



## 「第3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センター  
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

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター

中村 詔司 [nakamura.shoji@jaea.go.jp](mailto:nakamura.shoji@jaea.go.jp)

藤 暢輔 [toh.yosuke@jaea.go.jp](mailto:toh.yosuke@jaea.go.jp)

木村 敦 [kimura.atsushi04@jaea.go.jp](mailto: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](mailto:katabuchi.t.aa@m.titech.ac.jp)

### 1. はじめに

「第3回 ANNRI 研究会」が、2014年9月1日(月)10:00~17:40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センター、J-PARC センター(JAEA&KEK)、首都大学東京、及び東京工業大学 原子炉工学研究所との共同主催で開催された。

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(Accurate Neutron-Nucleus Reaction measurement Instrument: 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。

小中学校は夏休み明けの初日、遠方からの参加も頂くことができ総数33名(内訳: JAEA/J-PARC:19名、大学:12名、他:2名)の参加者を得ることができた。写真1に参加者の集合写真を添えてある。また、出席者の情報を、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 H26 年 9 月 1 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 （6名）	井頭政之（東工大）、片渕竜也（東工大）、早川岳人（JAEA） 牧井宏之（JAEA）、瀬川麻里子（JAEA）、広田克也（名大）
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）、 久保謙哉（国際基督教大）、三浦勉（産総研）、藤 暢輔（JAEA）、 黄明輝（JAEA）
核データ測定分野 （12名）	原田秀郎（JAEA）、木村 敦（JAEA）、中村詔司（JAEA）、 北谷文人（JAEA）、水本元治（東工大）、大槻勤（京大炉）、 木野幸一（北大）、堀 順一（京大炉）、原かおる（北大）、 寺田和司（JAEA）、中尾太郎（JAEA）、Leong LouSai（JAEA）
その他の分野 （8名）	岡嶋成晃（JAEA）、及川健一（J-PARC）、大島真澄（JCAC）、 岩本 修（JAEA）、岩本信之（JAEA）、柴田恵一（JAEA）、呉田昌俊（JAEA）、 小泉光生（JAEA）

表 1 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

岡嶋センター長より開催の挨拶を頂いた(写真2)。J-PARC の ANNRI 装置開発に関わる共同研究者の尽力に謝意を表されるとともに、本研究会を契機として ANNRI 装置を用いた研究の活性化がなされ、その必要性と意義の明確化と、それに伴う研究の発展に対する期待などを述べられた。



写真2 原子力基礎工学研究センター  
岡嶋センター長の開会挨拶

### (2) J-PARC/MLF と ANNRI 装置

○ 核工学・炉工学ユニット 原田秀郎ユニット長より、「ANNRI への期待」と題して発表がなされた。ANNRI 装置開発の経緯を述べられるとともに、本年度 4 月の基礎工センター内の組織変更と、それに伴う ANNRI 装置維持やプロジェクト研究等の体制変更などについて述べられた。JAEA 内の研究グループ間、及び外部の共同研究者との連携により、特色のある ANNRI 装置における研究をより一層進展させたいと述べられた。

○ J-PARC センター 及川健一氏より、「パルス中性子応用サブグループの紹介」と題して発表をいただいた。BL04 の ANNRI、BL05 の NOP、BL10 の NOBORU、BL22 の RADEN 装置を含むパルス中性子応用サブグループが紹介された。本サブグループは MLF の他のビームラインとは異なる特色のある実験装置によって構成されており、それらの装置の紹介と、マシンタイムの利用実績、最近の研究トピックスや今後期待される研究などが紹介された。

○ 北大 木野幸一先生より、「ANNRI パルスビームの時間分解能評価」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時間分解能の特性について解説され、フィットで得られたパルス関数を示された。この発表を受けて、パルス関数のデータは公開されるのかという質問があり、BL04 ユーザーと協議の上、公開を判断したいとのことである。また、時間分解能の信頼性については、REFIT コードへの組み込みを

行い、検証を進めているとのことである。

- 東工大 片渕竜也先生より、「ANNRIにおけるNaI(Tl)スペクトロメータの開発」と題して、NaI(Tl)スペクトロメータの測定に使用するDAQ開発の進捗について発表がなされた。NaI(Tl)スペクトロメータは、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おり、測定範囲をより高エネルギー側へ拡張するために、DAQ開発を進められている。中性子捕獲断面積測定について、Tc-99、Am-241及びPd-107について、データ解析が行われているとのことである。現状では、300 keV程度までの断面積測定が期待できることが報告された。

### (3) 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。中性子ビーム利用元素分析の推移について説明された。今までの共同研究の推移は、
  - 1990年から研究炉JRR-3でのPGA (Prompt Gamma-ray Analysis) 研究が開始した。
  - 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、第4ステージに入っている。

そして、現在ANNRI BL04における分析に至っている。

パルス中性子を用いた飛行時間法による新しい多重即発ガンマ線分析 (TOF-MPGA) は、共鳴を用いることで、よりS/N比を向上することができる。装置の高度化を進めるとともに、宇宙化学的試料、環境化学的、材料化学的、標準物質への適用を視野に入れている。

最後に、ANNRIを用いた核種分析の展望を述べられた。研究炉とANNRIを補完し合うことで、通年の分析研究ができる。しかし、ANNRIと研究炉を比較すると、(中性子束強度の点で)現時点では研究炉の方が優れている。そこで、パルス中性子を用いる事が出来るという利点を生かした“ANNRIでしかできない分析を考えるべき”、とのお考えを述べられた。

- 東大 松尾基之先生より、「ANNRIによる環境試料中の微量中・重元素の分析に向けて」と題して、環境試料の元素分析の研究が発表された。JRR-3Mに設置されている装置STELLA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等の高感度分析を実施してきた経緯を述べられた。Cd、Hgの汚染を評価するためにCdの検出限界の向上を進めてきており、同時計測を行うことで、検出感度を向上させた。Cd-113(n,γ)Cd-114反応を用いて、環境試料を分析した場合、測定に100時間を要

する場合もあり、更なる高感度化が望まれるとのことである。

そこで、STELLA より高感度の ANNRI で、共鳴にゲートをかけて環境試料の測定を行う。しかし、ダブルピークは、分析としても不都合な場合があるとのことである。

- 産業総合研究所 三浦勉氏より、「J-PARC BL04 ANNRI による銀パラジウム合金の分析」と題して発表があった。先ず、所属されている産総研の計測標準研究部門は、標準物質を開発、供給しているとのことである。例えば、CCQM-K87 1000ppm の鉛の標準液を 0.5% の精度で供給している。

中性子放射化分析（相対法）を用いて、ANNRI で新しいことができないか検討されていた。原子炉の中性子束は  $1.5 \times 10^{13}$  オーダーであり、一方 ANNRI は  $10^7$  オーダーであるが、中性子エネルギー毎に分別できるという利点がある。主成分分析に応用可能性を示し、溶解することが困難な試料について ANNRI の有効性を検討されていた。

- JAEA 藤暢輔氏より、「パルス中性子を用いた多重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。

従来法では、Co を分析することが困難な場合があったが、開発した TOF-MPGA 法では、混じりのない綺麗なスペクトルが得られるとのことである。Co の検量線を従来法で引くと、妨害によってピークに混じりこみが生じてしまい、ばらついてしまう。原因は、Co に Ag と Ta などの共鳴ピーク（ガンマ線ピーク）が重なってしまうためである。しかし、TOF-MPGA だと、妨害を受けずに Co の検量線を引くことができるとのことである。

その他、ビームダクト、サンプルチェンジャの更新、整備状況について報告された。従来のビームダクトだと位置が動いてしまうが、更新したダクト、チェンジャでは、誤差 0.1mm の精度で位置の再現性があるとのことである。

#### (4) 核データセッション

- JAEA 木村敦氏より、「ANNRI における核データ測定研究」と題して、発表があった。ANNRI 装置の概要を説明された後、①遮蔽体強化、②全断面積測定体系の整備、③DAQ の更新、④今後の測定計画について報告された。断面積測定については、Sn-112 の場合について発表された。共鳴のミスアサインが、測定データと評価データと比較して示された。安定核種であっても、データが不十分であることが示された。今後、安定核種のなかで、構造材など重要な核種を選定し、系統的な測定を行うことを考えている、とのことである。

- 京大炉 堀順一先生より、「Ge スペクトロメータを用いた Zr 安定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 検出器を用いた Zr-90,91,92,94,96 の測定について、総括して報告された。中性子強度関数、核構造にもからみ、特にスピンの新たな知見が得られている。
- JAEA 中村詔司（筆者）は、「Ge スペクトロメータを用いた Pd-106 共鳴の探索」と題して、発表を行なった。Pd-106 に報告されている弱い共鳴が、実際に存在するのかどうか、不純物の寄与をミスアサインしていないかどうかを実験的に確認した。捕獲ガンマ線でゲートをかけて TOF スペクトルを抽出した結果、146eV、156eV の共鳴ピークが観測され、確かに Pd-106 に起因することを確認した。
- JAEA 寺田和司氏より、「NaI(Tl)スペクトロメータを用いた中性子捕獲断面積の測定」と題して発表がなされた。ANNRI の NaI(Tl)スペクトロメータを用いた Pd-107 の断面積測定の結果が報告された。暫定結果であるが、熱中性子捕獲断面積は、過去の測定値より 14%程小さい結果になった、とのことである。また、Nd-142 の捕獲断面積の測定結果が報告された。

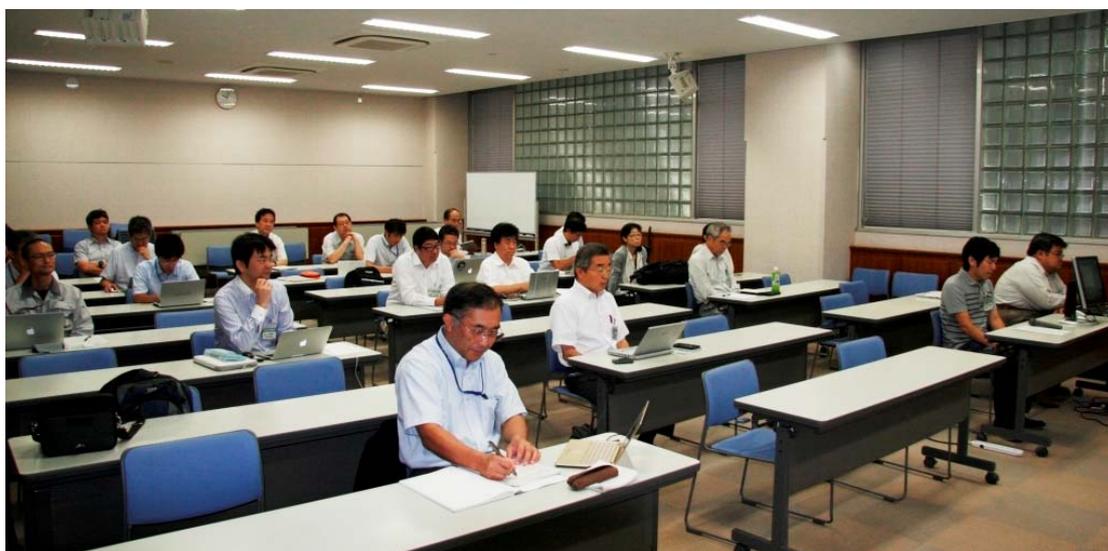


写真3 研究会会場の様子（いばらき量子ビーム研究センター1階会議室にて）

##### (5) 宇宙核、基礎物理セッション

- 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 装置の建設経緯について、2003年9月に纏められた「実験装置詳細計画書」が源流とのことで、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。詳細計画書提出から 11 年経過したことになる。研究テーマとして、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、そして③全元素同時・非破壊。高感度核種分析が掲げられた。宇宙核物理メンバーの世話人は、永井泰樹先生であった。

宇宙核物理研究については、次のような問題を列挙された。①低金属度恒星内元素合成、②中性子密度の問題、③分岐原子核の中性子捕獲断面積、④中性子源の問題、⑤ r -process 元素合成と核分裂断面積

- JAEA 早川岳人氏より、「Cd-112(n,γ)反応と Sn-115 の天体起源」と題して発表が行われた。天体起源が不明な同位体は 8 個あり、Sn-115 はそのうちの 1 つである。

Sn-115 の天体起源を解明するために Cd-113 に着目し、Cd-113 の中性子捕獲においてアイソトープとグラウンドへの生成比が 33% あれば、起源を説明できそうだと、との考えを述べられた。ANNRI を用いた中性子捕獲断面積測定の結果を報告された。

- JAEA 牧井宏之氏は、「Be-9 の中性子捕獲断面積測定」と題して発表された。Be-9(n,γ)Be-10 反応について、誤差を越えてデータのばらつきがある。Be-9 は、非常に小さい断面積のため実験が難しい。実験では、高純度の Be-9 試料 99%、重量 20mg、サイズ 5mmΦ×0.8mm を使用していた。TOF スペクトルでゲートをかけて、ガンマ線スペクトルを抽出し、6.8MeV ガンマ線の収量から断面積を導出された。今後、keV 領域の断面積測定を、ANNRI の NaI(Tl)検出器が設置されている位置で、LaBr<sub>3</sub> 検出器を持ちこんで実験することを計画している、とのことである。

- 名大 広田克也先生は、「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、発表を行なった。複合核共鳴における増倍効果により、時間対称性の破れが大きく観測されることを議論された。La-139 で、10% 程の破れが観測されている。原因として、s 波と p 波の干渉により、破れが増幅される、と考えられている。

検証実験には、偏極中性子を用い、ターゲットも偏極させて、 $\sigma \cdot (\kappa \times I)$  という量を測定するとのことである。偏極ターゲットは、Xe-131、Br-81、La-139 などはレーザーで作しやすい、しかし In については不明であるとのこと。

破れの探索のための予備実験を実施しており、La-139 の解析を進めているところであり、In-115 について詳しく解析を進める予定であることが報告された。

## (6) 自由討論

本セッションでは、○ANNRI の共用化に向けて、○ユーザーが ANNRI に望む事、○融

合研究、○人材育成、等を討論の種にし、参加者に自由に議論して頂いた。

参加者の意見・質疑応答・要望などを、下記のように纏めてある。

- Single Bunch が必要ということに関して、例えば、600ns の幅を 200ns に縮めることは可能か？ ⇒ 変えられないとのこと。
- Single Bunch が欲しい他の BL はないか？ ⇒ 積極的な BL はない。
- ビーム強度が徐々に増強されていくが、600kW で Single Bunch にできるのか？  
⇒ 発熱のために Single Bunch にできない。  
過去の Single Bunch では、Double で出して、片方をカットしていた。
- Single Bunch 割合を増やしてもらおう。
- 応募がたくさんないと共用化は難しい。  
⇒ ANNRI を知らない人が多いのではないかな？  
アナウンス、PR する必要がある。  
原子核分野でも知名度がない。  
こういう成果が出るということ、シンポジウム等でアピールする。
- 共用化になるためには、産業利用が問われる。共同利用の中に産業利用のユーザーが徐々に入ってくるようにとこしなないといけない。
- 学生が興味を持って BL を使ってくれて、利用者が増えれば良い。  
⇒ 学生が加わっているかないかで、マンパワーが違ってくる。  
⇒ 加速器が時々止まるなどの不安定な要素がある。  
⇒ 実験できなかった場合、予備のマシントイムがあると良い。  
優先順位を付けて、学生に配分してあげるとか。

## (8) 閉会挨拶

原子力基礎工学研究センター 核工学・炉工学ユニット 原田ユニット長より閉会の挨拶を頂いた。

## 3. 最後に

異なる3つの各研究分野で活躍する研究者が多く参加した第3回 ANNRI 研究会は、盛況のうちに研究会を終えました。ANNRI 装置が、放射化学・評価（理論）・測定・炉物理など多岐の分野への波及効果を与えられるよう、世界最高精度の国産核データ整備を旨と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きたい。

2015年に、第4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ご興味を持っていただければ幸いです。

## 謝辞

当研究会の共催にご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センター、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

<b>第 3 回 ANNRI 研究会プログラム</b> 副題：ANNRI における研究成果と今後の展望	
日 時：	平成 26 年 9 月 1 日 (月) 10 時 ~ 17 時 40 分
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：	
・「あいさつ」	岡嶋成晃 (JAEA) (5)
10:10~11:30	
2. J-PARC MLF と ANNRI 装置：[藤 暢輔 (JAEA) ]	
・「ANNRI への期待」	原田秀郎 (JAEA) (20)
・「パルス中性子応用サブグループ紹介」	及川健一 (J-PARC) (20)
・「ANNRI パルスビームの時間分解能評価」	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)
12:00~13:00 昼食 (休憩)	
13:00~14:15	
3. 分析セッション：[木村 敦 (JAEA) ]	
・「ANNRI における放射化分析研究」	海老原充 (首都大) (15)
・「ANNRI における環境試料中の微量中・重元素の分析に向けて」	松尾基之 (東大) (20)
・「J-PARC BL04 ANNRI における銀パラジウム合金の分析」	三浦 勉 (産総研) (20)
・「パルス中性子を用いた多重即発ガンマ線分析法開発の現状」	藤 暢輔 (JAEA) (20)
14:15~14:20 休憩 (5分)	

14:20～15:35
<b>4. 核データセッション：[片渕竜也（東工大）]</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「ANNRIにおける核データ測定研究」<span style="float: right;">木村 敦（JAEA）（15）</span></li> <li>・「Ge スペクトロメータを用いた Zr 安定同位体の中性子捕獲断面積測定」 <span style="float: right;">堀 順一（京大炉）（20）</span></li> <li>・「Ge スペクトロメータを用いた Pd-106 共鳴の探索」<span style="float: right;">中村詔司（JAEA）（20）</span></li> <li>・「NaI(Tl)スペクトロメータを用いた中性子捕獲断面積の測定」<span style="float: right;">寺田和司（JAEA）（20）</span></li> </ul>
15:35～15:50 Coffee Break（15分）
15:50～17:05
<b>5. 宇宙核、基礎物理セッション：[堀 順一（京大炉）]</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「ANNRIにおける宇宙核物理研究」<span style="float: right;">井頭政之（東工大）（15）</span></li> <li>・「Cd-112(n,<math>\gamma</math>)反応と Sn-115 の天体起源」<span style="float: right;">早川岳人（JAEA）（20）</span></li> <li>・「Be-9 の中性子捕獲断面積測定」<span style="float: right;">牧井宏之（JAEA）（20）</span></li> <li>・「複合核共鳴における離散的対称性の破れの研究」<span style="float: right;">広田克也（名大）（20）</span></li> </ul>
17:05～17:10 休憩（5分）
17:10～17:40
<b>6. 自由討論（30分）：[中村 詔司（JAEA）]</b>
<b>7. 閉会挨拶</b> <span style="float: right;">原田秀郎（JAEA）（5）</span>

[ ] は進行役

( ) は発表時間（討論を含む）