサイズが確保できるように設計されている。

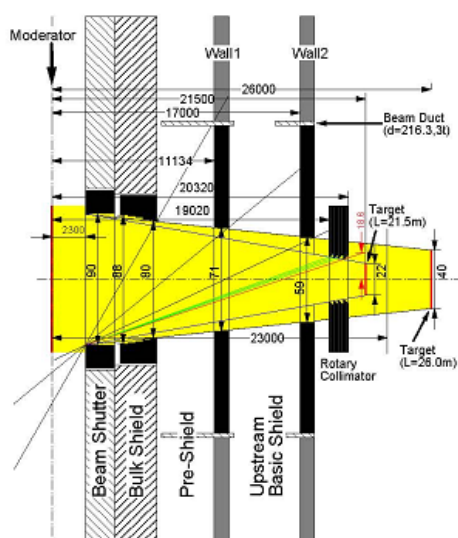


図 3-3 NNRI のビームコリメータ配置。

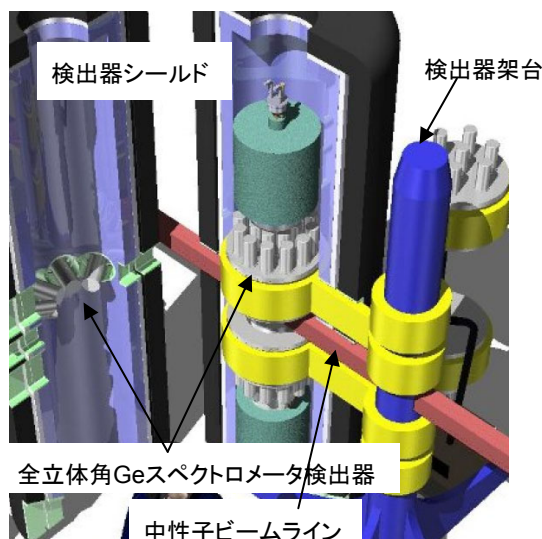


図 3-4 全立体角 Ge スペクトロメータ完成予想図。

### 3.2 BL04 ビームラインの中中性子特性測定

BL04 では、平成 20 年度はビーム特性の測定と検出器の特性測定が主テーマとなっている。そこで、J-PARC 中性子源に初ビームが供給されて以来、まず中性子ビームのエネルギー、空間特性の測定などを進めている。図 3-5 に測定されたエネルギースペクトルを示す。測定には空間分布の測定も可能な、約 2mm 角のピクセルサイズで、 $8 \times 8 = 64$  ch のピクセルをもつ高計数率 2 次元位置敏感型検出器を用いた[12]。現在まだデータ処理中であるが、実験と計算が、かなりよく合っていることが示された。高エネルギー側で実験値が計算値より少し高くなっているのは、検出器効率等の補正にまだ問題があるためと

思われる。まだ、加速器パワーが低いが、加速器パワーさえ上がれば、所期の中性子強度になるであろうことをこのデータは示しており、中性子源グループの減速材製作が設計通りに行われていることが示された。このデータは 10 keV までとなっているが、さらに高いエネルギー領域までの測定を今後進めていく予定である。また、Ta 箔をいれて、エネルギー校正のために共鳴吸収ピークの位置を測定した。このデータからは単にエネルギー校正の情報だけでなく、ピークの広がり方から中性子ビームの時間広がりの情報も得られる。中性子源の中心部分が沈下していることが知られており、ビームラインが減速材表面のみでなく、周囲を見ていないかどうかが気になっていたが、共鳴吸収ピークの形が大きく裾を引くようになっていないので、減速材以外の場所を大きく見ていることはないと考えられる。

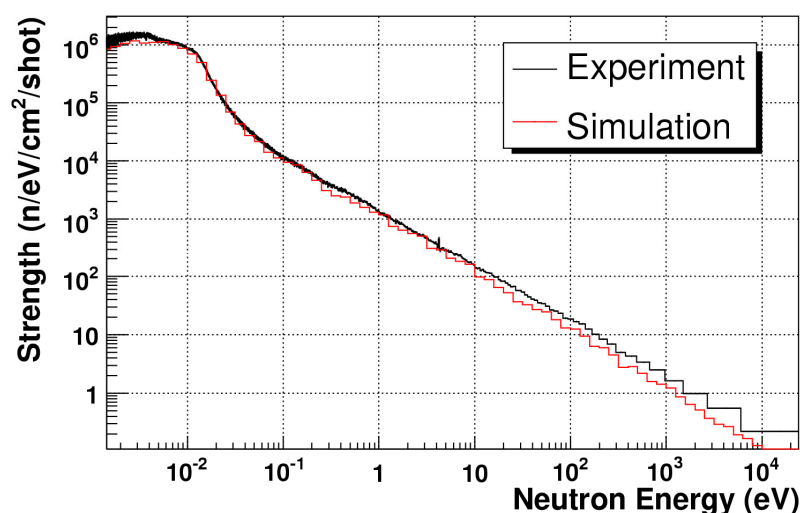


図 3-5 NNRI で測定した中性子エネルギースペクトルと計算値との比較。

重要な情報であるビームコリメーションがどのようになっているかを調べるため、高位置分解能が得られる IP (イメージング・プレート) を使用して熱中性子ビームの空間分布の測定を行った。設計では直径 22 mm の本影がえられるようになっている。図 3-6 に測定結果を示す。左上が 2 次元分布で右上が水平分布、左下が上下分布になっている。いずれも本影および半影の大きさはほぼ設計通りとなっている。前述のピクセルタイプの位置敏感型検出器で測定した、熱中性子よりも高いところの空間分布でも同様な結果が得られた。ビームが少し非対称になっていること、また、ビーム中心位置が若干幾何学的中心とずれていることについては、さらに測定を重ねて詳細に検討し、実際にサンプルを置く位置を正確に決定する予定である。

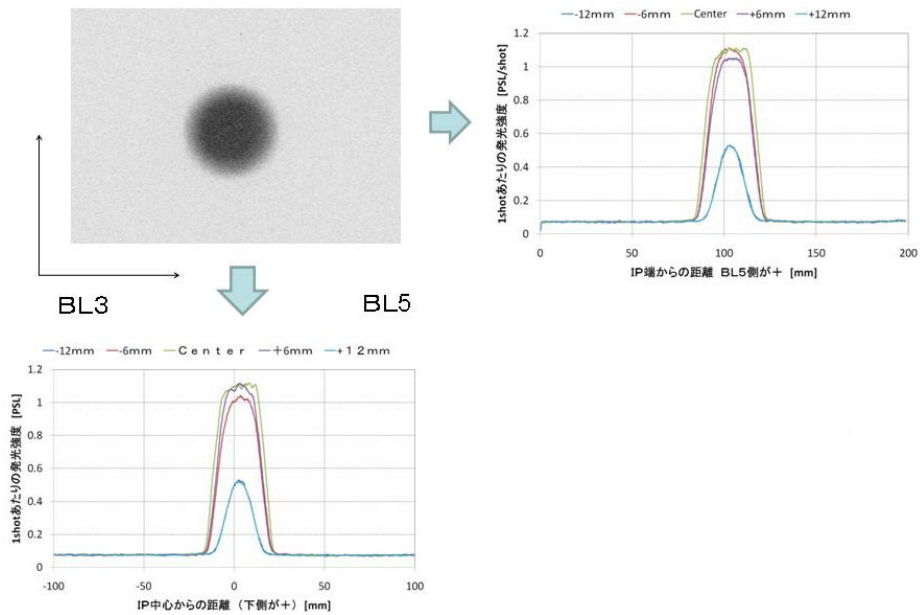


図 3-6 イメージングプレートにより測定した中性子ビーム断面の 2 次元強度分布と水平・垂直分布。

### 3.3 捕獲断面積測定のための測定法の開発

J-PARC における捕獲断面積測定のための測定装置および測定法の開発が行われている。全立体角 Ge スペクトロメータは、検出器の増設、測定回路系的高速化などを行うとともに、図 3-4 に示したように、検出器架台やシールドの製作、さらにサンプルチェンジャーの製作などが進められている。また、LLFP の測定では不純物元素が含まれている場合が多く、各アイソトープからのガンマ線を弁別して測定できるように、ある特定の共鳴吸

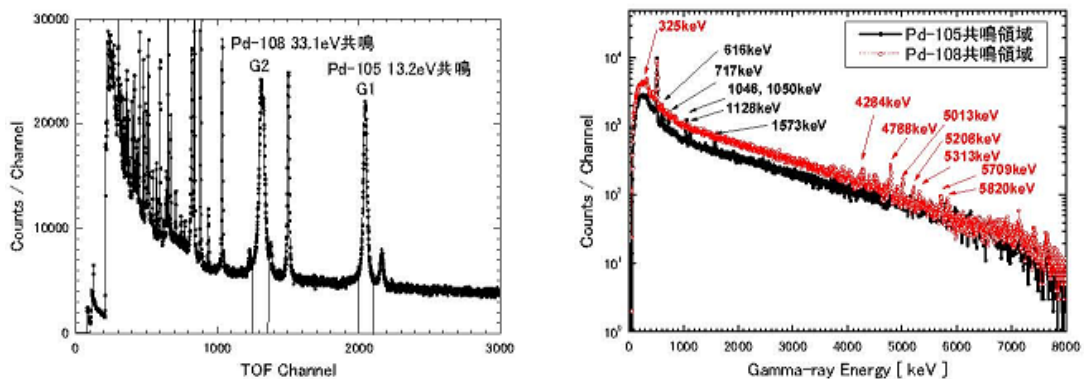


図 3-7 共鳴エネルギー（つまり中性子飛行時間）の違いによるアイソトープ弁別の実例。左図の G1 および G2 の時間にゲートをかけることにより、それぞれ Pd-105、Pd-108 からの  $\gamma$  線のみを測定することが出来る。

取の中性子飛行時間にゲートをかけて、その時間に入ったガンマ線を測定することによって、注目するアイソトープのガンマ線だけを取り出すことができるシステムを開発した[13]。図 3-7 にその例を示す。左側が共鳴吸収断面積の例で、G1 と G2 の時間ゲートをかけることによって、右の図に示すように特定のアイソトープだけのガンマ線エネルギースペクトルを得ることができている。この方法によって、種々のアイソトープが混在している場合でも、うまくゲートをかけることによって、核種弁別が可能であることが示された。

#### 4. おわりに

J-PARC MLF において中性子ビームが発生し、12 月からは一般ユーザーの実験も始められる。現在はまだ一般ユーザーが使用できる実験装置の数が少ないが、今製作中の実験装置もあり、これから中性子ビームを利用した研究が大きく発展していくことが期待される。核データ測定のための BL04 ビームラインでは、基本的な遮蔽体は平成 19 年度に完成しており、平成 20 年度は中性子ビーム特性の測定、検出器特性測定などを行う予定である。これらの結果に基づいてビームライン遮蔽・コリメーション等の最適化をさらに推し進め、平成 21 年度の Cm アイソトープなどの MA や Zr などの LLFP の測定へと進んでいく予定である。

#### 謝辞

本研究は、特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として、国立大学法人北海道大学が実施した平成 19 年度及び平成 20 年度「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」の成果を含みます。

また、執筆にあたり、大島博士をはじめとする JAEA のグループ、井頭博士をはじめとする東工大グループ、堀博士をはじめとする京大グループまた木野博士をはじめとする北大グループの協力を得ました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] D.J. Vieira, et al., “Neutron capture and (n,2n) measurements on  $^{241}\text{Am}$ ”, Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology 2007, p.551, April 22-27, 2007, Nice, France (2008).
- [2] E.-I. Esch, R. Reifarh, E.M. Bond, et al., “Measurement of the  $^{237}\text{Np}(n,\gamma)$  cross section from 20 meV to 500 keV with a high efficiency, highly segmented  $4\pi$  BaF2 detector”, Phys. Rev., C77, 034309 (2008).
- [3] C. Guerrero, et al., “The neutron capture cross sections of  $^{237}\text{Np}(n,\gamma)$  and  $^{240}\text{Pu}(n,\gamma)$  and its

- relevance in the transmutation of nuclear waste”, Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology 2007, p.627, April 22-27, 2007, Nice, France (2008).
- [4] K. Oikawa, F. Maekawa, et al., Nucl. Instrum. Meth. A 589, pp. 310-317 (2008).
- [5] F. Maekawa, et al., “NOBORU: J-PARC BL10 for Facility Diagnostics and Its Possible Extension to Innovative Instruments”, presented in the 1st J-PARC International Symposium on Pulsed Neutron and Muon Sciences (IPS 08), March 5-8, 2008, Mito, Japan, to be published in Nucl. Instrum. Meth. A..
- [6] S. Meigo, F. Maekawa, H. Nakashima, T. Ino, J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 1, 789 (2000).
- [7] プレス発表: 日本原子力研究機構発表:  
<http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08053004/index.html>、高エネルギー加速器研究機構発表 : <http://www.kek.jp/ja/news/press/2008/J-PARCMLF2.html>
- [8] K. Niita, H. Takada, S. Meigo, Y. Ikeda, Nucl. Instrum. Meth. B 184, 406 (2001).
- [9] H. Iwase, K. Niita, T. Nakamura, J. Nucl. Sci. Technol., 39, 1142 (2002).
- [10] プレス発表: 高エネルギー加速器研究機構発表:  
[http://www.kek.jp/ja/news/press/2008/J-PARC\\_SuperHRPD.html](http://www.kek.jp/ja/news/press/2008/J-PARC_SuperHRPD.html)、  
日本原子力研究機構発表: <http://www.jaea.go.jp/02/press2008/p08071701/index.html>.
- [11] Y. Kiyonagi, N. Watanabe and H. Iwasa, Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A312, pp.561-570 (1992).
- [12] K. Mizukami, S. Sato, H. Sagehashi, S. Ohnuma, M. Ooi, H. Iwasa, F. Hiraga, T. Kamiyama and Y. Kiyonagi, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol.529, 310-312 (2004).
- [13] M. Oshima, J. Hori, H. Harada, K. Furutaka, M. Koizumi, F. Kitatani, Y. Toh, A. Kimura, S. Nakamura, M. Igashira, M. Mizumoto, T. Ohsaki, T. Katabuchi, J. Nishiyama, and J Goto, Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007, p.603, Apr. 22-27, 2007, Nice, France (2008).