

「第2回 ANNRI 研究会」開催報告

共催：日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
J-PARC センター (JAEA&KEK)、東京工業大学 原子炉工学研究所
首都大学東京、日本原子力学会北関東支部、日本放射化学会
協賛：日本原子力学会 核データ部会

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
中村 詔司 nakamura.shoji@jaea.go.jp
藤 暢輔 toh.yosuke@jaea.go.jp
木村 敦 kimura.atsushi04@jaea.go.jp

東京工業大学 原子炉工学研究所
片渕 竜也 katabuchi.t.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

昨年に引き続き「第2回 ANNRI 研究会」が、2013年8月23日(金)10:00~19:00の日程で、茨城県東海村 いばらき量子ビーム研究センター1階会議室にて、日本原子力研究開発機構(JAEA)原子力基礎工学研究部門、J-PARCセンター(JAEA&KEK)、及び東京工業大学 原子炉工学研究所、首都大学東京、日本原子力学会 北関東支部、日本放射化学会との共同主催、及び日本原子力学会 核データ部会の協賛で実施された。写真1に参加者の集合写真を添えてある。

本研究会では、J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)に設置された中性子核反応測定装置(ANNRI)を用いた研究開発の現状と検討課題等の情報交換・共有、及び分野横断的なプロジェクト課題「パルス中性子による中性子核反応研究」を推進する上で、ANNRIにおける研究成果と今後の展望について総合的に討議した。

世間ではまだ夏休みの後半、気温30℃にも上昇する中、総数42名(内訳:JAEA/J-PARC:22名、大学:17名、他:3名)の参加者を得ることができた。出席者情報を、表1に纏めてある。複数の研究分野に関わる場合は、主な分野欄に記載した。



写真1 ANNRI研究会の参加者集合写真。(北谷氏撮影 H25年8月23日)

表1 ANNRI研究会における出席者情報

研究分野	出席者名 (所属)
宇宙核物理分野 (7名)	井頭政之 (東工大)、片渕竜也 (東工大)、寺田和司 (東工大)、早川岳人 (JAEA)、 牧井宏之 (JAEA)、瀬川麻里子 (JAEA)、Prof. Guinyun Kim (Kyungpook National Univ.)
元素分析分野 (7名)	海老原充 (首都大)、大浦泰嗣 (首都大)、松尾基之 (東大)、三浦勉 (産総研)、 関本俊 (京大炉)、藤暢輔 (JAEA)、初川雄一 (JAEA)
核データ測定分野 (13名)	原田秀郎 (JAEA)、小泉光生 (JAEA)、木村敦 (JAEA)、中村詔司 (JAEA)、 北谷文人 (JAEA)、原かおる (JAEA)、廣瀬健太郎 (JAEA)、水本元治 (東工大)、 鬼柳善明 (北大)、木野幸一 (北大)、堀順一 (京大炉)、八島浩 (京大炉)、 西尾勝久 (JAEA)
その他の分野 (15名)	池田裕二郎 (J-PARC)、茅野政道 (JAEA)、岡嶋成晃 (JAEA)、曾山和彦 (J-PRAC)、 五十嵐寛 (JAEA)、宮田登 (CROSS)、清水裕彦 (名大)、立澤遼太郎 (都市大)、 王岩 (岡山大)、広田克也 (名大)、大島真澄 (JCAC)、田村信行 (新潟大) 岩本修 (JAEA)、岩本信之 (JAEA)、國枝賢 (JAEA)

表に示したように、専門を異にする核データ測定分野、元素分析分野及び宇宙核物理分野からの研究者が集結し、測定装置 ANNRI を切り口に、自由闊達な討議が行われた。本報告の巻末、表 2 に本研究会のプログラムを添えてある。研究会の各セッションの概要を下記のとおり報告する。

2. 研究会の概要

(1) 開会挨拶

J-PARC 池田裕二郎センター長より開催の挨拶を頂いた（写真 2）。

はじめに 5 月 23 日のハドロン実験施設での放射性物質漏えい事故とそれに伴うマシンタイムのキャンセル等についてのお詫びがあった。また、事故以来、センター構成員一丸となって、信頼を回復すべく、事故の原因究明と再発防止に取り組んでいることや、ANNRI を用いたこれからの研究に対する期待を述べられた。



写真 2 J-PARC 池田センター長の開会挨拶。(撮影：J-PARC センター広報 Sc.)

(2) J-PARC/MLF と ANNRI 装置

○J-PARC センター 曾山和彦氏より、「J-PARC/MLF の現状」と題して発表がなされた。

ハドロン実験施設での放射性物質漏えい事故の概要やこれまで作業部会や有識者会議を通して検討してきた事項、ハドロン施設以外の施設の健全性の評価などについて報告された。

○北大 木野幸一先生より、ANNRI ビームラインとパルス中性子ビームについて報告された。ANNRI で利用できるパルス中性子ビームの特性が解説され、中性子強度は世界の他施設と比べて最強であること、また逆円錐コリメータを採用して、より切れの良いビームプロファイルになっていることが発表された。

○東工大 片瀧竜也先生より、ANNRI に設置されている NaI(Tl)スペクトロメータの開発状況について発表がなされた。NaI(Tl)スペクトロメータは特に keV 領域の高い中性子

エネルギー領域での測定が期待されている。更なる測定範囲を高エネルギー側へ拡張するために、新たに更新した高速信号処理について解説がなされた。本測定システムを⁹⁹Tc核種の断面積測定に適用した例を示し、100 keV程度までの断面積測定が可能となったことが報告された。更なる高エネルギー領域への拡張を目指した装置開発が進められている。

- JAEA 木村敦氏より、「大型 Ge スペクトロメータの現状と課題」と題して、発表があった。ANNRIでは放射線管理上の制約から、密封 RI 線源しか利用することができない。そのため、Cm等のRI線源を試料とする場合、AlやTiケースなどで密封する必要があることを述べられた。Alケースで封入しているCm試料の場合、バックグラウンド(B.G.)の約50%がケースによる散乱・吸収に起因してしまうことが示された。その対策として、中性子源から12mの位置に、絞り径可変式のXステージコリメータを製作・設置することにより、線源とケースに当たる中性子数の比を増加させ、かつB.G.を低減させることができたことが報告された。

(3) 核データセッション

- 「ANNRIにおける核データ測定研究」と題して、JAEA 原田秀郎氏より発表があった。始めに、ANNRIの3つの利用枠（Project 課題、装置課題、一般利用）について説明がなされた。一般利用では基礎物理、ニュートリノ物理などの分野に利用が広がってきているとのことである。核データ分野でのトピックスとして、Cm同位体の中性子捕獲反応断面積測定の成果や安定同位体、例えば¹¹²Snについて、その中性子共鳴に多くの新しい知見が得られてきていることを述べられた。本発表を受けて、本装置が、評価・測定・炉物理・放射化学など多岐の分野への波及効果を与えることが期待され、世界最高精度の国産核データ整備を目指し技術開発を進めるとともに、世界最高水準の研究者育成にも寄与していくことを期待する。
- 京大炉 堀順一先生より、「Ge 検出器を用いた⁹¹Zr 同位体の中性子捕獲断面積測定」について報告があった。ANNRIのGe検出器を用いて⁹¹Zr同位体の中性子捕獲ガンマ線スペクトル測定を行い、試料中に含まれるW、Hfの不純物の影響に注意して、基底遷移法を用いて中性子捕獲断面積の導出を行っていた。熱中性子エネルギー領域における断面積データの振舞が、過去に即発ガンマ線分光法で得られた熱中性子捕獲断面積を支持する結果となった。本発表を受けて、評価済ファイルに入っている **negative resonance** が要らないのではないか、という考えを持った。この点、最終的な解析結果を待ちたいと思う。
- JAEA 中村（筆者の一人）は、「Ge 検出器を用いた¹⁰⁷Pd、Pd 同位体の中性子捕獲断面積測定」と題して、LLFP核種の一つである¹⁰⁷Pdとともに、^{105,108}Pd同位体の中性子捕獲断面積測定について総括した発表を行なった。¹⁰⁷Pdの低エネルギー領域に報告されていた共鳴ピークの幾つかは、実は試料中に含まれていた不純物によるものをミスア

サインされていたことを報告した。

- 東工大 寺田和司氏より、「NaI(Tl)スペクトロメータを用いた ^{107}Pd の中性子捕獲断面積の測定」と題して発表がなされた。先の Ge 検出器での測定と同じ ^{107}Pd サンプルを用い、ANNRI 装置の下流に設置されている NaI(Tl)スペクトロメータを用い、Single bunch での分解能の良い測定結果が示された。現時点では、実験の概要と解析途中の結果を示されたので、今後のデータ解析で得られる結果が期待される。

(4) 分析セッション

- 首都大 海老原充先生が「ANNRI における放射化分析研究」と題して、発表された。首都大、JAEA、東大、産総研等との共同研究である産学官連携重点研究の経緯と概略について説明された。

今までの共同研究の経緯は、1990 年から研究炉 JRR-3 での PGA (Prompt Gamma-ray Analysis) 研究が始まり、2004 年からは、JRR-3 にて MPGA (Multi-Prompt Gamma-ray Analysis) のプロジェクト研究が開始した。産学官連携重点研究は、①2003 年～2005 年、②2006 年～2008 年、③2009 年～2011 年、④2012 年～2014 年と続き、現在に至っている。

これまでに、産学官連携重点研究をとおして検出限界を 1 桁程度下げてきた。そして、これからの ANNRI におけるパルス中性子を用いた飛行時間法による新しい元素分析法 (TOF-MPGA) の開発においても、これまでと同じように宇宙、環境、産業、地質などの分野と協力して進めたいと考えている、とのことである。

- 東大 松尾基之先生より「環境試料の放射化分析研究」と題して、元素分析による環境試料の研究結果が発表された。

①STELLA を用いた MPGA で、通常の放射化法では分析できない B、Cd、Hg、S、Si の元素分析が可能であること、また湿式では定量が困難である S、Si、B の定量が出来たことが述べられた。更に、高効率化により測定時間の短縮化が図られている。

②Cd 試料の検出限界の向上を、2007 年より進められている。 $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$ 反応を用いて、Cd 試料の同時計測を行い東京都の北十間川底より 8.4ppm の汚染があることを報告された (谷津干潟では 0.46ppm で、これは平均的な Cd 量とのことである)。

③鹿児島湾の海底堆積物より Sb 鉱床の発見について述べられた。海底火山の噴出物についてまだ不明な点が多いとのことである。As、S、Mn などの分析を行なっておられ、特に S の分析については、従来法に比べて MPGA の方が有利であった、との報告があった。

④雪氷中の Cd 検出 (2007 年～2009 年) に関して、立山黒部アルペンルート of 雪の試料に含まれる Cd の定量分析について発表がなされた。

- 産業技術総合研究所 三浦勉氏より「重金属分析用 PP 樹脂ペレットを用いた多重即発ガンマ線分析法による Cd 測定能力の評価」と題して発表があった。プラスチックに金属系を混ぜ込んだ試料を用いて、即発ガンマ線分光法により Cd、Hg の分析を行なった結果についての報告であった。分析において、試料温度の影響や H の散乱による影響などが議論された。
- JAEA 藤暢輔氏より「パルス中性子を用いた即発ガンマ線分析法開発の現状」と題して、MPGA と飛行時間法、中性子放射化法を組み合わせた新たな分析手法“TOF-MPGA”の開発について報告がなされた。特に貴重な試料の分析に有効である高精度・高確度な新しい非破壊分析法を確立すべく研究開発を実施してきていることを発表された。混合サンプル (Ag, Au, Cd, Co, Ta) の測定例を示し、従来法では Co を分析することが困難であったが、PGA と TOF 法を組み合わせた新しい手法により明確に元素を弁別でき、これにより、信頼性の高い定量結果が得られると報告された。また、解析ソフトやハードウェアの改良等に関する計画も報告された。



写真3 研究会会場の様子。(いばらき量子ビーム研究センター1階会議室にて
撮影：J-PARC センター広報 Sc.)

(5) 宇宙核物理セッション

○東工大 井頭政之先生より「ANNRIにおける宇宙核物理研究」と題して、宇宙核物理研究の概要が発表された。ANNRI装置は、2003年9月に纏められた「実験装置詳細計画書」が始まりとのことで、宇宙核物理、加速器駆動型システム開発基礎、および核種分析研究のために提案され、熱領域から500keVの中性子ビームを利用して研究を行うことが考えられていたとのことである。

3つの研究テーマ

- ①速中性子反応と宇宙核物理
- ②MAおよびLLFPの中性子核データ
- ③全元素同時・非破壊。高感度核種分析

を掲げて、研究に係る組織メンバーは、総勢96名にも及んでいた。

このうち宇宙核物理研究については、下記のような重要な問題を列挙された。

- 低金属度恒星内元素合成
- 同位体異常
- 中性子密度
- 中性子源の諸問題
- r過程元素合成
- 宇宙年齢
- r元素合成と核分裂断面積の諸問題
- p過程元素問題

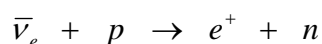
○JAEA 早川岳人氏より「s過程におけるアイソマーの役割」と題して発表が行われた。

遅い中性子捕獲反応過程において、アイソマーの存在する弱い分岐核への中性子捕獲反応のチェーンが重要な役割を持つのではないかと着目し、数核種が該当することを挙げられた。 ^{113}Cd もその一つであり、 ^{115}Sn の天体起源を解明するために、 $^{113\text{m}}\text{Cd} \rightarrow ^{113}\text{In}$ の生成チェーンを考えて、ANNRIを用いて中性子捕獲断面積を測定されたことを述べられた。測定では ^{112}Cd 濃縮試料を使用した。熱領域においては試料中の不純物である $^{113}\text{Cd}(0.6\%)$ の影響がやや大きいとのことであった。発表を受けて、重要な熱外領域の解析はこれから進めていく予定とのことであり、今後の研究の進捗を注目していきたい。

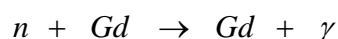
○JAEA 牧井宏之氏が、「鏡映対称性*の検証に向けたLi同位体の中性子捕獲ガンマ線の測定」と題して発表された(*鏡映対称性とは、同じ質量数でpとnを入れ替えた関係にある2つの原子核のことである)。 $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$ は、水素燃焼と太陽ニュートリノに係る反応であるが、ここで、 ^7Be は $\sim 3\text{nb}$ のオーダーであるので、測定は非常に難しいとのことである。それに対し、 ^7Be の鏡映核 ^7Li は μb のオーダーを持つので、断面積の大きき有利な点から測定困難な(p, γ)反応を鏡映核の(n, γ)反応で決定できないか、とのアイデアを得られ、それを実験検証する試みを発表された。

(6) 一般課題等

○岡山大 王 岩氏より「Cdの熱中性子捕獲実験」と題して、ANNRIのGe検出器を用いたCd試料の測定について発表がなされた。ニュートリノ検出器として新たにGd添加水チェレンコフ検出器のテストタンクの建設が進められていることが報告された。Gd添加の検出器では、従来の反応



で陽電子による信号を検出するのに加えて、発生した中性子を、



により添加したGdに捕獲させて、放出されるガンマ線をも新たな信号として取り込むとのことである。陽電子とガンマ線の2つの信号の遅延同時計測によりニュートリノ検出精度を向上させて、超新星背景ニュートリノ検出の実現を目指すものであり、これは世界初の試みであるとのことである。

Gd添加の検出器開発の一環として、ANNRIを用いたGd(n,γ)反応の γ 線スペクトル、 γ 線多重度、角度相関を調べた解析結果が報告された。

○名大 清水裕彦先生より「複合核共鳴における離散的対称性の破れの研究」と題して、発表がなされた。理論的な枠組みから、時間対称性の破れが、複合核共鳴における増倍効果により観測されることを議論された。

$$|\Delta\sigma_T| < 2.5 \times 10^{-4} (b) \times \kappa(J)$$

増倍に係るパラメータ $\kappa(J)$ が大きい核種を使用すれば、検証実験に有利であることを解説された。

○JAEA 西尾勝久氏が、「ANNRIにおけるマイナーアクチノイド核分裂断面積の測定」と題して発表された。J-PARC/MLFにおける中性子核分裂研究を進めるための準備段階として、核分裂断面積の測定を行った。現在MLFでは非密封放射性同位体を使用することが許可されていないため、西尾氏らは密封RI試料(^{241}Am)を用い、核分裂に伴う即発中性子を検出することで核分裂事象の測定を試みられていた。得られた中性子核分裂・捕獲イベントのTOFスペクトルの結果などを報告された。

(7) 自由討論

本セッションでは、今までのセッション全体を受けて、参加者の意見、要望などを自由に議論して頂いた。自由討論で出された参加者からの下記のような意見・要望などを頂いた。

○ハードウェアは日々、更新して行って欲しい。

○ユーザーフレンドリーなソフトウェアなどは、纏まった段階で公開、提供してほしい。

- ランニングスタンダードを提供してくれると、実験の際、装置の調子を判断できる。
- RI の非密封試料の使用できると良い。
- J-PARC は、炉に比べると、ノイジーだと思っているが、皆さんのデータを見て、質の良い結果を出されていると感じている。
- シングルバンチの運転日を増やしてもらいたい。
 - 現状で解析可能な中性子エネルギーとシングルバンチにおいて解析可能となる中性子エネルギー範囲を示していくことによって、マシンタイム 100%とはいえないでも、シングルバンチの提供が可能になっていくのではないか。
 - シングルバンチを要求するには、第三者を納得させるための定量的な情報を提示する必要があるだろう。例えば、年間 20%のシングルバンチ運転だとこれだけの良い成果を出すことができる、というように示さなければならない。

(8) 閉会挨拶

原子力基礎工学研究部門 茅野政道 部門長より閉会の挨拶を頂いた。今後の機構改革の柱として、①福島原発、②安全、③核燃料サイクル、そして④人材育成と基礎基盤がある。基礎基盤は裾野が広いので、直接・間接的に原子力を支える上で重要であることや、人材育成については、ANNRI でのサイエンスの成果により学生達に入社したいと感じてもらいたいことなどの期待が述べられた。また、核変換技術、核データ測定については、研究関係者のお力を借りて成果を出していくことを希望され、閉会の挨拶を終えられた。

3. 最後に

異なる3つの各研究分野で活躍する著名研究者が多く参加した第2回 ANNRI 研究会は、盛況のうちに研究会を終えました。

来年、第3回 ANNRI 研究会を開催していきたいと考えております。本報告を読んで次回の研究会に参加してみようと、ご興味を持っていただければ幸いに存じます。

それでは、次回の研究会にてお会いしましょう。

謝辞

当研究会の共同主催、及び協賛のために支援いただいた日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門、J-PARC センター (JAEA&KEK)、東京工業大学 原子炉工学研究所、首都大学東京、日本原子力学会北関東支部、日本放射化学会、日本原子力学会 核データ部会の関係各位に、この場を借りて感謝の意を申し上げます。

(研究会幹事一同より)

表 2 研究会プログラム

第 2 回 ANNRI 研究会プログラム 副題： ANNRI における研究成果と今後の展望	
日 時：	平成 25 年 8 月 23 日（金）10 時～19 時
開催場所：	茨城県東海村 いばらき量子ビーム研究センター
10:00～10:05	
1. 開会：	<ul style="list-style-type: none"> ・「あいさつ」 池田 裕二郎(J-PARC) (5)
10:10～11:30	
2. J-PARC MLF と ANNRI 装置：[藤 暢輔(JAEA)]	<ul style="list-style-type: none"> ・「J-PARC/MLF の現状」 曾山 和彦(J-PARC) (20) ・「ANNRI ビームラインとパルス中性子ビーム」 木野 幸一（北大）(20) ・「ANNRI における NaI(Tl)スペクトロメータの開発」 片渕 竜也（東工大）(20) ・「大型 Ge スペクトロメータの現状と課題」 木村 敦（JAEA）(20)
12:00～13:00 昼食（休憩）	
13:00～14:15	
3. 核データセッション：[片渕 竜也(東工大)]	<ul style="list-style-type: none"> ・「ANNRI における核データ測定研究」 原田 秀郎(JAEA) (15) ・「Ge 検出器を用いた Zr 同位体の中性子捕獲断面積測定」 堀 順一（京大炉）(20) ・「Ge 検出器を用いた Pd-107、Pd 同位体の中性子捕獲断面積測定」 中村 詔司（JAEA）(20) ・「NaI(Tl)スペクトロメータを用いた Pd-107 の中性子捕獲断面積の測定」 寺田 和司（東工大）(20)
14:15～14:20 休憩（5 分）	
14:20～15:35	
4. 分析セッション：[木村 敦(JAEA)]	<ul style="list-style-type: none"> ・「ANNRI における放射化分析研究」 海老原 充（首都大）(15) ・「環境試料の放射化分析研究」 松尾 基之（東大）(20) ・「NMIJ CRM 8133a（重金属分析用 PP 樹脂ペレット）を用いた 多重即発ガンマ線分析法による Cd 測定能力の評価」 三浦 勉（産総研）(20) ・「パルス中性子を用いた即発ガンマ線分析法開発の現状」 藤 暢輔（JAEA）(20)
15:35～15:50 Coffee Break（15 分）	

15:50～16:45
<p>5. 宇宙核物理セッション：[堀 順一(京大炉)]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「ANNRIにおける宇宙核物理研究」井頭 政之（東工大）（15） ・「s過程におけるアイソマーの役割」早川 岳人（JAEA）（20） ・「鏡映対称性の検証にむけた Li 同位体の中性子捕獲ガンマ線の測定」 牧井 宏之（JAEA）（20）
16:45～17:45
<p>6. 一般課題等：[中村 詔司(JAEA)]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「Gdの熱中性子捕獲実験：生成γ線のエネルギー分布、多重度、角度相関の測定」 王 岩（岡山大）（20） ・「複合核共鳴における離散的対称性の破れの研究」清水 裕彦（名大）（20） ・「ANNRIにおけるマイナーアクチノイド核分裂断面積の測定」 西尾 勝久（JAEA）（20）
18:00～18:30
7. 自由討論（30分）：[原田 秀郎(JAEA)]
<p>8. 閉会</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「あいさつ」茅野 政道(JAEA) (5)

[] は進行役

() は発表時間（討論を含む）