企画セッション | 部会・連絡会セッション：核不拡散，保障措置，核セキュリティ連絡会

2018年9月6日(木) 13:00 ~ 14:30 | F会場 A棟 A36

[2F_PL] 核不拡散・保障措置・核セキュリティに関する研究開発の動向と今後

座長:須田 一則(JAEA)

[2F_PL01] 核不拡散・保障措置・セキュリティのためのアクティブ中性子非破壊測定技術開発

*小泉 光生[1] (1. JAEA)

[2F_PL02] 原子力施設のサイバーセキュリティターゲット同定手法の開発

*出町 和之[1] (1. 東大)

2018年秋の大会

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

核不拡散・保障措置・核セキュリティに関する研究開発の動向と今後
Present Status of R&D Activities for Nuclear Non-proliferation, Safeguards and Security

（1）核不拡散・保障措置・セキュリティのためのアクティブ中性子非破壊測定技術開発 – 遅発ガンマ線分析技術の開発 –

(1) Active Neutron NDA Technology Development for Nuclear Non-proliferation, Safeguards, and security Purposes – Development of Delayed Gamma-ray Analysis Method –

*小泉 光生[1]
[1]日本原子力研究開発機構

1. 緒言

非破壊分析（NDA）技術は、核壊変や核分裂などに伴い放出されるガンマ線や中性子などを測定する技術で、その精度は化学処理を伴う分析（破壊分析（DA）技術）には及ばないが、試料をそのままの状態で、その場で、短時間に測定できることに特徴がある。また、非均質な測定対象を容器全体で測定しサンプリング誤差を低減させるために利用されている。そのため、保障措置や計量管理においては、DA と併用して核物質の測定・定量に用いられている。また、核セキュリティでは、核物質が隠蔽されて持ち込まれないように調べる（核検知）技術として用いられている。

その一方で、使用済燃料や再処理施設の溶解液の試料など放射能の高いものは、その高いバックグラウンドにより、新燃料核物質に対して通常行われている、核物質核種の壊変に伴い試料自身が発生する放射線を計測するパッシブ法 NDA による分析を行うことはできない。また、遮蔽物中に隠蔽された核物質や、爆薬、毒物などは、単なる放射能測定では検知できない。

日本原子力研究開発機構（原子力機構）は、外部から働きかけ、核反応などを誘発しそれを測定するアクティブ NDA 技術による検知・測定技術開発を進めている。本発表では、原子力機構が進めている 2 つのアクティブ NDA 技術開発のプロジェクトの概略と、その中の技術開発テーマから遅発ガンマ線分析（DGA）技術開発について簡単に紹介する。

2. アクティブ非破壊分析技術プロジェクト

2.1 核共鳴蛍光非破壊分析技術の開発

核共鳴蛍光（NRF）NDA 技術は準単色ガンマ線ビームを利用した核検知・測定技術である[1]。ガンマ線ビームは、加速された電子ビームにレーザー光を照射することによって得られる。その際、レーザーの光子は、電子とのコンプトン散乱でエネルギーを付与される（laser Compton scattering, LCS）。これをコリメーターで角度を制限して取り出すと、エネルギー幅が制限された高エネルギー光子ビームが得られる。こうして得られる準単色ガンマ線を核の励起エネルギーと一致するように調整すると、核が励起され、それに続く脱励起によりガンマ線が散乱される。この技術は、ガンマ線を利用するので貫通力が高いこと、核共鳴が関与するため特定の核種を狙って検知することが出来ること、そのため化学的な状態によらずに検知できること、ガンマ線照射なので放射化が起きないこと、といった特徴がある。

現在、兵庫県立大学のニュースバル施設において、隠蔽された核物質を模擬して、その検知が可能なことを示す実証実験を行うための準備を進めている。

2.2 アクティブ中性子非破壊分析技術の開発

アクティブ中性子法は、外部中性子源により核反応を誘起し、それによって発生する中性子、ガンマ線を測定する技術である[2]。原子力機構は、高線量の核物質の測定技術として、また、不審物の性状確認技術として適用できると考え、アクティブ中性子分析法のうち、ダイアウェイ時間差分析法（DDA : Differential Die-away Analysis）[3]、中性子共鳴透過分析法（NRTA：Neutron Resonance Transmission Analysis）[4-6]、即

発ガンマ線分析法（PGA：Prompt Gamma-ray Analysis)、遅発ガンマ線分析法（DGA：Delayed Gamma-ray Analysis）[7]の 4 種類の基礎技術開発を進めている。これらの測定技術の開発を同時に進め、最終的には、各々の分析で得られる情報を総合し、相補的な分析を行う技術を確立することを目的としている。

各技術のうち、DDA は核分裂性物質を定量する技術である。測定では、試料の測定領域を壁で囲い、そこにパルス状に中性子を照射すると、核分裂性核物質の量により中性子の減衰様式が変化することを利用する。NRTA は、パルス状に発生した中性子を飛行管に通し、試料を透過させ、検出器に到達した中性子を飛行時間（TOF）法により測定する。TOF 測定で得られる中性子エネルギーに対する透過率パターンから試料中の核種ごとに面密度を決定する。PGA は、中性子を試料に照射し、中性子捕獲反応に伴うガンマ線を測定し、試料中に含まれる核種（元素）を同定する技術で、不審物中の爆発物や、毒物、遮蔽物などの検知に有用である。

3 遅発ガンマ線分析技術開発

アクティブ中性子 NDA 技術のうち DGA は、中性子照射により核分裂を起こし、生成した核分裂生成物から放出されるガンマ線を分光分析する技術である。核分裂生成物の構成は、各核分裂性核種で異なるため、得られるガンマ線スペクトルのパターンより、核分裂性物質の構成比を求めることができる。

DGA 技術開発は、EC-JRC との共同研究のもと、EC-JRC ISPRA の PUNITA（Pulsed Neutron Interrogation Test Assembly）と呼ばれる装置を利用して進めてきた。PUNITA は、DT 中性子源を有し、50×50×80 ㎝の内部に均質な熱中性子場を作り出すことのできる 1 辺約 2 m のカーボンとポリエチレンで構成される箱状の装置である。原子力機構は、EC-JRC の協力のもと、PUNITA 内部で熱化した中性子束を効率よく試料に照射するための中性子減速材を追加で設置した。EC-JRC は、PUNITA を改造し、核物質試料を移動するための直線シャトルシステムを導入した。核物質は、PUNITA 内部で中性子照射され、その後、PUNITA の外の遮蔽体中に設置した Ge 検出器前まで輸送される。実験では、照射と測定を繰り返し行った。使用済み燃料など高線量試料の測定においては、寿命の長い核分裂生成物からのガンマ線がバックグラウンドとなることが想定される。そこで、当技術開発では、そのバックグラウンドの干渉がより少ない比較的半減期の短い核分裂生成物から放出される高エネルギーガンマ線に注目した測定を進めた。密閉された標準核物質試料を用い、U-235 と Pu-239 の比率を変えて試験を行い、それに伴いガンマ線のピーク強度が変化にする様子が観測できた。

今後、上記基礎技術開発を進めるとともに、放射能を含有する試料測定に適用するための技術開発を進める予定である。また、DD 中性子源を導入すると、より小型な DGA 装置の開発が可能と考えられるため、シミュレーション研究など、その基礎開発研究を進めているところである。

４．まとめ

原子力機構では、保障措置・セキュリティ技術開発において、核検知技術、高線量核物質測定技術、また、不審物の性状確認技術を確立するため、アクティブ NDA 技術開発を進めている。NRF 非破壊検知技術の開発では、核検知技術の実証試験に向けて準備を進めているところである。アクティブ中性子 NDA 技術開発では、低線量核物質を使った基礎的な技術確認を終え、高線量核物質の測定のための技術開発に取りかかっているところである。DGA 技術開発では、実用化をめざして、より装置を小型化するための基礎開発研究を進めている。NRTA における測定では、中性子パルスを短パルス化するとより高精度とすることが期待できる[5]。そこで、短パルス中性子源の 1 つの候補として、レーザー駆動中性子源の基礎技術開発を開始したところである。

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」の一部で、原子力機構の基礎工学研究センターおよび核不拡散・核セキュリティ総合支援センターと、EC-JRC、京大、阪大、兵庫県立大学、量子科学技術研究開発機構との共同研究のもとで進められている。

参考文献

[1] R. Hajima, T. Hayakawa, T. Shizuma, C.T. Angell, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura, S. Matsuba, A. Kosuge, M. Mori and M. Seya, Eur. Phys. J. Special Topics, 223, 1229–1236 (2014).

[2] “Development of Active Neutron NDA Techniques for Nuclear Non-proliferation and Nuclear Security”, Y. Toh, A. Ohzu, H. Tsuchiya, K. Furutaka, F. Kitatani, M. Komeda, M. Maeda, M. Kureta, M. Koizumi, M. Seya, J. Heyse, C. Paradela, W. Mondelaers, P. Schillebeeckx, T. Bogucarska, J.-M. Crochemore, G. Varasano, K. Abbas, and B. Pederson, the Proceedings of ESARDA 39th Annual Meeting (2017) 684.
[3] “Design study on differential die-away technique in an integrated active neutron NDA system for non-nuclear proliferation”, A. Ohzu, M. Maeda, M. Komeda, H. Tobita, M. Kureta, M. Koizumi, and M. Seya, the proceedings of Nuclear Science Symposium in IEEE conference 2016.
[4] C. Paradela, J. Heyse, S. Kopecky, P. Schillebeeckx, H. Harada, F. Kitatani, M. Koizumi, and H. Tsuchiya, EPJ Web of Conferences 146, 09002 (2017).
[5] H. Tsuchiya, F. Kitatani, M. Maeda, Y. Toh, and M. Kureta, Plasma and Fusion Research 13 (2018) 2406004.
[6] F. Kitatani, H. Tsuchiya, M. Koizumi, J. Takamine, J. Hori, and T. Sano, EPJ Web of Conferences 146 (2017) 09032.
[7] M. Koizumi, F. Rossi, D. C. Rodriguez, J. Takamine, M. Seya, T. Bogucarska, J.-M. Crochemore, G. Varasano, K. Abbas, B. Pederson, M. Kureta, J. Heyse, C. Paradela, W. Mondelaers, and P. Schillebeeckx, EPJ Web of Conferences 146, 09018 (2017).

---

*Mitsuo Koizumi[1]
[1]Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

核不拡散・保障措置・核セキュリティに関する研究開発の動向と今後

Present Status of R&D Activities for Nuclear Non-proliferation, Safeguards and Security

(2) 原子力施設のサイバーセキュリティターゲット同定手法の開発

(2) Development of Cyber Security Target Identification Method for Nuclear Facilities

*出町 和之[1]

[1]東京大学

原子力施設のサイバーセキュリティに資するため，放射性物質の過大放出(HRC)を発生させるシーケンスを対象にIAEA の Technical Guidance の No.16 を用いてターゲットセット(TS)を求め，サイバー攻撃の対象となる各システムの制御内容とサイバー攻撃の手段で分類することで，対象となるコンピュータを抽出した。

キーワード：サイバーセキュリティ，核セキュリティ，ターゲットセット

1. 緒言

原子力発電所の核セキュリティ事象は，悪意を持つ人間・集団による妨害破壊行為が起因となるため，その発生確率を求めて PRA に似たリスク評価を行うことは困難である。そのため，同時に機能喪失することで安全機能が失われて重大事故に至るような重要機器・設備の組み合わせ（TS:ターゲットセット）を導出し，これらを防護するための対策を講じることが必要となる。IAEA の Technical Guide（TG）である IAEA Nuclear Security Series No.16, "Identification of Vital Areas at Nuclear Facilities"では，TS への攻撃を防ぐために必ず防護せねばならない区域（PS：Protect Set）を導出するための VAI(Vital Area Identification)が解説されている。ただし，通常の VAI 手法では悪意を持つ人間・集団がその区域に物理的に侵入する場合を想定した枢要区域を導出できるが，サイバーセキュリティに対してはコンピュータネットワーク空間上の枢要区域の導出が求められる。そこで本研究では，VAI 手法をコンピュータネットワーク空間に適用し，サイバーセキュリティ上の TS を導出することを目的とした[1]。

2. 手法

VAI 手法をコンピュータネットワーク空間に適用するにあたり，サイバー攻撃の対象範囲を以下とした。

- 逆走防止効果のあるダイオード設置が考えられるため，外部からのサイバー攻撃は想定しない。
- 内部脅威者が中央制御室の端末や各所のローカルネットワークボードから攻撃を行うことを想定する。

また，サイバー攻撃により重大事故に至る機能喪失を発生させ得る手段として，次の３つを想定した。

- 安全系設備の起動信号に対する妨害
- 安全系設備の制御プログラムの改竄
- 安全対策の人為的ミスの誘発を目的とした，中央制御室モニター誤表示のためのプログラム改竄

これらの対象範囲，サイバー攻撃手段を対象に，新規制基準に示されている放射性物質の過大放出(HRC)を発生させるシーケンスを用い，BWR と PWR について TS を求めた。

3. 結論

サイバー攻撃の対象となる各システムの制御内容を各システムの運転制御を考慮して整理し，それをサイバー攻撃の手段で分類した。これにより攻撃対象となるコンピュータを抽出する手法を示すことができた。

参考文献

[1] 出町和之，「枢要区域特定手法による原子力施設のサイバーセキュリティに関する核セキュリティ研究」平成 29 年度 JAEA 委託研究報告書

*Kazuyuki Demachi[1], [1]The University of Tokyo