

J-PARC における断面積測定用ビームライン

東京工業大学原子炉工学研究所

井頭 政之

iga@nr.titech.ac.jp

1. はじめに

原研と KEK が共同で進めている大強度陽子加速器プロジェクト (J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex) の物質・生命科学実験施設 (MLF: Materials and Life Science Facility) では、2 年後の平成 19 年 10 月末に初陽子ビーム受け入れを予定している。MLF では最終的に 23 本の中性子ビームラインが建設される予定であるが、現時点では約半数のビームラインについて、初陽子ビーム受け入れ次期を睨んで、設計・製作が進んでいる[1]。

筆者等は、この MLF ビームラインの 1 本として、主に中性子核反応断面積を測定する「中性子核反応測定装置 (Neutron-Nucleus Reaction Measurement Facilities)」の設置を提案していたが、平成 16 年 8 月に本装置の建設が承認された。これまでも何回か本装置紹介の機会を得たが[2, 3]、本稿で改めて建設までの道のり、本装置を用いた研究等について紹介させて頂く。

2. 中性子核反応測定装置建設までの道のり

これまでの原子力分野における実験施設共同利用では、共同利用者は実験施設の建設には直接関与しないのが一般的であった。すなわち、共同利用者は施設が建設されて共同利用に供された後に共同利用申請を行い、申請が承認された場合に共同利用を行うことになる。一方、原子核・素粒子分野等では、研究者グループが大型加速器施設等の設置者側に実験装置設置の提案を行い、委員会等によって提案装置が審査され、提案が承認された場合に実験装置の建設に進むのが一般的であった。このような状況下、MLF では後者の方式が採用された。

このため、実験装置を提案するためには、まず、それなりの規模 (50 名程度以上) の研究者グループを形成する必要がある。当初、永井泰樹氏 (阪大) と連絡を密に取りながら天体核物理分野と核データ分野で研究者グループ形成を進め、途中から大島真澄氏 (原研) を幹事とする各種分析分野が加わり、約 100 名の研究者グループを形成するこ

とができた。並行して、MLFの第1回目の中性子実験装置提案書(LOI: Letter Of Intent)の締め切りが平成14年12月であり、これに向けてLOI作成を行った。LOI提出から現在までの主な年譜は下記の通りである。

- ・平成14年12月 「中性子核反応測定装置」提案書(LOI)の提出
研究テーマ名：宇宙核物理・加速器駆動型システム開発基礎・核種分析研究
- ・平成15年6月 審査結果：本テーマ及び実験装置について研究計画書の提出を求める。
- ・平成15年9月 実験装置設置詳細計画書の提出
- ・平成16年1月 基礎物理に関する中性子実験装置提案の公開ヒアリング
- ・平成16年8月 審査結果：建設に進むことを推奨する。
- ・平成17年3月 線分会(中性子源側と分光器側の打合会)に出席(以降、毎月1回)
- ・平成17年9月 「中性子核反応測定装置」建設幹事会を開催(以降、毎月1回)

年譜に書かれているように、実験装置設置詳細計画書を提出し、公開ヒアリングを受け、本装置の建設が無事認められた。ただし、審査結果の有効期限は3年間で、平成19年8月までに予算獲得・建設の見通しが得られない場合は、これまで装置提案の審査を行った中性子実験装置検討委員会での再検討が必要となる。なお、本装置には、#5ビームポート(上から見て、陽子進行方向(0°)から反時計回りで5番目(74.5°)で、水素減速材は結合型減速材(CM))がアサインされている。

本装置を設置したビームライン全体の概念図を図1に示す。図の左端がCMであり、右端が中性子ビームダンプである。ビームシャッターと生体遮蔽のダクト内に設置するコリメータ、前置遮蔽内部の全ての機器(コリメータ、遮蔽、フィルターセクション、図には描かれていないが各種中性子チョッパー、等)、前置遮蔽より下流側の全ての機器(遮蔽、補助コリメータ、ビームダンプ、各種検出器、等)を我々自身が設計・製作・設置する必要がある。各種検出器を除いても、最近の中国等の大量需要による鉄材の高騰もあり、ビームライン建設には2億円程度かかりそうである。

差し迫って設計・製作しなければならないのは、ビームシャッターと生体遮蔽のダクト内に設置するコリメータである。MLF全体の建設スケジュールに間に合わせるためには、平成18年春までに設計・製作しなければならない。「中性子核反応測定装置」建設幹事会(以下、建設幹事会。)を平成17年9月に開催し、これらのコリメータの設計・製作を決定した。

もう一つ非常に重大で、かつ、差し迫っていることは、放射性同位元素等使用許可申請のためのビームライン各所における線量評価計算である。これを、平成18年3月までに完了させる必要がある。実験装置設置詳細計画書を提出した際にも線量評価計算をMCNP4Cで行ったが(山野直樹氏(当時、住友原子力)による計算)、この際にはビーム

ラインを単純にモデル化した比較的簡単なものであった。今回は非常に詳細な線量評価計算を行う必要がある。そのためには、まず、コリメータ、遮蔽体、チョッパー、検出器配置、測定用試料、等々の全ての基本仕様・配置等を決定する必要があり、これらについて建設幹事会で早急に決定する予定である。現在、この線量評価計算については大崎敏郎氏（東工大）が担当しているが、協力者を募集せざるを得ない状況となってきた。

MLF では平成 20 年度はビームテスト期間で、平成 21 年 4 月から中性子ビームの実験供用が開始される予定である。しかし、最初から 1MW の陽子ビームを受け入れるのではなく、平成 21 年 4 月の時点で 70~100kW、それから徐々に強度を増加させ、平成 24 年度末に 1MW の受け入れを達成させる予定である。ビームテスト期間中は何時ビームが止まるか分からない状況だと予想されるが、線量評価計算の検証、各種検出器の動作試験、バックグラウンド特性試験と低減化、等々を行うことができると好機と考えている。従って、本装置（少なくとも線量評価計算に関連する主要部分）を遅くとも平成 19 年度末迄に設置し、種々の特性試験を平成 20 年度から開始したいと考えている。

本装置建設の予算については、競争的資金制度を含めて、幾つかのチャンネルを通して努力しているが、現時点では確定しているものは無い。このように、本装置建設までの道のりは未だ険しい状況であるが、「金は天下の回り者」と楽観的に考えている。

なお、本装置を我々自身で建設しても、我々のグループで本装置を独占できるわけではない。LOI 提出時に装置設置期間（ α 年）と装置占有率（ β %）を希望申告する必要がある、それぞれ 12 年と 60%を申告した。しかし、平成 16 年 8 月の審査結果には、「 α 年については、マシンが定常の供用運転になった時点から 5 年で見直す。」、「 β %については、中性子ビームが出る初年度に関しては施設側の負担、施設側のビームライン共通整備費、提案装置建設費等を考慮して決定され、2 年度以降は利用者協議会等で決定される予定。」と書かれている。また、「 β %以外のビームタイムに関しては、共同利用等での利用となり、その部分に関しては装置建設を行ったチームで研究支援を行うこと」と書かれている。

3. 中性子核反応測定装置を用いた研究計画

本装置を用いた研究テーマ「宇宙核物理・加速器駆動型システム開発基礎・核種分析研究」は、天体核物理グループ（世話人：永井泰樹氏（阪大））による「中性子反応と宇宙核物理」、核データグループ（世話人：筆者）による「マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ」、核種分析グループ（世話人：海老原 充（首都大東京））の「全元素同時・非破壊・高感度核種定量」の 3 つの大研究課題から構成されている。これらの研究課題を遂行するために、図 1 に示した「冷・熱領域~500keV 中性子ビーム輸送・コリメーションシステム」と「各種検出器」を用いる。MLF 核破碎中性子源の強度は米国 SNS 計画と肩を並べる世界最強クラスであり、これに我々が開発する高性能中性子ビーム輸送・コリメーションシステムとユニークな各種検出器を組み合わせること

により、冷・熱領域～500keV 中性子実験の新境地を開拓できると考えている。

なお、MLF ではダブルバンチの陽子ビーム（1 バンチの幅は約 100ns）を通常用いるため、中性子源のパルス幅は約 1,000ns となり、中性子エネルギー500keV までの測定は当面難しい。しかし、シングルバンチの運転を行えば中性子源のパルス幅は約 100ns となり、500keV までの測定が十分可能である。もちろん、シングルバンチ運転を行うためには、陽子ビームパワーがダブルバンチ運転に較べて半分になるので、MLF での圧倒的多数を占める中性子散乱グループの了解を得る必要がある。

各大研究課題の狙い、個別研究課題、及びスケジュールは以下の通りである。

(1) 中性子反応と宇宙核物理

ビッグバン直後の初期宇宙では Li までの軽元素が、また、その後の宇宙進化で形成された恒星の内部ではより重い各種元素が合成されてきた。「これら元素の種類・存在量」は「恒星の世代に特徴的」であり、宇宙の進化の歴史を紐解く上で「史跡」として重要な鍵を握っている。このため、これら「元素の起源と恒星の進化」について妥当なモデルを構築する事がビッグバン宇宙の歴史を解明する上で重要である。ところで、重元素は恒星内で s 過程、r 過程及び p 過程で合成される。本研究では、s 過程核合成に関連して(a) 低金属度恒星内元素合成、(b) 同位体異常、(c) 中性子密度、(d) 中性子源の諸問題を、r 過程核合成に関連して(e) r 過程元素合成、(f) 宇宙年齢、(g) r 過程元素合成と核分裂断面積の諸問題について、そして p 過程核合成に関連して(h) p 過程元素合成の諸問題に関連する原子核と速中性子との反応実験を通し解明する。

- ・平成 21～23 年度：軽原子核の中性子捕獲反応断面積の測定
- ・平成 24～26 年度：重原子核の中性子捕獲反応断面積の測定
- ・平成 27～29 年度：重原子核の非弾性散乱断面積の測定
- ・平成 30～32 年度：中性子誘起荷電粒子放出反応断面積の測定

(2) マイナーアクチニド及び長寿命核分裂生成物の中性子核データ

核分裂炉内で生成される長寿命核分裂生成物（LLFP）及びマイナーアクチニド（MA）を核変換・短寿命化することは、遠い子孫に負の遺産「放射性廃棄物」を残さないために重要である。この核変換基礎研究及び加速器駆動型システム（ADS）の核変換性能評価のためには、LLFP 及び MA の核変換・短寿命化を引き起こす中性子捕獲反応と核分裂反応の精度良い断面積データが不可欠である。また、ウランサイクルのみならずトリウムサイクルをも視野に入れたエネルギー増幅研究においても、これらのデータは不可欠である。本研究テーマではこれらの研究に関連して、0.5eV～500keV の入射中性子エネルギー領域で、(a) LLFP と MA の捕獲断面積の精密測定、(b) LLFP と MA の中性子捕獲ガンマ線スペクトルの測定、(c) MA の核分裂断面積の精密測定を行い、さらに測定結果を

理論解析することにより、(d) LLFP 及び MA の熱外中性子核反応の系統的研究を行い、中性子断面積の理論予測精度を向上させる。

本研究テーマは ADS 研究開発にタイムリーに資する必要があるため、装置完成後 6 年間で測定を、8 年間で研究を完了させる予定である。測定用試料の準備状況により多少の予定変更が予想されるが、現在計画している研究スケジュールは次の通りである。

- ・平成 20 年度：検出器特性試験、中性子場特性試験、バックグラウンド低減化
- ・平成 21、22 年度： ^{237}Np , $^{241,243}\text{Am}$, Cm , ^{99}Tc , ^{129}I , ^{107}Pd , ^{93}Zr の測定
- ・平成 23～25 年度： $^{242\text{m}}\text{Am}$, Cm , ^{79}Se , ^{126}Sn , ^{135}Cs の測定
- ・平成 26、27 年度：測定結果の総合的・系統的な理論解析

(3) 全元素同時・非破壊・高感度核種定量

核種定量分析は種々の研究分野で重要であるが、本研究では「高感度・高確度・多元素同時の核種定量分析法」を開発し、「材料科学」における(a) 鉄鋼製品中でのトランプ元素 (B や Sb に代表される元素) 濃度とバルク特性との相関、(b) 微小試料中の特定元素の偏析が特性変化へ及ぼす機構の解明、「環境科学」における(c) 米中のカドミウム濃度の迅速定量、(d) 底質堆積物と大気浮遊塵の多元素定量、(e) 環境放射性核種 ^{129}I の定量、「宇宙科学」における(f) pre-solar grain の非破壊検出、(g) pre-solar grain の同位体組成測定、「地球科学」における(h) 白亜紀-第三期境界層における元素の挙動の解明、(i) 白亜紀-第三期境界層以外の境界層における環境変動の原因解明、を多分野の研究者によって展開する。また、前述の(1)と(2)の研究において非常に重要な(j) 宇宙核物理と中性子核データ測定におけるサンプル中の核種定量、を行う。更に、「元素の 3 次元分布測定法」の開発を行い、(k) 考古学的試料の非破壊材質検査、(l) 球粒隕石内の稀な鉱物の非破壊探索、(m) 高純度材料中の不純物の分布測定、(n) 生きた生体試料中のリアルタイム元素分布測定、を展開する。

- ・平成 20、21 年度：検出器特性試験、極微量分析手法の確立、3 次元分析手法に必要な基礎データの取得
- ・平成 22、23 年度：極微量分析手法を用いた応用研究、3 次元分析手法の確立と基礎データの取得
- ・平成 24、25 年度：極微量分析手法を用いた応用研究、3 次元分析手法の確立

4. おわりに

本装置提案グループは現在約 100 名の構成であり、(1)～(3)の各大研究課題に 1 名の世話人と若干名の幹事を置いている。また、約 20 名の主要メンバーには、役割分担と参加可能日数等を申告して頂いている。文中で述べたように、線量評価計算が佳境に入りっており、今後、本提案装置を設置しプロジェクト研究を計画通り展開するには各方面か

らの直接・間接のご支援が必要であり、紙面を借りてお願いする次第である。なお、本プロジェクト研究に興味を持ち、参加希望の読者は筆者まで連絡願いたい。

参考文献

- [1] (編) 中性子施設開発グループ: J-PARC 物質・生命科学実験施設実験装置設置マニュアル (第1版), JAERI-Tech 2004-059 (2004).
- [2] 井頭政之, 永井泰樹: 原子核研究, Vol.47, No.1, 17 (2002).
- [3] 鬼柳善明, 他: 日本原子力学会誌, 46, 173 (2004).

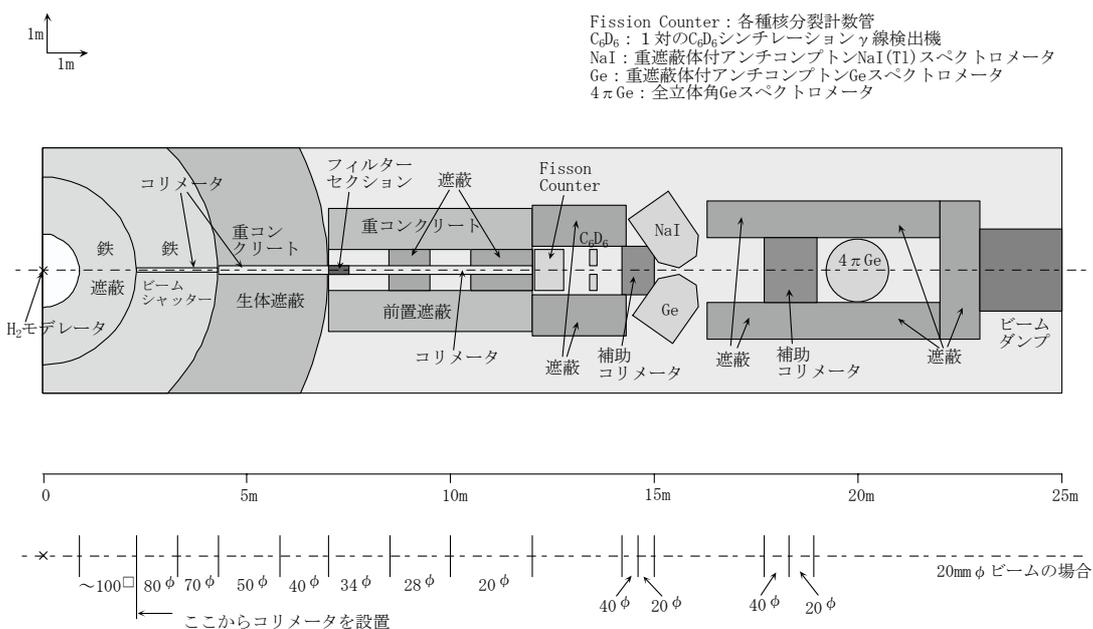


図1 中性子核反応測定装置を設置したビームライン全体の概念図