

企画セッション | 合同セッション：合同セッション2（核データ部会，加速器・ビーム科学部会[「シグマ」特別専門委員会共催]）

📅 2018年9月6日(木) 13:00 ~ 14:30 | 📍 B会場 A棟 A21

### [2B\_PL] 小型加速器中性子源と核データのニーズ

座長: 林崎 規託、片渕 竜也(東工大)

[2B\_PL01] 小型中性子源のためのp-Be中性子スペクトル関数及び応用利用から核データに対するニーズ例

\*若林 泰生<sup>1</sup> (1. 理研)

---

[2B\_PL02] アクティブ中性子非破壊測定装置開発における中性子源と核データのニーズ

\*藤 暢輔<sup>1</sup> (1. JAEA)

---

[2B\_PL03] 医療応用を中心とした小型加速器の産業応用と核データ

\*田所 孝広<sup>1</sup> (1. 日立)

核データ部会、加速器・ビーム科学部会合同セッション [「シグマ」特別専門委員会共催]

### 小型加速器中性子源と核データのニーズ

Compact Accelerator Neutron Source and Nuclear Data Needs

## (1) 小型中性子源のための p-Be 中性子スペクトル関数

### 及び応用利用から核データに対するニーズ例

#### (1) New neutron spectrum formulation of Be+p reaction for design and applications of compact neutron sources

\*若林 泰生<sup>1</sup>, 竹谷 篤<sup>1</sup>, 橋口 孝夫<sup>1</sup>, 池田 義雅<sup>1</sup>, 小林 知洋<sup>1</sup>,  
王 盛<sup>2</sup>, 严 明飞<sup>2</sup>, 原田 正英<sup>3</sup>, 池田 裕二郎<sup>1,3</sup>, 大竹 淑恵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>理研, <sup>2</sup>西安交通大学, <sup>3</sup>J-PARC センター

物作り現場における非破壊診断技術開発などのニーズに応えることを目的とした RANS[1]は、7MeV 陽子パルス を Be に入射し、p-Be 反応でパルス中性子を発生させる。中性子は減速されない連続高速中性子成分と、モデレーターで熱領域まで減速した熱中性子成分の混在スペクトルで測定系に引き出し、実験を行う。研究や技術開発を行う上で、p-Be による発生中性子(収量、角度分布、スペクトル)は基本情報として重要である。しかしながら、Be の低エネルギー陽子入射中性子発生核データは不十分、あるいは適切に計算コードに組み込まれていないため、放射線輸送シミュレーション計算では大きな不確定性がある。そこで、RANS 中性子スペクトル評価精度向上へ向けて、独自の p-Be 中性子発生関数を作成することを提案した。

開発は、エネルギー損失が数 keV~数十 keV 程度の薄い Be 標的および 20 MeV 以下の低エネルギー陽子を用いた p-Be に関する報告済みの発生中性子(全断面積、角度分布、エネルギースペクトル)の実験データを EXFOR ライブラリーから収集し、それらのデータを入射陽子エネルギー(Ep)でフィッティングすることで、12 MeV 以下の Ep に関して、発生中性子を再現する独自関数を完成させた。独自関数の発生中性子源としての妥当性評価のため、標的中のエネルギー損失を SRIM コード[2]で求め、モンテカルロ計算で Ep および標的厚を引数とした独自関数による発生中性子を求めた。角度依存エネルギースペクトルに関する厚い Be 標的の実験データ(Ep = 4 MeV, 12 MeV)および従来コードを用いた結果、並びに、RANS での In(n,n') 反応率実験と比較した。その結果、本独自関数は従来コードに比べ実験値をより正確に再現しており、p-Be を用いた小型中性子源における発生中性子評価に有用であることを示した[3]。

RANS では、中性子回折やイメージング実験技術を適用した鉄鋼集合組織の研究、鉄鋼材料錆の状態可視化などの研究とともに、現場のインフラコンクリート構造物の内部状態の直接および反射イメージング、非破壊元素分布分析など非破壊診断技術の開発を行い、それに適した可搬型小型中性子源システム開発も進めている。今回開発した中性子発生関数を用いて上記研究の再評価を行うとともに RANS の標準とした。本発表では独自関数作成を軸に、RANS での研究開発、そこから見えた核データのニーズを紹介する。

### 参考文献

[1] Y. Otake, et al., J. Dis. Res. vol.12, No.3, pp.585-592 (2017).

[2] J.F. Ziegler et al, The stopping and Range of Ions in Solids, Pergamon Press, 1985

[3] Y. Wakabayashi et al., J. Nucl. Sci. Technol., vol.55, No.8, pp.859-867 (2018)

\*Yasuo Wakabayashi<sup>1</sup>, Atsushi Taketani<sup>1</sup>, Yoshimasa Ikeda<sup>1</sup>, Takao Hashiguchi<sup>1</sup>, Tomohiro Kobayashi<sup>1</sup>, Sheng Wang<sup>2</sup>,  
Mingfei Yan<sup>2</sup>, Masahide Harada<sup>3</sup>, Yujiro Ikeda<sup>1,3</sup> and Yoshie Otake<sup>1</sup>

<sup>1</sup>RIKEN, <sup>2</sup>Xi'an Jiaotong Univ., <sup>3</sup>J-PARC Center

核データ部会、加速器・ビーム科学部会合同セッション [「シグマ」特別専門委員会共催]

## 小型加速器中性子源と核データのニーズ

Compact Accelerator Neutron Source and Nuclear Data Needs

### (2) アクティブ中性子非破壊測定装置開発における中性子源と核データのニーズ

(2) Needs for neutron source and nuclear data in developments of an active neutron non-destructive system

\*藤 暢輔<sup>1</sup>, 前田 亮<sup>1</sup>, 土屋 晴文<sup>1</sup>, 大図 章<sup>1</sup>, 古高 和禎<sup>1</sup>, 北谷 文人<sup>1</sup>, 米田 政夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>原子力機構

#### 1. 緒言

欧州委員会 - 共同研究センター (EC-JRC) と原子力機構との共同研究により、これまでの非破壊測定技術を用いることができない高線量核燃料物質のための非破壊測定技術開発を実施している<sup>[1]</sup>。本研究開発では、小型中性子源を用いた 4 つのアクティブ中性子法 (ダイアウェイ時間差分析法: DDA、中性子共鳴透過分析法: NRTA、即発ガンマ線分析法: PGA、遅発ガンマ線分析法: DGA) を組み合わせ、それぞれの特長を生かすことによって高線量核燃料物質に対応できる非破壊測定法の確立を目指している。

#### 2. 中性子源と核データのニーズ

平成 30 年度から開始したフェーズ II では、上述の 4 つのアクティブ中性子法の高度化を行うとともに、原子力機構燃料サイクル安全工学研究施設において、3 つの分析手法 (DDA, PGA, NRTA) を組み合わせた総合非破壊測定装置 (図 1) を開発する予定である。この 3 つの分析手法は中性子を用いるという点では共通しているが、DDA はパルス化された高速中性子、PGA は連続の熱中性子、NRTA はパルス化された白色中性子と、通常はそれぞれ異なる性質の中性子を用いている。市販されている小型中性子源は、3 つの分析手法からの要求を完全に満足しないため、測定装置全体の総合的な性能を勘案して DT 中性子源を採用している。装置性能をさらに向上させるためには、 $10^9$  neutrons/s 以上の中性子強度、 $1\mu\text{s}$  以下のパルス幅を持つ小型中性子源の開発が望まれる。

本研究開発においては PHITS 等を用いたシミュレーションによる検討が不可欠であるが、一部の計算値において実験値との乖離が大きくなることが分かっている。例えば、DDA では問いかけ中性子として高速中性子を用い、試料自身やモデレータで高速中性子を減速させて熱化し、核物質に核分裂反応を起こさせる。そのため、シミュレーションに用いている核データのなかでも熱中性子散乱則  $S(\alpha, \beta)$  が乖離の主な原因であると考えている。また、NRTA では、実験で得られる中性子透過スペクトルに対し、共鳴パラメータから得られるデータを用いてフィッティングすることで分析値を得るが、一部の核種で、その共鳴パラメータに起因すると思われる測定精度の悪化が見られる。今後の中性子を用いた非破壊分析法開発や、その高精度化のための研究開発等においては、それらの核データの誤差の低減が望まれる。

**謝辞:** 本研究開発は、文部科学省「核セキュリティ強化等推進事業費補助金」事業の一部である。

**参考文献** [1] M. Kureta 他、Proc. 37th ESARDA Symposium, Manchester, UK, 111-120, (2015)

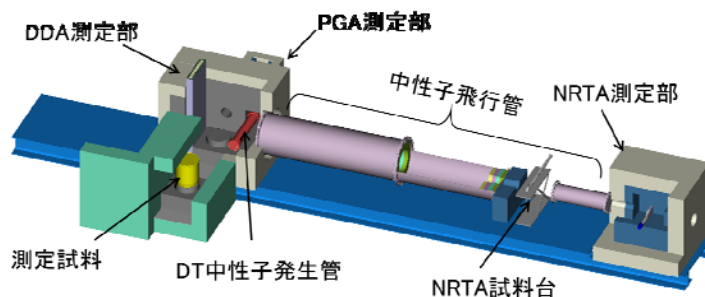


図 1 総合非破壊測定装置の概念図

\*Yosuke Toh<sup>1</sup>, Makoto Maeda<sup>1</sup>, Harufumi Tsuchiya<sup>1</sup>, Akira Ohzu<sup>1</sup>, Kazuyoshi Furutaka, Fumito Kitatani<sup>1</sup>, Masao Komeda<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>JAEA

核データ部会、加速器・ビーム科学部会合同セッション「シグマ」特別専門委員会共催]

## 小型加速器中性子源と核データのニーズ

Compact Accelerator Neutron Source and Nuclear Data Needs

## (3) 医療応用を中心とした小型加速器の産業応用と核データ

(3) Industrial applications (mainly medical) of small accelerators and nuclear data for those applications

\*田所 孝広

日立製作所 研究開発グループ

## 1. はじめに

加速器は、電子線あるいはイオンビームの発生を電源の ON/OFF により容易に制御できること、及び、各種小型加速器が開発されていることから、様々な産業分野で活用されている。日立では、これまで医療応用を中心とした小型加速器の産業応用に関する検討を進めており、本講演ではその内容を報告する。検討においては、実験とシミュレーションが必須であり、各種核データは重要である。

## 2. 小型電子線形加速器利用医療用核種製造システムの検討

診断用核種として広く使用されているテクネチウム 99m(Tc-99m)は、親核のモリブデン 99(Mo-99)からの分離精製により製造されているが、現在、Mo-99 の 9 割以上は、世界に 6 カ所ある研究用原子炉で製造されており、日本は、その 100%を輸入に依存している。また、海外研究炉のうち 3 カ所が建設から 50 年以上、2 カ所が 40 年以上経っており、近年、老朽化が問題となっている。上記状況を受け、各種小型加速器を用いた Mo-99 の製造システムが検討されている。

日立では、京都大学と協力して、小型で低製造コストが期待される電子線形加速器を用いた Mo-99/Tc-99m の製造システムについて検討を進めている。

図 1 に光子と原子核の反応を示す[1]。比較的低エネルギーの光子において、巨大共鳴領域と呼ばれる反応断面積が大きい領域があり、核種製造反応として利用可能である。電子線形加速器を利用した Mo-99 の製造には、電子が重い元素に衝突した時に生成する制動放射線と Mo-100 との反応である Mo-100( $\gamma$ , n)Mo-99 を用いる。図 2 に、Mo-99/Tc-99m 製造量の評価結果の一例を示す。加速エネルギー 35MeV、加速電流値 1mA のシステムにおいて、1340GBq の Mo-99 を製造でき、3 システムで国内需要を賄うことが可能である。原料である Mo-100 の部分を他の元素に交換することで、他の医療用核種の製造が可能となり、システムの付加価値が向上すると考えている。今までに、診断と治療を同時に可能な銅 67(Cu-67)、PET 診断用核種としてのゲルマニウム 68/ガリウム 68(Ge-68/Ga-68)等の医療用核種に関して、実験とシミュレーションを合わせた製造量評価を進めている[2]。

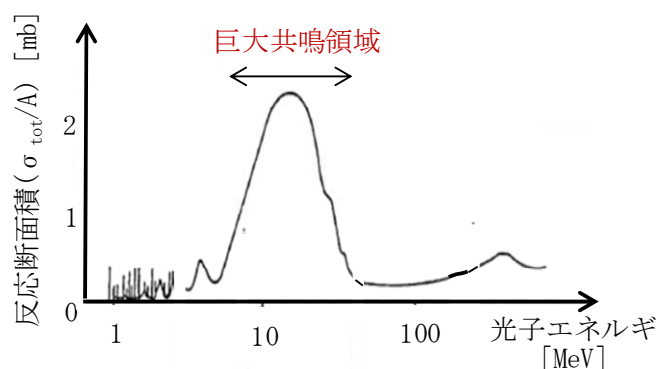


図1 光子と原子核との反応

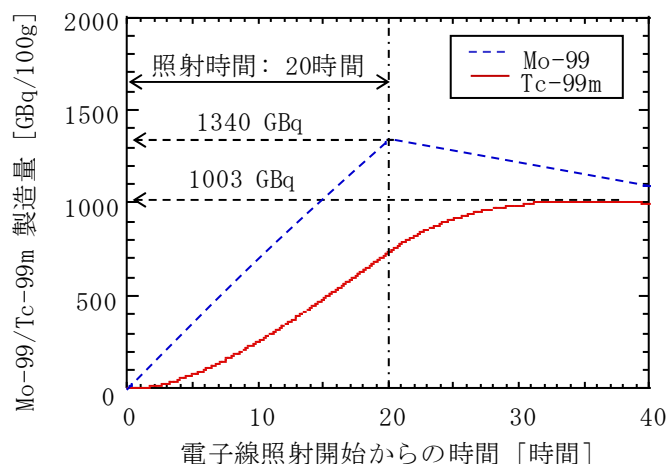


図2 Mo-99/Tc-99m製造量評価結果の一例

### 3. 小型陽子線形加速器のホウ素中性子捕捉療法(BNCT)への適用

小型加速器中性子源の有力な応用先に、ガン治療法である BNCT がある。BNCT は、悪性腫瘍に選択的に集積したホウ素化合物に中性子を照射し、ホウ素と中性子との核反応で生成する  $\alpha$  線とリチウムによって細胞レベルで悪性腫瘍を死滅させる治療法である。従来原子炉中性子源が必要であったため一般的な治療法ではなかったが、病院に設置可能なサイクロトロンを利用した装置が開発されており、近年、治療適用の広がりを見せている。現在 BNCT においては、ホウ素薬剤であるパラボロノフェニールアラニン(BPA)に陽電子放出核種である F-18 を付加した薬剤(F-18-BPA)を用いて、PET によるホウ素薬剤濃度の患部への集積特性を事前に評価し、患者が BNCT に適しているかどうかを判定している。そこで、PET 用放射性核種製造と BNCT 用中性子発生との共用が可能なシステムであればメリットが大きいと考え、PET 用薬剤製造に適した比較的低エネルギーである 11MeV の陽子線形加速器の BNCT への適用を検討した[3]。図 3 にシステムの一例を示す。中性子発生用ターゲットとしてベリリウム 9(Be-9)を用いることで、3mA の加速電流値において、原子炉中性子源と同等の治療が可能である。

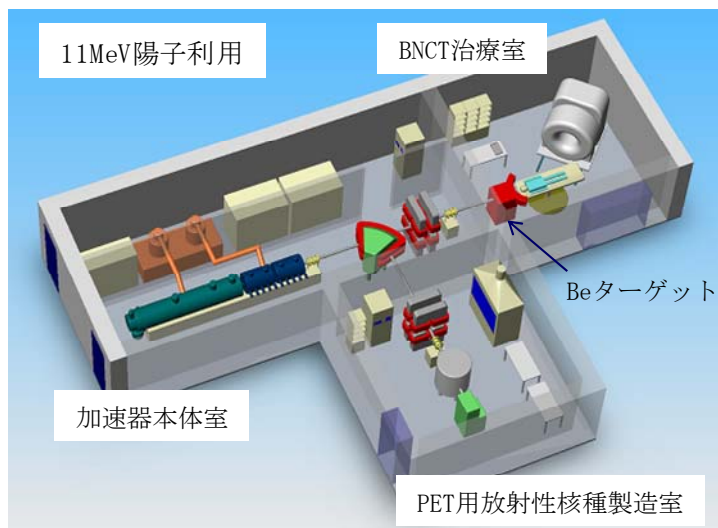


図3 小型陽子線形加速器を用いたシステムの一例

### 4. 中性子発生管の産業応用

中性子発生管は、トリチウム(T)と重陽子(D)、または、重陽子(D)と重陽子(D)との核融合反応によって中性子を発生させる装置であり、海外では、主に油田探査用として使用されている。小型で安価であることから、様々な産業応用が考えられ、日立では、今まで、化学プラントの外表面腐食検査用水分計や、危険物検知装置への適用を検討している。

#### 4-1. 中性子水分計

化学プラントの塔(反応塔、蒸留塔、抽出塔等)及び配管類は、省エネルギー対策のために保温材で断熱されている。屋外設備のため、保温材の表面は亜鉛メッキ鋼等でカバーされているが、一部隙間からの雨水侵入等により保温材下の等及び配管材の外表面腐食が進行する。そこで、直接外部から錆の状態を調べるため点検と補修作業を計画的に実施し、設備の安全確保に努めている。しかし、カバー及び保温材の撤去作業が必要であり、検査補修に関する費用が大きい。また、検査補修時間も長くなってしまうことから、プラント稼働状態での非破壊診断技術の開発が望まれている。外表面腐食は、塔及び配管材外表面とカバー間の保温材部分に水分が無いところでは起こっていないことから、プラント稼働

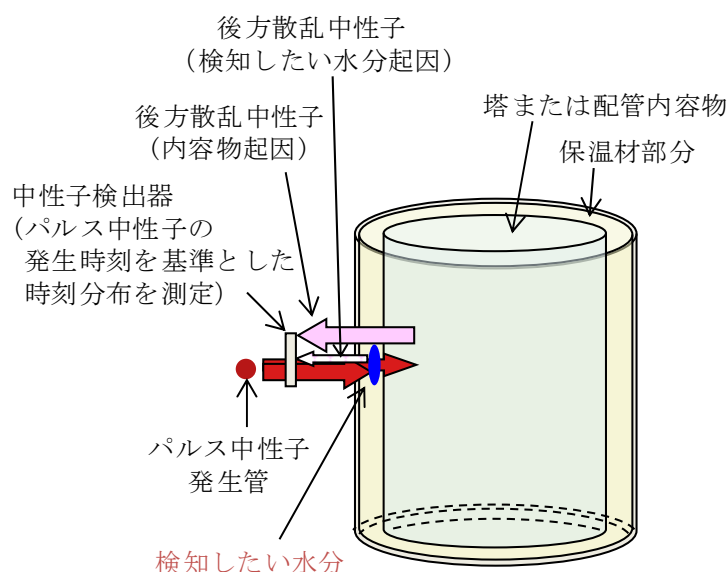


図4 パルス中性子発生管を用いた水分検知の概要

状態でこれらの水分を非破壊で検知できれば、点検補修に関する費用を大幅に低減できる。しかし、プラント稼働中は、塔及び配管内容物からのバックグラウンドが大きいという課題があった。その解決法の一つとして、日立パワーソリューションズと協力して、パルス中性子発生管の適用を検討してきた。図4にパルス中性子発生管を用いた水分検知の概要を示す。パルス中性子発生時刻を基準とする後方散乱中性子の時刻分布を測定することで、検知したい水分起因の後方散乱中性子に対する内容物起因の中性子の割合を低減させることができ、水分検知性能を向上させることが可能である[4]。

#### 4-2. 危険物検知

爆発物、薬物等の危険物は、荷物などに隠ぺいされて運搬されることが多いことから、その検知のための各種手法が開発されており、荷物を開けずに検査する手法として、X線透過及びCT装置が空港及び税関等に導入されている。中性子は、透過能力が高い、元素分析が可能という性質をもっていることから、熱中性子放射化法、高速中性子放射化法等の様々な検知法が研究開発されている。日立では、元素の種類と位置を同定可能な随伴粒子イメージング(API)法を適用した爆発物の検知装置を開発してきた。

図5に試作API装置の概要を示す。DT核融合反応において生成する $\alpha$ 線と高速中性子が180度方向に飛行することを利用し、 $\alpha$ 線と同時に生成する中性子と元素との反応で発生した即発 $\gamma$ 線を同時計測する方法である。試作装置を用いて性能評価した結果、爆発物検知に必要な炭素、酸素及び窒素計測のS/Nが、 $\gamma$ 線計測のみと比較して40倍以上となることを確認している。

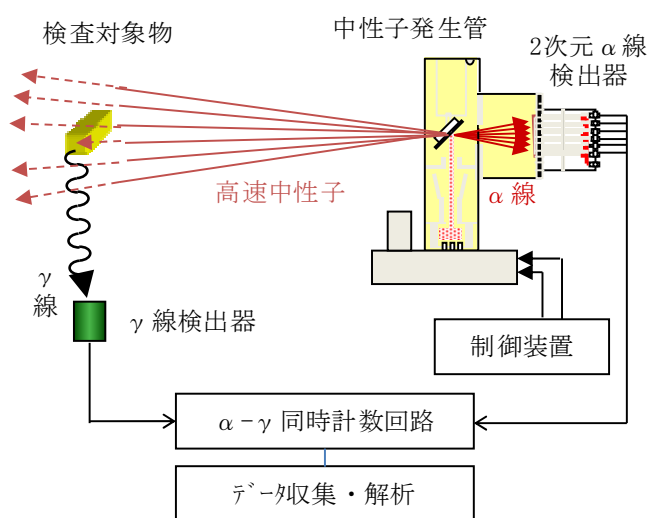


図5 試作API装置の概要

#### 5. おわりに

本講演において、医療応用を中心とした小型加速器の産業応用に関する検討内容を紹介した。それぞれ実用化には課題が多いが、今後も、小型加速器の産業応用の検討を進めて行く予定である。

#### 参考文献

- [1] F. Jallu, et al. Photoneutron production in tungsten, praseodymium, copper and beryllium by using high energy electron linear accelerator. Nucl Instr Meth. 1999;B155:373-381.
- [2] T. Tadokoro, et al. Examination of a Ge-68/Ga-68 production amount in a medical radionuclides production system using an electron linear accelerator. Atomic Energy Society of Japan, 2017 Fall meeting.
- [3] T. Tadokoro, et al. Feasibility study on a common use accelerator system of neutron production for BNCT and radionuclide production for PET. Proc ICNCT-12. 2006;304-307.
- [4] T. Tadokoro, et al. Development of a neutron moisture meter for moisture under heat insulation of tower and pipe (2) Basic study for a moisture meter using time measurement methods. Atomic Energy Society of Japan, 2009 Fall meeting.

\*Takahiro Tadokoro

Hitachi, Ltd. Research & Development Group.