

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

📅 2022年9月8日(木) 13:00 ~ 14:30 | 📍 会場 E1棟3F 34番教室

[2I_PL] 次世代核燃料サイクルシステムにおける核不拡散・核セキュリティの課題

座長：宇根崎 博信 (京大)

[2I_PL01] Challenges to Nuclear Security in a Changing Nuclear
Energy Landscape for Novel Small Modular Reactors and Innovative Fuel Cycles

*Jorshan Choi¹ (1. Former UC Berkeley)

[2I_PL02] 次世代核燃料サイクルシステムにおける核不拡散・保障措置に関する課題と今後

*堀 雅人¹ (1. JAEA)

Planning Lecture of Nuclear Non-Proliferation, Safeguards, Nuclear Security Network
Challenges in Nuclear Non-Proliferation and Nuclear Security for Next Generation Nuclear Fuel
Cycle

(1) Challenges to Nuclear Security in a Changing Nuclear -Energy Landscape for Novel
Small Modular Reactors and Innovative Nuclear Fuel Cycles

*Jor-shan Choi¹

¹ Lawrence Livermore National Laboratory (retired)

To counter the twin challenges of ensuring a country's energy security and complying with its climate-change commitment, nuclear power is being considered (again) a viable energy option, and a new generation of advanced reactor technologies including small modular reactors (SMRs) are envisioned, developed, and some are deployed, currently and in the near future. The most impactful driver of this development will be a changing landscape for advanced reactor technologies including novel SMRs and their innovative nuclear fuel cycles. To ensure that these advanced reactors and their associated nuclear fuel cycles are safe, secure, and for purely peaceful purposes, the nuclear 3S (safety, security, and safeguards) are important considerations in the successful development and deployment of such technologies.

Many SMRs are encompassing advanced and innovative technology solutions. Several are in various stage of construction, or in-line for regulatory review and authorization (e.g., CAREM by CNEA, Argentina; ACP100 by CNNC, China; BWRX300 by GE-Hitachi, Japan/US; and NUSCALE by NUSCALE VOYGR, US; etc.). Two SMRs are currently deployed, they are:

- KLT40S, a 2x35 MWe PWR floating nuclear power plant (FNPP) developed by OKBM, Russia, and commissioned in the Russian Far East in May 2020¹, and
- HTR-PM, a 2x105 MWe HTGR developed by CNEC and INNET of China, connected to grid in December 2021².

These deployed, or soon-to-be-deployed SMRs would face different 3S challenges in their operational phase, as well as in their decommissioning and disposition phase. The work presented here focuses on the challenges to nuclear security.

Nuclear Security

Nuclear security³ deals with the measures to protect a nuclear facility and its nuclear material against malevolent acts such as sabotage or theft by criminals and terrorists. Specific features of SMRs, such as transportability, floating platform, remote locations, new fuel designs and new fuel cycles, present new nuclear-security challenges, which may be more severe than those of existing light-water reactors (LWRs).

Nuclear security focuses on the criminal or intentional unauthorized acts and other associated activities.

¹ "ROSATOM: World's only floating nuclear power plant enters full commercial exploitation," 22 May 2020, www.rosatom.ru

² "Demonstration HTR-PM grid connected," World Nuclear News, 16 December 2021.

³ IAEA Glossary defines "Security" as the prevention and detection of, and response to theft, sabotage, unauthorized access, illegal transfer or other malicious acts involving nuclear material, other radioactive substances or their associated facilities.

Countries employing SMRs need to establish and implement an overall nuclear security strategy that works to protect people, property, and the environment against the malicious use of nuclear or radioactive material, or sabotage of the SMRs. Many first-of-a-kind (FOAK) SMRs possess unique design features, operational conditions, and associated nuclear fuel cycles, which may pose challenges to nuclear security. Some of these challenges are briefly discussed below:

- *Transportability of SMRs* – Transportation security may have multiple challenges, including uncertainties with the public domain, the possibility of attack anywhere along the transport route, and the involvement of multiple national, regional, international agencies with multiple security interfaces.
- *Demarcation of physical protection perimeters for marine-based SMRs (FNPPs or immersible SMR)⁴* – It is difficult to set physical protection perimeters for marine-based SMRs as they are susceptible to seaborn threats when in transit or docked at a port facility.
- *Terrorist threats aiming at sinking the FNPP barges* – Terrorists attacks aiming at sinking the FNPP barges in transit or docked at a port facility are specifically challenging. To protect against such security incidents, cooperation and coordination among countries' arm forces (navies) may be warranted, in a similar manner when transportations of nuclear fuel/materials/spent fuel in international waterways are taking place.
- *Remote locations* – The difficulty of physical access to remote sites can present challenges to nuclear security. In the case of an attack, it will be difficult for any offsite response force to access the site in a timely manner. Additionally, the deployment of onsite response force may be difficult or inadequate.
- *Small size of fuel assemblies* – The shorter (fresh and spent fuel) assemblies or a container-load of fuel pebbles are easier targets for theft, in comparison to the 14-foot-long LWR assemblies. This concern may be elevated for SMRs located in remote sites with less attention to physical protection of nuclear fuel and materials.
- *New fuel & new fuel cycles* – The new types, enrichments, and forms of fuel, which are used by some SMRs require different fuel-cycle processes and facilities than those that support the current LWR fuel-cycle. This would impose new security challenges in protecting the fuel and fuel-cycle facilities.
- *Insider threats* – Insider threats present more challenging problems than external adversaries because they can take advantage of their insider attributes to bypass technical and administrative physical-protection measures to facilitate unauthorized removal of nuclear materials or sabotage. These threats apply to all nuclear facilities, including SMRs.
- *Cybersecurity* – The overall goal of cybersecurity in the physical protection of nuclear material and nuclear facilities is to protect the digital-based systems against attacks aimed at facilitating the unauthorized removal of nuclear material or sabotage of nuclear facilities. The cybersecurity threats apply to all nuclear facilities, including SMRs.

⁴ FLEXBLUE-160, a transportable reactor concept to be moored on the seafloor, designed by France's Direction of Construction Naval and Submarines and under development since 2011 "Instrumentation and Control Systems for Advanced Small Modular Reactors, FLEXBLUE (DCNS, France) Annex A-4," inis.iaea.org

核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会セッション

次世代核燃料サイクルシステムにおける核不拡散・核セキュリティの課題
Challenges in Nuclear Non-Proliferation and Nuclear Security for Next Generation Nuclear Fuel

(2) 次世代核燃料サイクルシステムにおける核不拡散・保障措置に関する

課題と今後

(2) Nuclear Non-Proliferation and Safeguards Challenges related to Advanced Nuclear Fuel Cycle System

*堀 雅人¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. 概要

現在、多様な小型モジュラー炉（SMR）の開発が各国で進められている²が、地球温暖化対策、ロシアのウクライナ侵攻等によるエネルギー危機の解決策として、SMR は注目されており、その重要性は増している。今後、各国において SMR の開発・導入が進み、SMR の数の増加ばかりでなく、導入国・地域の拡大も予想される。

核不拡散の観点から、核物質を扱う SMR に対して適正な保障措置を適用し、平和目的以外に転用されていないことを検証し、確証を与えることが重要である。保障措置の実施機関である国際原子力機関（IAEA）の保障措置予算は、実質 0 成長であることから、限られた予算の中で、増加する SMR に対する保障措置を如何に効果的に実施することが保障措置上の重要課題となっている。SMR には、現在、保障措置が適用されている一般的な軽水炉やナトリウム冷却高速炉とは異なる原子炉の設計、異なる仕様の核燃料が採用されている。また、SMR の燃料サイクルとして新たなリサイクル技術や廃棄物処理技術も検討されている。IAEA が保障措置を適用した経験がない、新しい特徴をもった原子炉及び燃料サイクル施設や核物質に対して効果的に保障措置を適用するために、新しいコンセプトや検認及び封じ込め・監視技術の開発も必要となる。IAEA は、加盟国支援計画（MSSP）の一環として Safeguards-By-Design for Small Modular Reactor というプロジェクトを立ち上げ、加盟国からの支援の下で、SMR に対して設計段階から保障措置を適用するための取り組みを進めている。

本講演では、SMR の保障措置に関連する特徴とその課題と取り組みについて概説する。また、SMR が軍用の潜水艦や空母の推進力として用いられる場合の保障措置上の扱いについても簡単に触れる。

2. SMR に対する保障措置

2-1. 軽水炉・ナトリウム冷却高速炉に対する保障措置

IAEA は、軽水炉に対する保障措置を長年にわたり実施しており、保障措置アプローチは確立している。年 1 回程度の実在庫検認/設計情報検認（PIV/DIV）、年 1~4 回程度の中間査察、必要に応じて受払の検認が行われる。査察の回数や内容は、その施設で扱われる核物質の特徴によって異なり、軽水炉においては、低濃縮ウラン新燃料と Pu を含む使用済み燃料が扱われるためにこのような頻度となっている。この頻度については、その施設にリモートモニタリングが適用されているかどうか、その国が追加議定書を発効しているかどうか等によっても異なってくる。

原子力機構において開発・導入が進められているナトリウム冷却高速炉は、軽水炉とは異なる設計と燃料が採用されている。保障措置に関連する主な違いは、冷却材としてナトリウムが使うこと、新燃料にプルトニウム・ウラン混合酸化物燃料（MOX）を使うこと、Pu の生成を目的としたブランケット燃料が用いられることである。そのため、保障措置を確実に実施するために、ナトリウム中の燃料に対する新たな監視装置の導入、より高い頻度の査察、異なる仕様の燃料を検認する装置の導入を原子力機構、国、IAEA が協力して進めた。最終的には、開発した検認装置及び封じ込め・監視装置のすべての情報をリモートモニタリング化し、

査察の頻度を低減し、保障措置の効率化に貢献した。

2-2. SMR の保障措置上の特徴

開発が進められている SMR の保障措置上の特徴として、施設の設計や核物質の仕様ごとに以下の通り整理した。

冷却減速材：黒鉛、鉛、フッ化物塩

燃料の性状：モルテンソルト、ペブルベッド、窒化物燃料、Th/²³³U、5%以上の低濃縮ウラン

燃焼度等：高燃焼度、長い運転サイクル

燃料交換、燃料サイクル等：移動型炉、中央工場における燃料交換

燃料サイクル：新しいリサイクル施設、燃料加工施設、廃棄物処理施設

各々の炉・施設・核物質の特徴に応じた保障措置アプローチの開発が必要になるが、特に、モルテンソルトやペブルベッド型炉に対する保障措置の経験は限られており、より多くの開発要素があると考えられる。

長い運転サイクル、特に、燃料交換を行わないタイプの SMR は、査察頻度が少なくなり、保障措置の効率化に貢献する。一方で、核燃料を装荷した原子炉が、適用される保障措置が異なる国の間、例えば、核兵器国と非核兵器国、を移動する場合の対応について、保障措置の制度・法的な側面での整理も必要になる。

3. IAEA の取り組み

IAEA では、2018 年より、MSSP として Safeguards-By-Design for Small Modular Reactor のプロジェクトを進めており、ロシア、カナダ、韓国、フィンランド、フランス、米国、中国が参加し、各国が開発・導入を進めている SMR の情報提供、保障措置アプローチの開発が進められ、SMR に対して設計段階から保障措置を適用するための取り組みが行われている。

4. SMR の原潜の推進力等への応用

SMR については、将来、汎用性が高くなると、発電ばかりでなく、動力源等としての利用が広がる可能性がある。ここでは、可能性として、小型炉が軍用の潜水艦や空母の推進力として用いられる場合の保障措置上の取り扱いを整理した。一般論として、原潜の推進力といった非平和利用活動に使用される核物質は、保障措置協定（INFCIRC/153）の第 14 条に基づき、所定の手続き、取決めを行い、一時的に、保障措置の適用除外となる。その際に IAEA がその国と結ぶ取決めの内容が重要である。現在、オーストラリア、ブラジルにおいて、原潜の導入・開発計画が進んでおり、IAEA との間で取決めに関する議論が行われているが、議論が先行しているオーストラリアが IAEA との間で、良き前例となるような取決めを結ぶことが、今後の核不拡散上重要と考えている。

*Masato Hori¹

¹Japan Atomic Energy Agency

²ISCN ニュースレター No.0296-2021 年 8 月号

https://www.jaea.go.jp/04/iscn/nnp_news/attached/0296.pdf#page=4