

ISCN ニュースレター

No.0274

January, 2020

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）

核不拡散・核セキュリティ総合支援センター（ISCN）

目次

1. お知らせ	3
1-1 アンケートへのご協力をお願い	3
2. 核不拡散・核セキュリティに関する動向(解説・分析)	4
2-1 米国 2020 会計年度(FY2020)歳出法案について	4
2019年12月20日、米国の2020会計年度予算が成立した。このうち、エネルギー省国家核安全保障庁の核不拡散と核・放射性物質のテロ対策等に係る活動関連予算と、原子力局が行う先進原子炉の開発・実証を含む原子力発電の推進等に係る原子力関連予算等について報告する。	
2-2 イラン核合意を巡る動向(2020年1月)	15
2018年5月のトランプ政権のイラン核合意離脱後、段階的に核合意からの逸脱を表明してきたイランは、2020年1月5日、核合意で規定されたいかなる制限も順守しないと、無制限にウラン濃縮を行うと表明した。ここに至るまでの、イランの段階的な核合意からの逸脱について整理した。	
3. 技術紹介	17
3-1 核セキュリティ事象初動対応のための機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析	17
核セキュリティ事象発生時の初動対応を支援する放射線計測技術として開発を進めている、機械学習を応用した核種判定のためのガンマ線スペクトル解析技術の概要と今後について紹介する。	
4. 活動報告	24
4-1 原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティに係る国際フォーラム 『「2020」とその先の世界を見据えた 核セキュリティの課題と方向性』結果報告	24
4-2 EC/JRC イスプラにおける遅発ガンマ線分光試験	41
2019年10月30日～11月15日にかけて、EC/JRC(European Commission / Joint Research Centre)イスプラにて実施した遅発ガンマ線分光試験について報告する。	

1. お知らせ

1-1 アンケートへのご協力をお願い

ISCN ニュースレター編集委員会では、多くの読者からご意見を伺い、その結果を記事に反映し、誌面内容の向上を図るため、アンケートを実施しております。

皆様のご意見・ご要望をお聞かせください。

下記リンクよりアンケートへのご協力をお願いします。

http://www.jaea.go.jp/04/iscn/nnp_news/enquete.html

※ アンケートの所要時間は1分程度です。

2. 核不拡散・核セキュリティに関する動向(解説・分析)

2-1 米国 2020 会計年度(FY2020)歳出法案について

2019年12月19日、米国議会上院は2020会計年度(FY2020)歳出法案を賛成多数で可決し、翌20日、トランプ大統領は法案に署名、FY2020予算が成立した(FY2020は2020年10月1日より2021年9月30日まで)。このうち、(1)エネルギー省(DOE)予算、(2)DOEの国家核安全保障庁(NNSA)予算、(3)NNSAの核不拡散と核・放射性物質のテロ対策等に係る活動関連予算である「防衛核不拡散」予算、(4)原子力局(NE局)が行う先進原子炉(先進炉)の開発・実証を含む原子力関連予算、そして(5)原子力規制委員会(NRC)及び国際原子力機関(IAEA)への特別拠出金に係る予算について報告する。

(1) エネルギー省(DOE)予算

表1に、DOEのFY2019実施予算、トランプ政権のFY2020予算要求、そしてFY2020歳出法に基づく予算(FY2020実施予算)と、FY2020実施予算の前二者との比較を示す。既報¹の通りトランプ大統領は、FY2020予算要求で、FY2019実施予算(356億8,531万ドル)から減額した315億192万ドルを要求したが、議会はそれに比し22.5%増額、またFY2019実施予算からも8.1%増額させた385億8,631万ドルの配賦を認めた。

表1 エネルギー省(DOE)予算²

	FY2019 実施予算 (千ドル)	FY2020 要求 (千ドル)	FY2020 実施予算 ³ (千ドル)	FY2019実施予算との比較		FY2020要求との比較	
				増減額 (千ドル)	増減比	増減額 (千ドル)	増減比
計	35,685,317	31,501,929	38,586,316	2,900,999	1.081	7,084,387	1.225

(2) 国家核安全保障庁(NNSA)予算

表2に、NNSAの予算を同様に示す。NNSAは、核兵器の維持、核不拡散・核セキュリティの強化(核・放射性物質の拡散防止、核テロ対策)、米国海軍原子力潜水艦の運用支援等を使命とし、その予算は、DOE予算の4割以上を占める。トランプ政権は、強い米国を構築するための国防強化の方針の下、NNSAの役割を国防総省同様

¹ 「トランプ政権のFY2020予算教書 エネルギー省(DOE)国家核安全保障庁(NNSA)の予算要求について」、田崎真樹子、ISCN ニュースレター、No. 0264、March 2019、

URL: https://www.jaea.go.jp/04/iscn/nnp_news/attached/0264.pdf#page=17

² 表1～表5は、下院歳出委員会ホームページ、URL: <https://appropriations.house.gov/news/press-releases/lowey-releases-appropriations-packages> 及びDOE関連予算額及びその説明が記載されている

URL: <https://appropriations.house.gov/sites/democrats.appropriations.house.gov/files/HR%201865%20-%20Division%20C%20-%20EW%20SOM%20FY20.pdf> 記載の表等をもとに作成した。

³ FY2020歳出法で承認された予算。以下同。

に重要視し、FY2020 予算要求では、他省庁予算を大幅に減額要求したにも拘わらず、NNSA に関しては FY2019 実施予算(152 億 2,861 万ドル)から増額した 164 億 8,500 万ドルを要求した。議会はそれを更に増額し、FY2019 実施予算に比し 9.7%増加させた 167 億 459 万ドルの配賦を認めた。

表 2 国家核安全保障庁(NNSA)予算

	FY2019 実施予算 (千ドル)	FY2020 要求 (千ドル)	FY2020 実施予算 (千ドル)	FY2019 実施予算との比較		FY2020 要求との比較	
				増減額 (千ドル)	増減比	増減額 (千ドル)	増減比
① 核兵器活動*	11,100,000	12,408,603	12,457,097	1,357,097	1.122	48,494	1.004
核弾頭備蓄システム	599,482	635,766	630,159	30,677	1.051	-5,607	0.991
Pu の持続	361,282	712,440	712,440	351,158	1.972	0	1.000
②防衛核不拡散	1,930,000	1,993,302	2,164,400	234,400	1.121	171,098	1.086
③海軍原子炉	1,788,618	1,648,396	1,648,396	-140,222	0.922	0	1.000
④連邦職員給与/経費	410,000	434,699	434,699	24,699	1.060	0	1.000
計	15,228,618	16,485,000	16,704,592	1,475,974	1.097	219,592	1.013

*「①核兵器活動」の予算項目には、「核弾頭備蓄システム」及び「Pu の持続」以外にも項目があるが、表 2 では省略した。

NNSA の①~④の 4 つの予算カテゴリの中で、FY2019 実施予算に比し最も増額割合が大きい(12.2%)のは、NNSA 予算の 7 割以上を占める「①核兵器活動」予算である。このうち議会は、種々の核弾頭の寿命延長プログラムを含む「核弾頭備蓄システム」の予算項目について、トランプ政権の FY2020 要求額をほぼ認めた。同じくこの①の予算のうち、議会がトランプ政権の要求通りに FY2019 実施予算の 2 倍近い増額を認めたのが「プルトニウム(Pu)の持続(Plutonium sustainment)」に係る予算である。この予算は、2018 年の「核態勢の見直し」⁴に沿い、2030 年迄に年間 80 個の核兵器のピット(Pu から成る核兵器のコア部分)の製造能力を確保するためのものであり、2024 年の年間 10 個の製造から開始し、最終的にはサバンナリバーサイト(SRS)で年間 50 個、ロスアラモスサイトで年間 30 個の製造を行うとしている。NNSA は、SRS において建設途中でキャンセルされた MOX 燃料製造施設(MFFF: Mixed Oxide Fuel Fabrication Facility)⁵を利用しつつ、ピット製造用 Pu 処理施設の建設に係り概要設計承認(CD-1)を得て設計を開始するために 4 億 1 千万ドルを要求していた。なお、議会では年間 80 個のピット製造の実現可能性を疑問視する声もあり、NNSA に対して、SRS 及びロスアラモスの Pu 処理インフラ及びピット製造の進捗状況等を四半期毎に議会上下両院の歳出委員会に報告することを要求している⁶。

⁴ “2018 Nuclear Posture Review”, US Department of Defense,

URL: <https://dod.defense.gov/News/SpecialReports/2018NuclearPostureReview.aspx>

⁵ 米国では露国との核兵器由来の 34トンの余剰 Pu 管理処分協定(PMDA)に基づき、Pu を MOX 燃料にして原子炉で照射して処分する(MOX オプション)ため、MFFF を建設していたが、建設コストの高騰とスケジュール遅延により、これをキャンセルし、代わりに余剰 Pu を SRS の K-Area Facility で抑制物質を用いて希釈するとの処分オプション(D&D オプション)を追求することとした。

⁶ “Most NNSA Nuke Program Funded at or Above Request in Final 2020 Approps Package”, ExchangeMonitor., 20 December 2019, p.2

(3) 国家核安全保障庁(NNSA)の「防衛核不拡散」予算

表 2 の NNSA 予算のうち、「②防衛核不拡散」が世界及び米国内の核・放射性物質のセキュリティ対策、核兵器等に利用可能な核物質等の最小化、不拡散と軍備管理、核不拡散等に係る研究開発、露国との余剰 Pu 処分管理協定(PMDA)に基づく 34 トンの余剰 Pu 処分等を実施するための予算である。

表 3 に、「②防衛核不拡散」の内訳を示す。オバマ前政権、トランプ政権そして議会は、従前から本予算に基づく NNSA の活動を重要視し、毎年、予算を増額させてきた。FY2020 においても、トランプ政権は FY2019 実施予算(19 億 3 千万ドル)から増額した 19 億 9,330 万ドルを要求し、議会もこれを更に増額し、FY2019 実施予算に比し 12.1%増額した 21 億 6,440 万ドルの配賦を認めた。

トランプ政権においては、例えば前オバマ政権が 4 回に亘り開催した「核セキュリティ・サミット」のような、核セキュリティ強化のための大きなイベントこそないものの、オバマ前政権に引き続き、核・放射性物質のセキュリティや、核兵器等に利用可能な核物質等の最小化、核拡散検知や核テロ等の際の緊急時対応といった一連の活動が継続実施される予定である。

表 3 NNSA の「防衛核不拡散」予算

	FY2019 実施予算 (千ドル)	FY2020 要求 (千ドル)	FY2020 実施予算 (千ドル)	FY2019 実施予算との比較		FY2020 要求との比較	
				増減額 (千ドル)	増減比	増減額 (千ドル)	増減比
(ア) 世界の核物質等の セキュリティ確保	407,108	342,350	442,909	35,801	1.088	100,559	1.294
国際的な核セキュリティ	46,339	48,839	58,000	11,661	1.252	9,161	1.188
国内の放射性物質の セキュリティ	127,433	90,513	147,002	19,569	1.154	56,489	1.624
国際的な放射性物質の セキュリティ	78,907	60,827	78,907	0	1.000	18,080	1.297
核密輸の検知	154,429	142,171	159,000	4,571	1.030	16,829	1.118
(イ) 核物質等の管理・ 核兵器等に利用可能な 核物質等の最小化	293,794	333,533	363,533	69,739	1.237	30,000	1.090
HEU 仕様炉の転換	0	114,000	99,000	99,000	—	-15,000	0.868
核物質の撤去	32,925	32,925	32,925	0	1.000	0	1.000
核物質等の処分	225,869	186,608	186,608	-39,261	0.826	0	1.000
研究所、パートナー支援	35,000	0	45,000	10,000	1.286	45,000	—
(ウ) 不拡散・軍備管理	129,703	137,267	140,000	10,297	1.079	2,733	1.020
(エ) 防衛核不拡散研究 開発	575,570	495,357	533,163	-42,407	0.926	37,806	1.076
拡散検知	281,521	304,040	299,046	17,525	1.062	-4,994	0.984

	FY2019 実施予算 (千ドル)	FY2020 要求 (千ドル)	FY2020 実施予算 (千ドル)	FY2019 実施予算との比較		FY2020 要求との比較	
				増減額 (千ドル)	増減比	増減額 (千ドル)	増減比
核爆発検知	195,749	191,317	196,617	868	1.004	5,300	1.028
不拡散燃料開発	98,300	0	15,000	-83,300	0.153	15,000	—
不拡散管理プログラム	0	0	22,500	2,500	—	22,500	—
(オ)不拡散構築	220,000	299,000	299,000	79,000	1.359	0	1.000
MOX 燃料製造施設	220,000	220,000	220,000	0	1.000	0	1.000
余剰 Pu 処分プロジェクト	0	79,000	79,000	79,000	—	0	1.000
(カ)核テロ対策・インシデント対応プログラム	319,185	372,095	372,095	52,910	1.166	0	1.000
核テロ対策/インシデント対応	319,185	0	0	-319,185	0.00	0	—
緊急時対応	0	35,545	35,545	35,545	—	0	1.000
テロ対策と拡散防止	0	336,550	336,550	336,550	—	0	1.000
(キ)その他	-15,360	13,700	13,700	29,060	—	0	—
計	1,930,000	1,993,302	2,164,400	234,400	1.121	171,098	1.086

表 3 の「(ア)世界の核物質等のセキュリティ」の 4 つの項目のうち、トランプ政権は FY2019 実施予算に比し、「国際的な核セキュリティ」を除く 3 つの項目を減額要求したが、議会は全項目を増額し、FY2019 実施予算(4 億 710 万ドル)に比し 8.8%、FY2020 予算要求に比し 29.4%増額させた 4 億 4,290 万ドルの配賦を認めた。

4 つの項目のうち、「国際的な核セキュリティ」予算は、トランプ政権も増額要求し、また議会は FY2019 実施予算(4,633 万ドル)に比し、25.2%増額した 5,800 万ドルの配賦を認めたものである。トランプ政権は当該予算で、内部脅威の緩和、原子力施設におけるサイバーセキュリティの改善、そして輸送時のセキュリティ強化の 3 つに焦点を当てることとし、具体的には、包括的な核セキュリティ体制の構築を目的とし、35 カ国以上の国々と法規制や査察プログラムを含む教育訓練等を実施すると共に、IAEA と協働して核セキュリティ・ガイダンス、訓練、諮問ミッション、教育プログラム及び専門家の支援を強化し、二国間、あるいは地域において内部脅威とサイバーセキュリティ脅威緩和のためのワークショップ等の開催を支援としている。

また議会は、「国内の放射性物質のセキュリティ」についても FY2019 実施予算(1 億 2,743 万ドル)に比し、15.4%増額した 1 億 4,700 万ドルの配賦を認めた。当該予算では、特にダーティ・ボム等に使用される可能性がある放射性物質のセキュリティ強化を図るものであり、このうち 4,500 万ドル以上がセシウム代替プログラム(Cesium Irradiator Replacement Program)に充当されている。

「(イ)核物質等の管理・核兵器に利用可能な核物質等の最小化」の予算項目のうち「研究所、パートナー支援」について、議会は FY2019 実施予算(3,500 万ドル)に

比し、28.6%増額した4,500万ドルの配賦を認めた。このうち1千万ドルは、モリブデン99(Mo-99)製造を意図した高濃縮ウラン(HEU)の使用を最小化させるための国内外産業界のパートナー支援に、また3,500万ドルは、Mo-99の安定した国内供給源を確立するための協力協定締結の支援等のためのものである。なおこの(イ)の「HEU仕様炉の転換」予算の増額は、「(エ)防衛核不拡散研究開発」の「不拡散燃料開発」予算からの振り替えによるものである。

「(ウ)不拡散と軍備管理」について、議会はFY2019実施予算(1億2,970万ドル)に比し、7.9%増額した1億4千万ドルの配賦を認めると共に、NNSAに対し、保障措置や核セキュリティ対策及びそれらに係る技術を、DOEの原子力局(NE局)が主導する先進炉設計に統合させるため、同局を支援するようNNSAに指示している。

「(オ)不拡散構築」について、議会は、トランプ政権のFY2020予算要求に応じ、FY2019実施予算(2億2千万ドル)に比し7,900万ドル増額した2億9,900万ドルの配賦を認めた。このうち「MOX燃料製造施設(MFFF)」の2億2千万ドルは、MFFFの建設終了(キャンセル)に係る作業、具体的には、施設や設備、機器等の解体や破棄、資産等の安全管理、会計監査等)の継続のためのものであり、FY2019実施予算でも配賦されたものである。一方、「余剰Pu処分プロジェクト」の7,900万ドルは、今次、議会が初めて認めた予算であり、DOEは、MOX処分オプションに代替するPuの希釈処分オプション(D&Dオプション)の実施に係り、実際に納品までに長期間を有するグローブボックス等の調達承認の取得を目指し、グローブボックスでのPu処理に付随する主要システム(換気、電気、セキュリティ・システム等)の設計などのグローブボックスの最終設計に向けた作業を実施するとしている。

(4) 原子力局(NE局)予算

表4に、DOEの原子力局(NE局)予算を示す。NE局の使命は、国家のエネルギー、環境及び安全保障ニーズに合致する原子力発電を前進させることであり、具体的には、①既存の原子炉の長期間に亘る運転と競争力の強化、②先進炉の開発、そして③国家の戦略的な燃料サイクルと供給チェーンのインフラ実装と維持等を目的としている⁷。

トランプ政権は、FY2019予算要求同様にFY2020予算要求でも、非国防予算(主に国防総省及びDOE/NNSAを除く省庁の予算)を大幅に削減し、NE局のFY2020予算要求でもFY2019実施予算(13億2,609万ドル)から大幅に減額した8億2,400万ドルを要求した。しかし議会はFY2019同様に、トランプ政権の意図に反し、FY2019実施予算に比し12.6%、FY2020要求(8億2,400万ドル)からは81.2%増額させた14億9,340万ドルの配賦を認めた。

NE局のFY2020の実施予算の主要ポイントは、先進炉の実証や先進炉燃料の製造の推進に重点が置かれていることである。議会は、新たに、表4の「(シ)先進炉実証プログラム」で、先進炉構想の試験と実証及びその性能を評価するための「国立原

⁷ DOE NE局ホームページ、URL: <https://www.energy.gov/ne/about-us>

子炉イノベーション・センター」を設立すると共に、新型炉の実証を行うために、2 基の先進実証炉の建設に向けて始動するための予算配賦を認めた。

また先進炉用燃料として必要とされている高アッセイ低濃縮ウラン燃料(HALEU: High-assay low-enriched uranium)の供給方法(高速増殖実験炉 EBR-II 使用済燃料の活用やウラン濃縮等)⁸について、それらの評価及び実証を行うための予算配賦を認めた。更に既存の原子炉に関しては、「(オ)先進燃料」で事故耐性燃料(ATF: Accident Tolerant Fuel)の開発の継続、加えて、「(ケ)使用済燃料処分 R&D」で、全米科学アカデミー(NAS: National Academy of Sciences)に、既存及び将来の技術を含む種々の核燃料サイクルと技術オプションのメリット及び実行可能性を評価させるための予算配賦が認められたことは、FY2020 の NE 局実施予算の特徴と言える。

表 4 原子力局(NE 局) 予算

	FY2019 実施予算 (千ドル)	FY2020 要求 (千ドル)	FY2020 実施予算 (千ドル)	FY2019 実施予算との比較		FY2020 要求との比較	
				増減額 (千ドル)	増減比	増減額 (千ドル)	増減比
(ア) 研究開発	10,000	0	10,000	0	1.000	10,000	—
総合大学プログラム	5,000	0	5,000	0	1.000	5,000	—
STEP R&D	5,000	0	5,000	0	1.000	5,000	—
(イ) 原子力エネルギー実現 技術	152,585	98,450	113,450	-39,135	0.744	15,000	1.152
(ウ) 燃料サイクルの研究開発	0	40,000	42,000	42,000	—	2,000	1.050
民生用ウラン濃縮	0	40,000	0	0	—	-40,000	0.00
核燃料のサイクルフロントエンド ⁸	0	0	42,000	42,000	—	42,000	—
採掘、転換、輸送	0	0	2,000	2,000	—	2,000	—
民生用ウラン濃縮	0	0	40,000	40,000	—	40,000	—

⁸ HALEU は、ウラン 235 の濃縮度を 5～20%に高めたもので、先進炉での利用が意図されている。HALEU 燃料を使用する利点の 1 つは、10 年間の長期の燃料交換サイクルが可能になることである。米国では現在、HALEU の製造が可能な商業施設が存在しないが、DOE は、2020 年 10 月までにウラン 235 の濃度を 19.75%まで濃縮するための 16 段カスケード装置を導入すること、また既存の米国起源の濃縮技術を用いて HALEU を生産する能力を実証すること等を目的に、HALEU 実証プロジェクトを進めている。現在 DOE は、①電解法(Electrochemical processing)で EBR-II(1964 年～1994 年に運転された高速増殖実験炉)の使用済燃料から HEU を回収しそれをダウブレンドする方法、②ZIRCEX 法で海軍原子炉の HEU 使用済燃料から HEU を回収しそれをダウブレンドする方法、さらに③ウラン濃縮法での HALEU 燃料製造を検討している。①について DOE は、アイダホ国立研究所(INL) の燃料・材料研究複合施設(MFC: Materials and Fuels Complex)及び/またはアイダホ原子力技術工学センター(INTEC: Idaho Nuclear Technology and Engineering Center)で、10 トンの HALEU 製造を行うことを意図している。また③について、DOE は、2019 年 11 月、セントラス・エナジー社(旧 USEC)とオハイオ州パイクトンの「米国遠心分離プラント(ACP: American Centrifuge Plant)」での遠心分離機カスケード配備に係る 3 年契約を締結した。(参考: John Herczeg, High-Assay Low Enriched Uranium (HALEU), Nuclear Energy Advisory Committee Meeting, 28 March 2019, URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/04/f61/HALEU%20Report%20to%20NEAC%20Committee%20-28-19%20%28FINAL%29.pdf>, 新型原子炉用 HALEU の生産実証で米セントラス社がエネ省と 3 年契約」、日本原子力産業協会ニュース、2019 年 11 月 7 日、URL: <https://www.jaif.or.jp/191107-a>、「米 DOE、次世代原子炉用の新型燃料への出資を発表」、Forum on Energy, 2019 年 2 月 11 日、URL: <http://forumonenergy.com/2019/02/11/10646/?lang=ja>)

	FY2019 実施予算 (千ドル)	FY2020 要求 (千ドル)	FY2020 実施予算 (千ドル)	FY2019 実施予算との比較		FY2020 要求との比較	
				増減額 (千ドル)	増減比	増減額 (千ドル)	増減比
(エ)核物質等の回収と廃棄物形態の開発	38,000	6,000	30,000	-8,000	0.789	24,000	5.000
(オ)先進燃料	125,000	36,000	125,600	600	1.005	89,600	3.489
先進燃料	125,000	36,000	0	-125,000	0.00	-36,000	0.000
事故耐性燃料	0	0	95,600	95,600	—	95,600	—
Triso Fuel and Graphite Qualification	0	0	30,000	30,000	—	30,000	—
(カ)システム分析と統合	8,500	0	0	-8,500	0.00	0	—
(キ)核物質防護と計量管理技術	6,000	3,000	0	-6,000	0.00	-3,000	0.000
(ク)燃料サイクル研究所 R&D	0	0	20,000	20,000	—	20,000	—
(ケ)使用燃料処分 R&D	63,915	5,000	62,500	-1,415	0.978	57,500	12.500
(コ)統合放射性廃棄物管理システム	22,500	0	25,000	2,500	1.111	25,000	—
(サ)原子炉概念 R&D	323,500	215,150	267,000	-56,500	0.825	51,850	1.241
先進 SMR の R&D	100,000	10,000	100,000	0	1.000	90,000	10.000
軽水炉の持続性	47,000	30,150	47,000	0	1.000	16,850	1.559
先進炉技術	111,500	75,000	55,000	-56,500	0.493	-20,000	0.733
多目的先進試験炉 R&D	65,000	100,000	65,000	0	1.000	-35,000	0.650
(シ)先進炉実証プログラム	0	0	230,000	230,000	—	230,000	—
国立原子炉イノベーションセンター	0	0	20,000	20,000	—	20,000	—
実証炉 1	0	0	80,000	80,000	—	80,000	—
実証炉 2	0	0	80,000	80,000	—	80,000	—
将来の実証のためのリスク削減	0	0	30,000	30,000	—	30,000	—
規制の開発	0	0	15,000	15,000	—	15,000	—
先進炉保障措置	0	0	5,000	5,000	—	5,000	—
(ス)国際協力	3,000	0	0	-3,000	0.000	0	—
(セ)その他	573,090	420,400	567,858	-5,232	0.991	147,458	1.351
計	1,326,090	824,000	1,493,408	167,318	1.126	669,408	1.812

上記のうち、(ウ)～(シ)の詳細は以下のとおりである。

(ウ)の「核燃料サイクルのフロントエンド」のうち、「採掘、転換、輸送」について、議

会は新たに 200 万ドルの配賦を認めると共に、DOE に対して、歳出法案成立後、60 日以内に連邦研究開発センター(FFRDC: Federally Funded Research and Development Center)⁹または他の独立機関と契約して、産業界と協働し、米国における採掘と転換を再構築する上で鍵となる課題を特定すること、さらに FFRDC または独立機関は、法案の成立後 180 日以内に上下両院の歳出委員会に課題と勧告を提出することを指示している。

また同じ(ウ)の「民生用ウラン濃縮」について、議会はトランプ政権の要求通りに 4 千万ドルの配賦を認めると共に、DOE に対して、国立研究所と産業界全体で専門家チームを設立し、HALEU の予想需要と需要のタイミング、需要を満たすためのオプションを評価すること、チームは法案成立後 180 日以内に上下両院の歳出委員会に課題と勧告を提出すること、また HALEU を輸送する際に鍵となる課題を同定するために核物質の輸送経験を有する企業と契約し、当該企業は法案成立後 180 日以内に課題と勧告を提出することを求めている。

(エ)の「核物質等の回収と廃棄物形態の開発」について、議会は 3 千万ドルの配賦を認めたが、そのうち少なくとも 800 万ドルは、HALEU 燃料製造のための EBR-II 使用済燃料の処理に利用されるとしている。

(オ)の「先進燃料」のうち、「(既存の原子炉用の)事故耐性燃料(ATF: Accident Tolerant Fuel)」では、9,560 万ドルの配賦を認めたが、その内訳は以下の通りである。

- 費用分担型の研究開発プログラムにおいて、産業界が主導する 3 つのチーム¹⁰への支援(5,560 万ドル)
- 国立研究所、先進試験炉及び過渡事象試験炉(TREAT: Transient Reactor Test Facility)を含むその他の施設での ATF の開発支援(2,000 万ドル)
- 試験、コード開発、より高い濃縮度及び高燃焼度燃料の許認可費用(1,500 万ドル)
- 軽水炉で使用される炭化ケイ素セラミック基複合被覆材の開発(500 万ドル)。

(ク)の「燃料サイクル研究所 R&D」では、議会は 2 千万ドルの配賦を新たに認めると共に、DOE に対して、革新的なプロセス制御機能を使用した研究開発を進め、先進炉のクローズド核燃料サイクルを支援するよう指示している。

(ケ)の「使用済燃料処分 R&D」の項目では、議会は FY2019 実施予算(6,391 万ドル)に比し、2.2%減額した 6,250 万ドルを認めた。また議会は DOE に対して、輸送条件下での使用済燃料の挙動と輸送中の使用済燃料棒の安全性の改善に係る研究を実施すること、歳出法案成立後 90 日以内に、高レベル放射性廃棄物と使用済燃料管理に係る革新的なオプションについての報告書を議会上下両院の歳出委員会に提出

⁹ FFRDC は、連邦各省が民間との契約により設置し、特定の長期的な研究を実施する GOCO(連邦政府が所有し、非連邦政府機関が運営する)の研究センター。各センターは連邦政府の資金で運用されるが、実際の運営は設置された大学や企業、非営利機関等により実施される。

¹⁰ フラマトム社、グローバル・ニュークリア・フュエル社(GNF、日立と GE の合弁会社)、ウェスチングハウス(WH)社

すること、さらに、歳出法案成立後 180 日以内に、放射性廃棄物の核変換技術について、科学的基盤の評価、放射性廃棄物及びその貯蔵に対して考え得る効果、原子力産業へのメリット、そして核セキュリティへの意義に係る評価を含む報告書を議会上下両院の歳出委員会に提出することを指示している。

加えて本予算下において全米アカデミー¹¹は、DOE と契約し、先進炉の廃棄物の側面に係る包括的で独立した研究、具体的には、既存及び将来の技術を含む種々の核燃料サイクルと技術オプションのメリット及び実行可能性を評価することになった。評価では、核燃料サイクルの全ての要素(廃棄物の輸送、貯蔵、処分を含む)間の連携、より広範な安全性、核セキュリティ、そして核不拡散の懸念も考慮することになっている。また全米アカデミーのうち、全米科学アカデミー(NAS)は、そのメンバーが先進炉、廃棄物処分、再処理、経済性、そして NAS が研究の完遂に不可欠であると考え他の専門分野の専門知識を持つ委員から構成される委員会を招集し、委員会は以下を含む事項を評価することになっている。

- 提案されている種々の先進炉技術(「第 4 世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF: Generation IV International Forum)」¹²及び DOE が検討中の原子炉の設計を含む)について、懸念される放射性同位体、放射能レベル、熱負荷を含む廃棄物ストリームの典型的な量(容積)と特性
- 廃棄物に固有の処分または貯蔵要件
- 廃棄物の発生について、使用済燃料の再処理の可能性及びその影響
- 先進炉に必要な可能性がある廃棄物処理システムの経済性

上記の研究結果は、歳出法制定後 20 カ月以内に上下両院の歳出委員会に提出される。

なお、トランプ政権の FY2020 予算要求には盛り込まれていたヤッカマウンテン高レベル放射性廃棄物処分場に係る予算は盛り込まれていない。また操業中の核廃棄物隔離試験施設(WIPP: Waste Isolation Pilot Plant、軍事起源の TRU 廃棄物の地層処分場)については、FY2019 実施予算と同額の 3 億 9,690 万ドルの配賦が認められた。

(サ)の「原子炉概念 R&D」では、FY2019 実施予算(3 億 2,350 万ドル)から 17.5% 減額されているものの、議会は計 2 億 6,700 万ドルの配賦を認めた。本予算における FY2020 の主要な実施内容及び配賦額は以下の通りである。

- 「先進 SMR 研究開発」: プログラムの共同実施 (1 千万ドル)
- 「軽水炉の持続性」: 原子力発電サイトでの水素製造の実証及び原子力の水素販売市場への参入支援(1,100 万ドル)

¹¹ 記者注: 全米アカデミー(United States National Academies)は、全米科学アカデミー(NAS: National Academy of Sciences、1863 年設立)、全米技術アカデミー(NAE: National Academy of Engineering、1964 年設立)、全米医学アカデミー(NAM: National Academy of Medicine、1970 年設立)及び全米研究評議会(NRC: United States National Research Council、1916 年設立)の 4 組織から構成される。

¹² GIF で検討されている 6 つの炉型は、ナトリウム冷却炉(SFR)、超高温ガス炉(VHTR)、ガス冷却高速炉(GFR)、超臨界水冷却炉(SCWR)、鉛冷却高速炉(LFR)及び熔融塩炉(MSR)。

-
- 「先進炉技術」: 実証フェーズに向けて原子炉設計を進めることに焦点を当てた少なくとも 2 つの新たな官民パートナーシップの提案(solicitation)支援、メガワット規模の原子炉の研究開発、先進炉研究所の研究開発 (計 5,500 万ドル)
 - 「多目的先進試験炉(VTR)¹³研究開発」: 2026 年初頭の VTR 完成を目指し、2020 年 10 月またはそれ以前に優先プロジェクトの暫定的なコスト見積もりを完了させるための作業の実施(6,500 万ドル)

(シ)の「先進炉実証プログラム」は、上述の通り、FY2019 実施予算及びトランプ政権の FY2020 予算要求にもなかったものであるが、議会は 2 億 3 千万ドルの配賦を認めたものであり、FY2020 における NE 局の主要活動の一つである。本プログラムの目的は、DOE 及び非連邦政府の財源を、安全かつ短・中期間で建設・運転が手頃な価格で実現可能な実証炉の実際の建設に集中させることとされており、議会は DOE に対して、調達プロセスを合理化し、プログラムの実施が遅延しないよう積極的に行動するよう求めている。FY2020 における当該予算項目の主要な実施内容及び配賦額は以下の通りである。

- 「国立原子炉イノベーション・センター(NRIC: National Reactor Innovation Center)」の設立(2 千万ドル): NRIC は、2018 年 9 月に成立した「2017 年原子力技術革新法(NEICA)」でその設置が規定され、また DOE が 2019 年 8 月に発表したイニシアティブ¹⁴に盛り込まれているものである。DOE と民間企業のパートナーシップを通じて新しい原子力システムの許認可と商業化を加速するため、NRIC を建設し民間部門の技術開発者に対して先進炉構想の試験と実証及びその性能を評価するために必要な支援を提供するとしている。
- 「先進実証炉」(1,600 万ドル): 議会は DOE 長官に対して、FY2019 歳出法案の成立後 30 日以内に、今後 5~7 年以内に稼働可能な 2 基の先進実証炉の建設の提案を求めること、また評価委員会を設置して提案を評価し、委員会が以下の基準に基づいて提案を受領してから 30 日以内に上記の基準を最もよく満たす 2 つの提案を DOE 長官に勧告すること、そして DOE 長官は、そのような選択が国益にならないことを証明しない限り、評価委員会の勧告に従い、提案を行ったチームと契約を締結することを指示している¹⁵。

¹³ VTR は、新型炉技術の研究開発で重要な役割を担う高速中性子の照射施設で、米国内では同施設が 20 年以上、存在しておらず、2018 年 9 月に成立した「2017 年原子力技術革新法(NEICA)」でも、先進炉の開発を進める上で、その必要性が強調されていた。2019 年 2 月、ペリーDOE 長官(当時)は、VTR 開発プロジェクトに着手した旨を発表し、2026 年初頭に VTR を完成させるべく、概念設計に入る方針を明らかにした。これに先立つ 2018 年 11 月、DOE は、VTRプロジェクトの支援企業として、日立GEニュークリア・エナジーが開発したモジュール式のナトリウム冷却高速炉(PRISM 炉)技術を選定している。現在、VTR の建設が考慮されているサイトは 2 つあり、1 つは INL、2 つはテネシー州東部のオークリッジ国立研究所である。(参考:「米エネ省、新型炉技術開発で多目的試験炉プロジェクトに着手」、原子力産業協会ニュース、2019 年 3 月 6 日、URL:<https://www.jaif.or.jp/190306-a>、他)

¹⁴ <https://www.energy.gov/ne/articles/energy-department-launches-new-demonstration-center-advanced-nuclear-technologies>

¹⁵ DOE は、原子炉設計の開発に係るリスクを低減するために、上述の 2 基以外の先進炉の実証に係り最大 5 つのチームに追加的に予算を配賦することも計画している。

- ✓ 5～7年以内に先進炉の実証ができるという技術的実現可能性
 - ✓ 米国原子力規制委員会(NRC)が原子炉の安全運転のために設計を許認可できる可能性
 - ✓ 燃料設計に係り許認可を受けた燃料の使用、または5～7年以内に許認可を受ける明確な過程の実証
 - ✓ 本格的な原子炉建設の設計と発電コストが手頃な価格であること
 - ✓ コストの一部を担うチームの能力
 - ✓ 先進炉技術の実証を希するチームの技術的能力と資格
- 更に議会は、先進炉に係る「規制の開発」を国立研究所が原子力規制委員会(NRC)と実施するために1,500万ドルを、また先進炉に対する固有の「保障措置」課題を評価するために、500万ドルを配賦している。

(5) その他の予算(原子力規制委員会(NRC)予算、IAEAへの特別拠出)

表5 原子力規制委員会(NRC)予算

	FY2019 実施予算 (千ドル)	FY2020 要求 (千ドル)	FY2020 実施予算 (千ドル)	FY2019 実施予算との比較		FY2020 要求との比較	
				増減額 (千ドル)	増減比	増減額 (千ドル)	増減比
給与及び費用	898,350	907,765	842,236	-56,114	0.938	-65,529	0.928
歳入	-770,477	-748,669	-717,125	53,352	—	31,544	—
監察総監室	12,609	13,314	13,314	705	1.056	0	1.000
歳入	-10,355	-10,929	-10,929	-574	—	0	—
計	130,127	161,481	127,496	-2,631	—	-33,985	—

FY2020のNRCの給与及び費用としては、FY2019実施予算(8億9,835万ドル)に比し6.2%減額した8億4,223万ドルが配賦されたが、このうち7億1,712万ドルは歳入から賄われるため、実際の実施予算は1億2,511万ドルとなる。このうち、1,547万ドルが先進炉技術の規制インフラ開発関連活動に配賦されている。監察総監室予算を入れたFY2020のNRC実施予算は、FY2019実施予算(1億3,012万ドル)に比し2%削減された1億2,749万ドルとなっている。

その他、国際原子力機関(IAEA)への特別拠出金としては、トランプ政権のFY2020要求額の8,800万ドルに比し、7.7%増加させた9,480万ドルが認められた¹⁶。

【報告:政策調査室 田崎 真樹子】

¹⁶ 下院歳出委員会ホームページ、

URL:<https://appropriations.house.gov/sites/democrats.appropriations.house.gov/files/HR%201865%20-%20Division%20G%20-%20SFOPs%20SOM%20FY20.pdf>

2-2 イラン核合意を巡る動向（2020年1月）

2015年、イランは英仏独米中露と包括的共同作業計画(JCPOA、イラン核合意)を結んだが、2018年5月8日の米国トランプ政権の核合意離脱後、米国のイランへの経済制裁の再開により経済的状況が改善されないことを不満とし、米国の合意離脱後1年となる2019年5月8日、イランのロウハニ大統領は、報復措置として核合意の履行を一部停止すると宣言した。宣言の中で、60日後状況が改善されなければ新たな合意履行の停止に踏み切ると警告した。

このようなイランの合意履行の停止に際し、JCPOA 当時国である英仏独は、イランに対し合意枠内への復帰を促すとともに、米国の制裁を迂回し、円滑な金融取引のための特別目的事業体である「貿易取引支援機関(Instrument for Supporting Trade Exchanges: INSTEX)」を2019年1月31日に設置する等、JCPOA 維持に向けた努力は継続しているものの、イランの期待に応えるものとなっていなかった。

このためイランは、核合意停止の第1弾として濃縮ウランと重水量の上限の順守を停止(2019年5月)、第2弾としてウラン濃縮度の上限を超える濃縮度のウランを生産(同7月)、第3弾として遠心分離機の研究開発に関する制限を停止(同9月)、第4弾としてフォルドの地下ウラン濃縮施設でのウラン濃縮を再開(同11月)する等、60日毎に段階的に合意の停止範囲を拡大した。ただし、欧州側が合意を履行すれば、イランも合意に復帰するとしていた。

2020年1月3日の米軍によるイラン革命防衛隊のソレイマニ司令官殺害に際し、イランは、1月5日核合意で規定されたいかなる制限も遵守しないと、無制限にウラン濃縮を行うと表明した¹⁷。これに対し英仏独は、JCPOA に規定され、国連制裁の再開(スナップバック)に道を開く「紛争解決メカニズム」の手続きを進めるとした共同声明¹⁸を1月14日に発表するなど、核合意の維持に向けて、今後ぎりぎりの駆け引きが続くと予想される。外交交渉により解決された画期的な事例である JCPOA の維持に向けた今後の関係国の努力が期待される。

¹⁷ 2020/1/6, ParsToday 報道, 「イラン政府「ウラン濃縮量等において、今後一切の制限がなくなる」」,
URL:<https://parstoday.com/ja/news/iran-i58013>

¹⁸ 2020/1/14, E3 foreign ministers' statement on the JCPoA:14 January 2020,
URL:<https://www.gov.uk/government/news/e3-foreign-ministers-statement-on-the-jcpoa-14-january-2020>

これまでのイランの核合意履行停止状況について、各段階毎に、表 1 に整理する。

表 1 イランの核合意の段階的履行の停止

	内容	備考
第 1 段階 2019/5/8	濃縮ウランと重水保有量の制限順守の停止	2019/7/1 濃縮ウラン保有量が制限を超過 ¹⁹ 2019/11/16 重水保有量が制限を超過 ²⁰
第 2 段階 2019/7/8	ウラン濃縮度の制限順守の停止	2019/7/8 ナタンズのウラン濃縮施設でウラン濃縮度が制限を超過 ²¹
第 3 段階 2019/9/5	遠心分離機に関する研究開発制限の撤廃	2019/9/8 ナタンズのパイロットウラン濃縮施設で、試験用遠心分離機の設置とウラン試験に向けた配管作業に着手 ²²
第 4 段階 2019/11/5	フォルド濃縮施設でのウラン濃縮再開	2019/11/9 フォルド濃縮施設で、6 カスケードのうち 2 カスケードにウラン供給開始 ²³
第 5 段階 2020/1/5	ウラン濃縮に係る制限の撤廃	イランでの IAEA による査察活動は継続される。

【報告:政策調査室 清水 亮、中谷 隆良】

¹⁹ GOV/INF/2019/8, URL:<https://www.iaea.org/sites/default/files/19/07/govinf2019-8.pdf>

²⁰ GOV/INF/2019/17, URL:<https://www.iaea.org/sites/default/files/19/11/govinf2019-17.pdf>

²¹ GOV/INF/2019/9, URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/19/07/govinf2019-9.pdf>

²² GOV/INF/2019/10, URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/19/09/govinf2019-10.pdf>

²³ GOV/2019/55, URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/19/11/gov2019-55.pdf>

3. 技術紹介

3-1 核セキュリティ事象初動対応のための機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析

平成 30 年度日本学術振興会科学研究費助成事業(科研費)の採択課題「機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析に基づく核種判定」(18K04646)²⁴の研究成果を、第 40 回日本核物質管理学会年次大会(2019 年 11 月 19 日～20 日、於 東京国際交流館プラザ平成)において、タイトル「核セキュリティ事象初動対応のための機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析 -検出器シミュレーションによる学習データの構築及び核種判定アルゴリズムにおける有用性の検討-」と題して論文発表を行い、最優秀論文賞を受賞した。本研究の概要と今後について紹介する。

近年、規制の管理外の核物質やその他放射性物質(MORC²⁵)に関連する犯罪行為や核・放射線テロ行為といった核セキュリティ事象の脅威が国際的な懸念事項になっている。特に我が国においては、2020 年の東京オリンピック・パラリンピックや 2025 年の大阪万国博覧会等の大規模イベントの開催を控え、核セキュリティ事象を含むテロ行為等への対応能力整備が進められている。MORC に起因する核セキュリティ事象の発生現場では、現場初動対応者の被ばくリスク低減や速やかな事後対応のために、原因物質を迅速に特定・把握することが必要不可欠となる。

核セキュリティ事象の現場で原因となる核種を特定するための資機材として、放射線検出器を使用した携帯型核種判定装置(RIID²⁶)が広く使用されている。RIID による核種判定には測定したガンマ線スペクトルから核種特有のピークエネルギーとピーク面積の解析などが必要となるが、検出器のコストや計数効率の関係から、現在市販されている携帯型 RIID ではヨウ化ナトリウム(NaI(Tl))に代表されるエネルギー分解能が低い検出器(¹³⁷Cs の 662keV で約 7%)が使用されることが多く、そのため判定可能核種数や判定精度といった性能が限定的となる技術的な課題が存在している。一方、実験室等で使用される高純度ゲルマニウム(HPGe)検出器に代表されるエネルギー分解能が高い検出器(662keV で約 0.5%)は、核種判定精度は非常に高いが、使用するために冷却が必要で、かつ価格が非常に高価であるといった理由から、核セキュリティ事象の初動対応現場では広く普及していない。また、NaI(Tl)のような安価な検出器を使用した携帯型 RIID を使用して精度の高い核種判定を行うためには、放射線測定やスペクトル解析などに関する十分な経験と高度な知識が必要となるが、核セキュリティ事象における初動対応者(日本では主に警察官が想定される)の多くにこれらを習得させることは困難である。

近年、サンプルとなるデータ(学習データ)から有用な特徴などを抽出し、人間の学習能力や経験則などに基づく高度な異常検知、分類・判断といった機能をコンピュー

²⁴ 警察庁科学警察研究所 土屋兼一 主任研究官との共同研究

²⁵ Material Out of Regulatory Control

²⁶ Radio-Isotope Identification Device

タ上で実現する機械学習技術が幅広い分野で活用されている。画像解析等の分野では、機械学習モデルは学習データから抽出した特徴から分類・判断を行うという特性において人間よりも精度の高い分析が可能であることも示されており、複雑なスペクトル解析をもとにした核種判定に対する有用性は非常に高いと考えられる。以上から本研究では、放射性核種判定を高精度・迅速かつ自律的に行うためのハンドヘルド型RIIDの開発を最終目標として、機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析の基礎技術の研究を進めている。

1. 機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析

機械学習とは、学習データを入力として解析を行い、そのデータから抽出された有用な特徴(パターン・基準など)から目的となる変数をモデル化し、構築したモデルを用いて新たなデータについて予測を行うという一連の処理を実行するためのコンピュータアルゴリズムの総称である。近年、人工知能(AI)の根幹的な技術として画像解析を始めとした様々な分野で研究開発が進められているが、与えられたデータをもとに変数間の相関等を解析しモデルを構築するという意味では、回帰分析等の統計学的分析手法と根底は同じものであると考えられる(統計学ではデータの説明に重きを置くが、機械学習ではデータから予測することに重きを置く)。

図1に示すように、ガンマ線スペクトルから核種判定を行う場合、一般的な方法として①ピーク検知、②ピーク位置・半値幅の解析、③ピーク面積の算出といった解析を行う必要がある(③は核種判定には不要な場合もある)、特に低エネルギー分解能の検出器で測定したガンマ線スペクトルを対象とした解析では、ガウス分布関数等によるフィッティングや不確かさの評価など統計学的な知識・経験が必要となる場合も想定される。この核種判定におけるスペクトル解析に機械学習を応用する場合、①スペクトルデータの前処理、②データ学習、③目的変数(ピーク面積など)のモデル化といった解析が必要になるが、機械学習ではこれら全てが(あるいは①以外が)コンピュータアルゴリズムによって自動的に処理されるため、一般的な方法と比較して高度な知識・経験を必要としなくても自律的に核種判定が実行可能である。その一方、機械学習では学習データをもとにピーク面積といった目的変数のモデル化を行うことから、学習データが網羅する範囲を逸脱したデータについて新しい予測を行う場合に精度が非常に低くなる問題が発生する。そのため高精度な機械学習モデルの構築には、より広い範囲をカバーした膨大な学習データセットが必要となるという、技術的な課題が存在する。

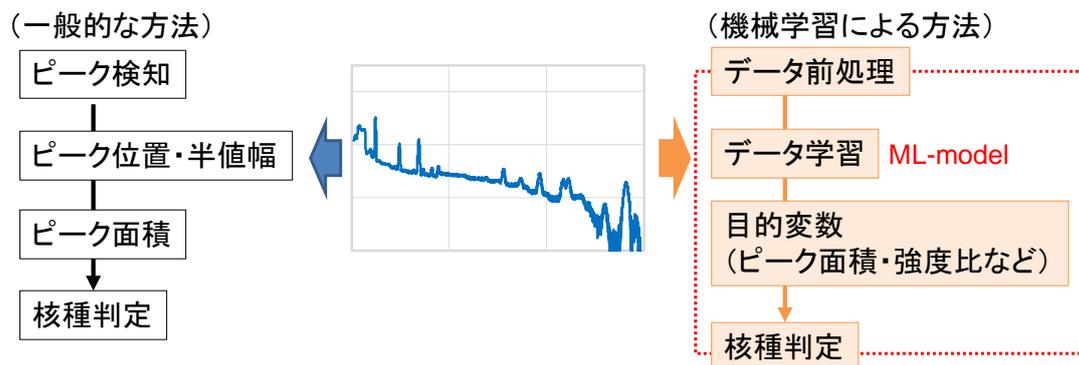


図 1:機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析

2. 検出器シミュレーションによる大規模な学習データの構築²⁷

先述のように、機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析では、核種判定を目的とした高精度な機械学習モデルの実現のために大規模な学習データセットが必要となる点が、大きな技術的課題のひとつである。本研究では、乱数を用いた数値計算法として中性子や光子輸送計算に使用されているモンテカルロ法を使用した検出器シミュレーションによる学習データの構築手法と、核種判定アルゴリズムにおけるその有用性に関して検討を行った。

機械学習を応用した核種判定アルゴリズムの対象とする検出器として、携帯型のHPGe 検出器である ORTEC 社 MicroTrans²⁸を選択した。本研究における学習データ構築手法では、はじめにモンテカルロ計算コードである MCNP6²⁹により、単一エネルギーガンマ線を発生する点線源に対する検出器応答スペクトルをシミュレーションすることでエネルギー毎のスペクトルデータセットを構築する。次に、対象となる放射性核種を ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ¹⁵²Eu, ²³⁵U, ²³⁸U と自然由来核種 (⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th) の 10 核種とし、各核種の放射能強度を乱数で与えることで線源に対する計数スペクトルを合成する。本手法により、比較的短時間で様々な条件の線源の測定を模擬した大規模な計数スペクトルの学習データセットを構築することが可能である。図 2 に本研究の手法で合成した模擬スペクトルと実際の測定スペクトルの比較例を示す。本手法で模擬したスペクトルについては、約 100keV 以上のエネルギー領域において、線源核種に起因するガンマ線ピークや散乱線、自然由来核種に起因するバックグラウンドを含む計数スペクトルを精度よく模擬できることを確認した。

²⁷ 木村祥紀, 土屋兼一, 「核セキュリティ事象初動対応のための機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析 - 検出器シミュレーションによる学習データの構築及び核種判定アルゴリズムにおける有用性の検討-」, 第 40 回日本核物質管理学会年次大会論文集 (2019)

²⁸ URL:<https://www.ortec-online.com/-/media/ametektortec/brochures/micro-trans-spec.pdf>

²⁹ C.J.Werner et.al., LA-UR-18-20808 (2018).

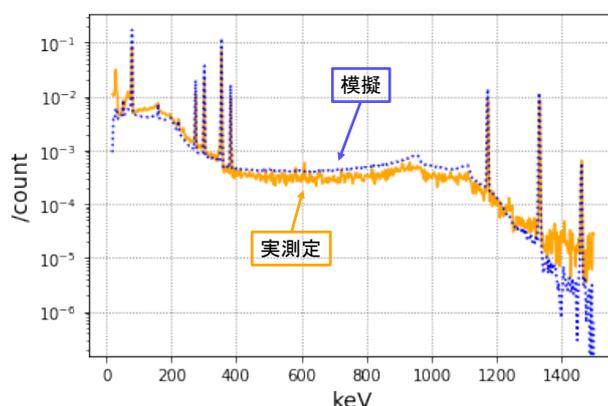


図 2: 模擬スペクトルと測定スペクトルの比較例
 ^{60}Co (25kBq, 20cm) + ^{133}Ba (201kBq, 40cm)

3. 機械学習を応用した核種判定アルゴリズム

携帯型 HPGe 検出器で測定した計数スペクトルを解析して核種判定を行うアルゴリズムについて、本研究では人工ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network: ANN)モデルを使用したアルゴリズムを開発した。ANN モデルは脳神経を模擬した人工ニューロンで構成される回路網を用いた機械学習モデルであり、画像や波形データを対象としたモデルについて多数の実績を有している。

本研究で開発した核種判定アルゴリズムでは、解析対象エネルギー領域における全ガンマ線計数に対する各核種に起因するガンマ線計数比(Count Contribution Ratio: CCR)を目的変数とする多変数回帰推定 ANN モデルを構築し、核種計数比に基づいた核種判定を行う。図 3 に本アルゴリズムの概要を示す。先述の対象 10 核種それぞれに起因するガンマ線計数比を ANN モデルで推定した後、自然由来核種(^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th)の計数比の合計である自然由来計数比(CCR_{NORM})と線源核種の計数比を比較することで検知核種を判定する。なお ANN モデルの学習では、検出器シミュレーションで構築した学習データセットのみを使用している。

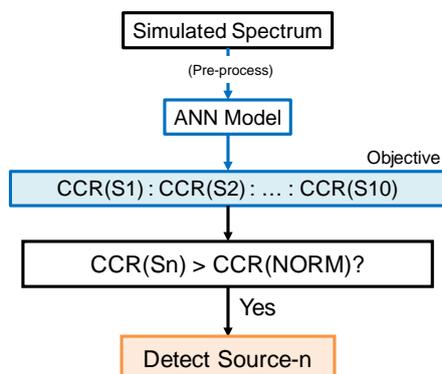


図 3: ANN モデルを使用した核種判定アルゴリズムのフロー

本研究で構築した ANN モデルを用いて実際の線源を測定した計数スペクトルについて核種計数比を推定した結果を図 4 に示す。シミュレーションベースのデータセットで学習した ANN モデルにより、実測データについても核種計数比を非常に高い精度で推定可能であることが確認できる³⁰。本研究のアルゴリズムの核種判定性能を評価した結果、標準線源(⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ¹⁵²Eu)を単数または複数、5 分間にわたって測定した 18 ケースについて、検知性能の評価尺度である F-score³¹=1 となり非常に高い核種判定性能を有していることを確認した。また図 5 に示すように、本アルゴリズムでは崩壊系列を含む複雑なスペクトルを有する核種(²³⁵U, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²³²Th)の計数比推定も可能であり、²³⁵U と ²³⁸U の計数比に基づいたウラン濃縮度の評価も可能である(図 6)。

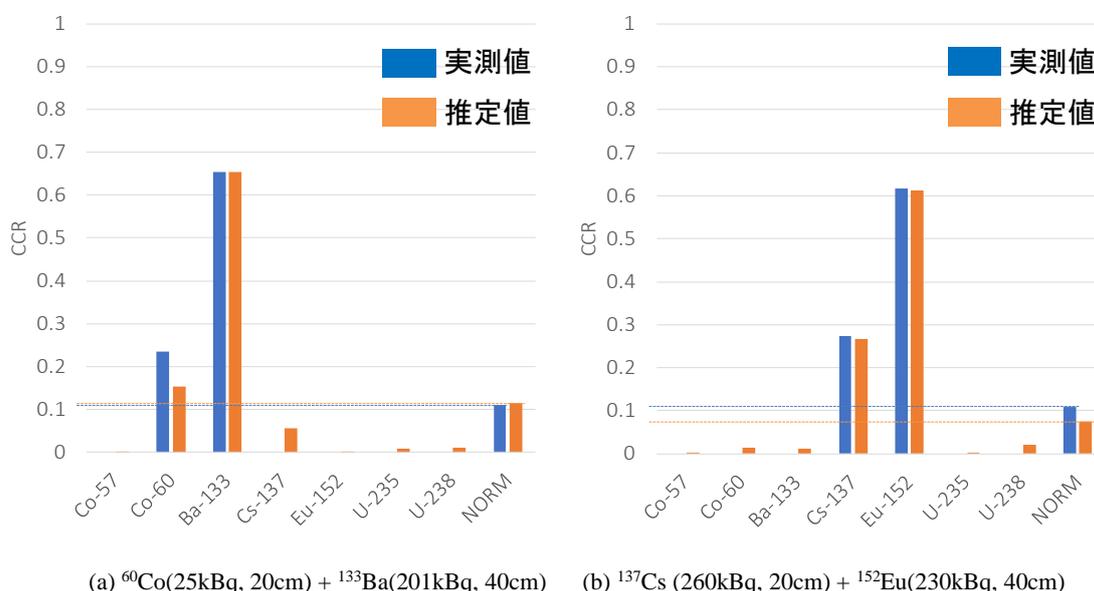
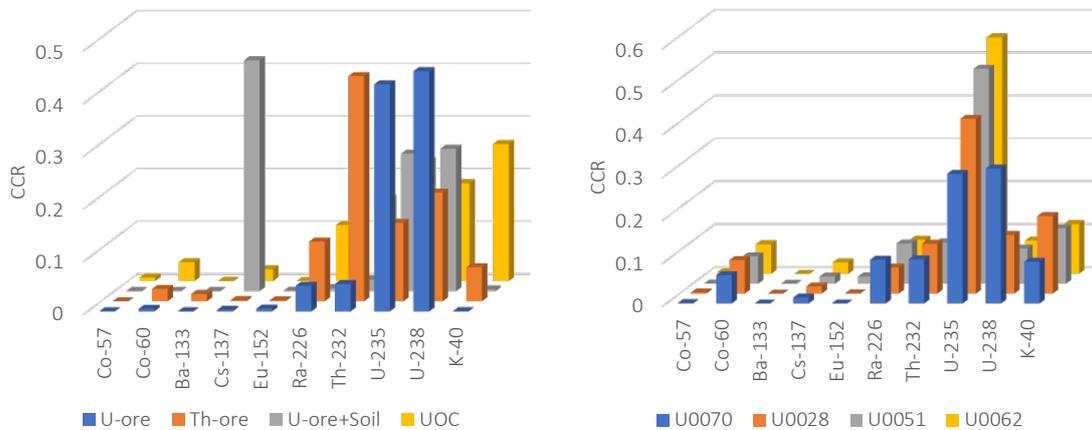


図 4: ANN モデルによる核種計数比の推定結果

³⁰ 一般的なガンマ線スペクトル解析ではスペクトルにおけるピーク部分のみに基づいた評価しかできないが、本研究で構築した ANN モデルではピーク部分だけでなく散乱線部分も含めた計数比の推定が可能である。

³¹ 適合率 (precision (p)): 検知核種のうち、誤検知を除いて正しく検知できたものの割合) と再現率 (recall (r)): 検知基準強度以上の核種のうち、検知できたものの割合) の調和平均 (F-score=2p·r/(p+r))。検知性能の評価尺度として一般的に使用されている。



(a) U, Th 鉱石、U 鉱石+土、ウラン精鉱

(b) U 標準線源(濃縮度:0.7-6.2%)

図 5:ウラン、トリウム物質の核種計数比の推定結果³²

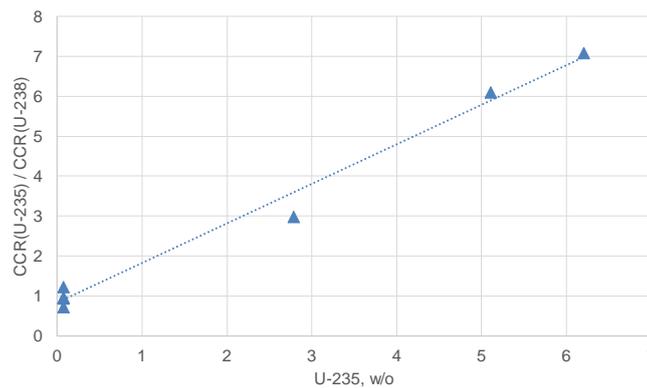


図 6:²³⁵U と ²³⁸U の相対計数比の推定結果(天然ウラン～6.2%濃縮ウラン)

4. まとめと今後

本研究では、放射性核種判定を高精度・迅速かつ自律的に行うためのハンドヘルド型 **RIID** の開発を最終目標とした、機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析の基礎技術の研究を進めている。これまでに検出器シミュレーションによる学習データセットの体系的な構築方法を考案し、携帯型 **HPGe** 検出器を対象とした高い核種判定性能を持つアルゴリズムを開発した。以上により、検出器シミュレーションによる学習データの構築が機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析に有効であることを確認した。

³² 特筆すべき点として、左図において Th 鉱石では ²³²Th について高い推定値が得られており、U 鉱石+土では土壤中に含まれる ¹³⁷Cs(福島由来と考えられる)について高い推定値が得られている。U 標準線源(右図)では、濃縮度に従い ²³⁵U の推定値が上昇していることを確認できる。

本研究ではこれまで 10 核種を対象とした核種判定アルゴリズムを開発しているが、より多数の核種を対象としたアルゴリズムの開発も可能であると考えられる。

今後の課題として、統計精度が低いスペクトルデータに対するモデル回帰推定精度の向上や、自然由来核種を含むバックグラウンドに起因する計数比推定精度の向上などが挙げられる。また現在、本研究の最終目標である低エネルギー分解能検出器を対象とした核種判定アルゴリズムの開発を進めている。本研究により、放射線計測分野における実用的な機械学習応用技術として、事象対応の迅速性が求められる核セキュリティ事象の現場において、放射線計測に関して十分な知識・経験がない現場初動対応者が測定環境の悪い状況下でも自律的に原因核種の判定を行うことが可能な技術の実現を目指す。

【報告:技術開発推進室 木村 祥紀】

4. 活動報告

4-1 原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティに係る国際フォーラム 『「2020」とその先の世界を見据えた核セキュリティの課題と方向性』結果報告

1. 本フォーラムの開催目的

JAEA は、原子力平和利用の推進に不可欠な核不拡散・核セキュリティに関する理解の増進を目的として、毎年、「原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティに係る国際フォーラム」を開催している。本フォーラムでは、各国の政府関係者や核不拡散・核セキュリティの専門家による、時々の今日的な課題に焦点を当てた講演やパネル討論を通じて、原子力平和利用と核不拡散・核セキュリティに係る種々の課題や方策について国内外の理解を深めるとともに、我が国及び原子力機構の核不拡散・核セキュリティへの取組を紹介している。

令和元年 12 月 4 日に開催された今年度の国際フォーラムでは、『「2020」とその先の世界を見据えた核セキュリティの課題と方向性』と題して、核セキュリティの現状と課題、今後の方向性、また、次世代原子力システムと核不拡散・核セキュリティ、将来に向けての人材の確保等について議論を行った。

以下のフォーラムの概要は、主催者である JAEA の責任においてまとめたものである。

2. フォーラム概要

(1) 日時:令和元年 12 月 4 日 10:00~17:30

(2) 場所:時事通信ホール

(3) 主催:JAEA

共催:日本国際問題研究所軍縮・科学技術センター、
東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻、
東京工業大学科学技術創生研究院先導原子力
研究所

(4) 講演者、座長、パネリスト

開会挨拶 (児玉 敏雄 JAEA 理事長)

海外:国際機関、政府関係者、専門家(国際原子力
機関(IAEA)、米国エネルギー省(DOE)等から参加)

国内:政府関係者、専門家

(5) 参加者数:約 140 名

(6) プログラム

【開会挨拶】 児玉 敏雄 JAEA 理事長

【基調講演】

1) 「核セキュリティの現状と課題、将来の方向性」

Eleanor Melamed 氏: DOE/国家核安全保障庁(NNSA) グローバルマテリアル
安全保障局 副局長補佐



2) 「INPRO 次世代炉システムの核不拡散・保障措置に関する分析」

Brian Boyer 氏:IAEA 原子力エネルギー局 原子力発電部 INPRO 課長

【基調報告】

「ISCN の活動報告」

直井 洋介 JAEA 核不拡散・核セキュリティ総合支援センター(ISCN) センター長

【パネル討論 1】

「核セキュリティの現状と課題・今後の方向性について」

野呂 尚子(座長):JAEA ISCN 能力構築国際支援室 技術副主幹

Roger Howsley 氏:WINS (世界核セキュリティ協会)代表 [ビデオ出演]

Charles Massey 氏:IAEA 原子力安全・セキュリティ局 核セキュリティオフィサー

Eleanor Melamed 氏:DOE/NNSA グローバルマテリアル安全保障局 副局長補佐

土屋 兼一 氏:警察庁 科学警察研究所 主任研究官

鳥居 建男 :JAEA 福島研究開発部門 廃炉国際共同研究センター

遠隔技術ディビジョン 副ディビジョン長

【パネル討論 2】

「次世代原子力システムと核不拡散・核セキュリティ、将来に向けての人材の確保」

清浦 隆 氏(座長):文部科学省 研究開発局 原子力課長

Brian Boyer 氏:IAEA 原子力エネルギー局原子力発電部 INPRO 課長

Mario Mendoza 氏:米国テキサス A&M 大学 大学院原子力専攻 アシスタント研究生

相楽 洋 氏 :東京工業大学 科学技術創成研究院 先端原子力研究所 准教授

川崎 信史 :JAEA 高速炉・新型炉研究開発部門 研究副主幹

【閉会挨拶】 青砥 紀身 JAEA 理事



フォーラム会場の様子

(7) 基調講演等の概要

【基調講演 1】「核セキュリティの現状と課題、将来の方向性」

Eleanor Melamed 氏:核セキュリティの現状、課題、今後の方向性を述べる。まず核セキュリティの重要性と必要性について触れ、次に防止、検知、対応の三つの側面と持続可能性についての現行の努力を示し、最後に今後の課題と機会を説明する。



Eleanor Melamed 氏

核セキュリティの重要性と必要性:核セキュリティは、IAEA の核セキュリティシリーズ 20 が言うように、核物質、放射性物質及び関連施設に関わる悪意ある行為の防止、検知、対応のシステムである。また、深層防護の原則も重要である。核物質及び放射性物質の平和的利用による便益は多大なものであり、その利用は医療、産業、研究、農業と多岐にわたる。核セキュリティは原子力安全と並び、そうした便益を得るに欠かせないものである。これらの物質は大学や病院、産業施設など盗取や妨害破壊行為に対して脆弱な場所に保管されることがあり、こうした場合のセキュリティは重要な論点であり今後の課題である。またこれらの物質の輸送中のセキュリティについても同様である。核セキュリティに対する脅威について、核物質または放射性物質それ自体及びそれらを兵器化するのに必要な技術を手に入れることにテロリストが関心を示していることは明白である。IAEA がまとめている不正取引データベース(ITDB)も示す通り、脅威は現実的なものであり、対応策が求められている。関連して、近年イラク・シリアのイスラム国(ISIS)が核兵器と同じく大量破壊兵器に数えられる化学兵器を使用したことも、核兵器の使用が現実的な脅威であることを示している。

現行の努力:米国では、国家核安全保障庁(NNSA)の下で Office of Defense Nuclear Nonproliferation が四つの目標の下で活動している。すなわち、使われていない核物質または放射性物質の削減及び最小化、核物質、放射性物質及び原子力施設の防護、核物質、技術、専門性の拡散の防止、及び核爆発等の拡散の検知である。さらにその下に Office of Global Material Security があり、三つの部門、すなわち International Nuclear Security、Radiological Security、及び Nuclear Smuggling Detection and Deterrence がある。International Nuclear Security は脆弱な核物質の防護を目的とし、IAEA や世界税関機構(WCO)、国際刑事警察機構(ICPO または INTERPOL)等との強い連携を持っている。Radiological Security は高リスクの放射性物質の防護・削減を目的とし、米国内での活動を主とする。核物質を兵器転用不可能な形態に転換する技術という点で日本は貢献している。Nuclear Smuggling Detection and Deterrence では規制外核物質への対応を担当し、法執行機関との協力を重きを置き、核鑑識で日本と協力してきている。両国間での原子力協力協定も締結 30 年を迎え、核セキュリティの三側面でも両国は協力を深化させてきた。防止については、JAEA の施設から高濃縮ウランを近年返還輸送したことが挙げられる。検知については、特に核鑑識の

分野で協力している。対応については、福島第一原子力発電所事故からの教訓の共有、2020年の東京オリンピック・パラリンピックのような大規模イベントへの備えについて協力を進めている。持続可能性の観点からは、まず、国際枠組みの強化が重要。核物質防護条約、核によるテロリズムの行為の防止に関する国際条約、放射線源の安全とセキュリティに関する行動規範といった国際枠組みにより多くの国が参加するよう働きかける必要がある。加えて、そうした規範を国内で実行できるよう各国が規制枠組みを整えることも重要である。国際枠組みの強化に加えて、人材育成支援も持続可能性に欠かせない側面である。米国はIAEAのInternational Network for Nuclear Security Training and Support Centresを経済的支援も含めサポートしてきた。そのメンバーであるISCNは人材育成支援のトレーニングを行うのに素晴らしい場であると認識している。核セキュリティ文化の強化も重要事項の一つである。さらに、こうしたトレーニングセンター内での人材確保も求められている。というのは、特に小国では往々にしてトレーニングに携わる人員を十分に確保することが難しく、インストラクターを過剰に働かせることになりかねないからである。

今後の課題と機会:我々は変化する技術によって再定義され続ける新たな課題に対処しなければならない。すなわち、輸送中の物質のセキュリティ、内部脅威者リスクの低減、サイバーセキュリティ及び新技術による脅威である。輸送中の物質のセキュリティについては、敵対者が攻撃の時間と場所を選べること等から特に注意が必要であり、IAEAもこれについての国際スタンダードを示す文書を発表している。先日、日本の外務省とISCNが共催した輸送セキュリティシンポジウムは成功裡に終わり、2020年2月のIAEA核セキュリティ国際会議(ICONS2020)でもその成果が報告される予定であり、より多くの国を啓発することが期待される。サイバーセキュリティについては、あらゆるものがデジタル化される今日、特に技術の発展による環境の変化が大きく、注意を要する。内部脅威者対策については、これまで知られている全ての盗取が内部脅威者によって、あるいは内部脅威者の助けを借りて図られており、IAEAはこれについても文書を発表している。新技術による脅威はドローンに代表される。ここでの問題は、これまでのセキュリティシステムが全て地上からの脅威を想定して作られていることであり、イノベーションによって伝統的な核物質防護システムでは対処できない脅威が現れることが考えられる。米国では複数の国立研究所がドローンの研究を行っており、また日本との協力も盛んである。今後の機会として、代替技術の利用が期待される。代表的なものは、医療や産業で使用される放射性物質をより低リスクのものに替えることである。これによって放射性物質利用のリスクを低減することができる。以上の通り、我々は課題と機会を持っているが、これらに対処するため、国際的な、またIAEAのような国際社会での協力を続ける必要がある。

【基調講演 2】「INPRO 次世代炉システムの核不拡散・保障措置に関する分析」

Brian Boyer 氏：私は JAEA と 20 年間つながりを持っている。当時から INPRO (革新的原子炉および燃料サイクル国際プロジェクト)に関わった仕事をしており、先進炉、先端炉に向けた保障措置について情報収集をしてきた。今日は、INPRO を中心に述べる。



Brian Boyer 氏

INPRO において重要なことは、革新的な技術を用いて、先進炉に関わるフロントエンドからバックエンドまでの保障措置を如何に達成するかを目指している点である。日本は 2006 年から参加し、INPRO は多くの寄与を受けている。INPRO の資金調達には特殊な形式をとっており、多くがサポート国からの特別拠出金で賄われている。IAEA の中で、新型炉の設計、安全、保障措置、セキュリティなどを全てカバーしている唯一のプロジェクトである。2001 年に 10 か国で開始され、現在は 42 か国と 1 機関が参加している。技術的なサポートが可能で、責任をもって原子力を運用している国が参加しており、日本は貢献の大きい国の一つである。国連の 17 の SDGs (持続可能な開発目標)のうち、原子力に関わるエネルギーやインフラ、気候変動などのテーマを INPRO の活動に盛り込んでおり、これまでとは異なる分野との連携や議論の機会を設けている。将来原子力がどの方向に向かうべきか、先進炉の設計や安全性、燃料サイクルおよび使用済燃料の処分方法などを今から考慮していくべきである。将来的には、ロシアが提案している船舶に搭載した原子炉の輸出がなされていくかもしれない。分野横断的な議論や持続可能性も重要である。次世代の原子力を持続可能な産業とするために、各国のインフラ整備計画を IAEA がサポートするサービスを整備した。インフラ、経済性、拡散抵抗性、環境、安全性、廃棄物処理の 6 つの観点から、将来にわたって持続可能な計画を作成することが重要である。特に、拡散抵抗性については、設備だけではなく、法的、体系的な裏付けを構築することが非常に重要で、IAEA および INPRO が主導していくべきと考える。

INPRO では、各国でスクールを開催しており、ロシアなどでも成功している。2020 年 11 月にはタイで開催予定のスクールに、日本の協力もお願いしたい。施設の設計段階から保障措置の実施し易さを予め組み込んだ コンセプト(safeguards by design: SBD)を取り入れる努力をしている。先進的な技術が必要で、例えばプルトニウムが他の超ウラン元素(TRU)と混合しているときに検知できる方法が必要である。さらに、装置開発だけでなく、検出下限値や不確かさの評価も必要である。INPRO のタスクは、大きく 4 つある。1 つ目はグローバルシナリオを構築し、各シナリオの評価を行うためのツール・サービスを整備することである。2 つ目は技術的イノベーションで、新しい原子炉や燃料サイクルに必要な技術を整備することである。例えば、近年登場した海上原子力発電所についての取り扱いがある。将来、より多くの国に広がる可能性がある。移動した先で燃料を取り出すことがあるのか。その場合の使用済核燃料の取り出しはできるのか。将来にわたって安全に運用していくために、そういったことを予め想定できる体制を作る。3 つ目は、持続可能性の評価と戦略で、拡散抵抗性の向上などを目的として活動

している。最近では、現行の燃料サイクルに韓国が試験していた DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU)、CANDU 炉を取り入れた場合における、廃棄物や TRU の減少に伴う拡散抵抗性を分析した。4 つ目は、対話およびアウトリーチで、近年特に促進している。2018 年には韓国で小型モジュール炉(SMR)に関する第 17 回 Dialogue Forum(DF)を開催した。2020 年にはウィーンでパートナーシップに関する第 18 回 DF の開催を予定している。毎年秋に開かれる運営会議において、現状と計画の確認を行う。参加国からは資金、ノウハウ、人材などの提供を受けている。

グローバルシナリオの想定として、気候変動へのアクションが高まっている中、原子炉を一定数運用していくことが、世界的に必要なと考えている。次世代の高速炉設計の評価も継続的に続けている。安全担当者、セキュリティ担当者、技術者が集まり、使用済燃料の処理方法や保障措置など、先進炉に関わる統合的な意見交流を行っている。前述の SMR に関する会合(2018 年、韓国)のほか、2020 年にはソチにある学校で INPRO の 20 周年イベントを開催する。拡散抵抗性/物理的防護(PRPP)について、内在的及び外在的な観点からの評価を行う。例えば、先進炉(熔融塩炉など)が良い内在的な拡散抵抗性を持つか否か、同時に、核物質の魅力度評価を行う上で、現在の技術でどの程度転用が可能か、様々な分析のための技術的なサポートを求めている。

SBD のワーキンググループを発足し、保障措置、原子力エネルギー、原子力安全の分野を統合した取り組みを始めている。IAEA だけでなく事業者の立場でも分野横断的に考えてもらいたい。3SBD(保障措置・核セキュリティ・原子力安全の 3 つを合わせて設計段階から採り入れたもの)のコンセプトでは、いくつかの点で重なる部分があり、協力して取り組んでいく必要性を示している。Physical Model(核物質等の入手経路分析を行うための技術プロセスのモデル)を構築し、燃料サイクルの流れや、保障措置がどの場面で重要になるのかを可視化することを目指している。その中で、どのようにサンプルを取得し、保障措置をかけるのか SBD の指針を示す。国ごとに技術レベルや提案内容が変わってくる。国レベルアプローチを成立させるために、いかに基準を整備するかが課題で、次世代炉の種類によっては燃料形式が異なったり、燃料の装荷方法が異なったりするので、これらに対応した技術開発、体制整備が必要である。INPRO は以上のような視点から、統合的なサポートの提供に努めている。

【基調報告】「ISCN の活動報告」

直井 洋介:初めに ISCN が目指す 3 つの姿として、原子力平和利用の円滑な推進役、国際社会から信頼される技術開発集団、能力構築支援に係る国際的な COE(Center of Excellence)を挙げた後、核不拡散・核セキュリティに係る技術開発、包括的核実験禁止条約(CTBT)国際検証体制への貢献、核不拡散政策研究、アジア諸国を中心とした人材育成支援、理解増進・国際貢献活動についての活動報告を行い、また、午後の 2 つのパネル討論における論点について背景説明を行った。



直井洋介

(8) パネル討論の概要

【パネル討論 1】

核セキュリティの現状と課題

野呂座長: まず、核セキュリティの課題について話を伺いたい。

Melamed 氏: 先の基調講演から、このパネルに関わりのある重要な点を指摘する。核セキュリティにおける活動や努力について紹介を行った、実際どのように持続・継続していくかが一つの課題である。たとえば、港や病院で一度システムが出来上がったときに、いかに研究者に

長期的な関心を持たせるか、人材育成をいかに長期に継続させるかである。核物質の輸送は、特に重要な課題で、他に不正な核物質の出どころとなるインサイダー脅威、最近の技術的な発展を受けたサイバーセキュリティが課題となってきた。放射線源の盗取防止に向けた代替物質の開発も課題として取り上げた。さらに加えると、こうした活動を絶やさないようにするため、トップレベルの関心を引き、関与させることが重要である。また、核セキュリティはどの国も合意できる分野なので、国際的な問題として扱い、他国と話し合いができるように、様々な機会の活用 (IAEA、ICPO 等) が大事である。

野呂座長: 次は、核セキュリティのこうした課題に対応する難しさについて、ビデオメッセージで講演いただく。

Howsley 氏: 核セキュリティにかかるコストは、9.11 同時多発テロから増え続けており、今、コストを把握して、組織立ててまた系統立てて考え直すときが来ている。まず、原子力の 70 年の歴史を振り返ると、テロはほとんど起きておらず、すでに実施可能であるにもかかわらずダーティボムは使われていない。テロリストは、まだ原子力をターゲットにしているのか。原子力以外の、例えば、空港における演習では、武器の機内への持ち込みが 70 回のうち 67 回成功したことが報告されている。厳重な警備にもかかわらずダイヤモンドの盗難は防がれていない。最初の課題に戻ると、セキュリティへの正当なコストを考えるには、費用が十分に効率的かつ有効に使われていることをデータから検証し、対策の実効性を評価し、その上で取捨選択する必要がある。模擬攻撃による演習は、実効性を確認する有効な手段で、防御力が弱い箇所には投資が必要である。現在そうした視点で調査を進めており、来年には報告書を発行する予定である。無料のメンバー登録で回覧が可能である。



パネル討論 1 の様子



Howsley 氏ビデオメッセージの様子

野呂座長:これまでの点で、何かご意見があれば伺いたい。

鳥居:Melamed氏も指摘しているが、人材の育成が重要になると考える。事故があったときの影響は、福島での事故でわかるように計り知れない。そうしたものに対応するために、人材が足りているのか、どのような体制をするべきなのか、国レベルで検討する必要がある。

野呂座長:次に、資源が限られる中で、核セキュリティでどのような体制を築いていくべきか、また、核セキュリティサミット後、どのように地域・国際協力を進めるべきか伺いたい。

Melamed氏:核セキュリティサミットが終了して、そうした役割を国際的な枠組みで引き継いでいくことが必要。IAEA、INTERPOL、核テロリズムに対抗するためのグローバルイニシアティブ(GICNT)などがそのような組織となるべきで、ICONSの様な会議で議論を進めていくべきと考える。

Massey氏:進化していく脅威に追いつき、未来志向で、かつ無理なく持続できるシステムにする必要がある。しかし、核テロの脅威に対し、セキュリティ投資の評価は難しいところであり、必要性に関して認知度を高める必要がある。技術開発の課題については、技術会合などで国際的に認識を共有し、連携していく必要がある。たとえばIAEAでは、コーディネータープログラム(CRP)という形で、連携を進めている。

土屋氏:この会議での私の発言は個人的見解であるということをお断りする。最近では、インターネットの動画を見て爆発物が作れるように、脅威の評価基準も刻々と変化している。ドローンの進化や、福島第一原子力発電所の事故以降、外部電源が注目されるなど、脅威の種類が変わってきている。科警研は、議論の場として、国際会議や国内での交流・演習を活用している。日本については、もう少しそのような機会を増やすべき。

野呂座長:技術革新が進む中、核セキュリティ技術開発にどういったものが必要か伺いたい。

Massey氏:核セキュリティに関しては、各国が個別に意思決定を行うこととなっており、IAEAはガイダンスやその支援を行う。技術に話を限ると、核セキュリティ計画を3年計画で立てて変わっていく核脅威の見直しを行っている。ニーズについては技術会合などで情報収集し議論を行う。活動では、Integrated Nuclear Security Support Plan (INSSP)やCRPの立ち上げなどを行っている。ドローンやネットワークなどの新しい技術は、テロに使われる可能性があるが、警備などに有効に使えるかもしれない。バーチャルリアリティは、防護のシミュレーションに使える。世の中に出回っている検出器に皆が求める万能なものはないので、性能などに関してはバランスを考え製造会社と協力して開発する必要がある。ネットワークで検出装置を有機的につなげるシステムは現在開発中で、来年の夏には提供できると思う。AIも一つの開発課題となっている。核セキュリティだけではなく、麻薬検知など世界税関機構(WCO)や世界貿易機関(WTO)などが広く適用できる技術は、大きな役割を果たす。

土屋氏:核・放射線テロへの対策には、次のような3つの段階があると考え。まず第1段階は、テロを起こさないようにする、リスクマネジメントや水際対策で、モニタリングやセキュリティチェックを行う。次の第2段階では、テロ後の初動対応における事故管理で、ゾーニングにより安全を担保しつつ証拠物件の採取を行う。そして第3段階で、

鑑識作業に入る。初動対応においては、核鑑識のような高い精度は必要なく、誰でも使えてすぐ結果が得られる、堅牢性の高い検出装置の開発が必要である。核テロとしては、核・放射性物質をまき散らすダーティボムの他に、強い放射性物質を公共の場に置いて多くの人を被ばくさせるサイレントフォースアタックもあり、こちらへの対応も進められている。例えば、実際に盗まれたことのある放射性物質があるとすると、IAEA のガイドラインから 1 時間あたり 100 ミリシーベルトの領域を仮定する。そうすると 10～100m が立入制限領域となり、さらに爆発シミュレーションから、さらに広い領域に拡散することが推定される。高線量領域も中性子放出核種とガンマ線放出核種の違いにより、その広がりも異なる。そのため、初動においては、広い領域で汚染領域を調べる技術が求められている。

鳥居: 広域放射線モニタリング技術開発は、JCO 事故の時の人海戦術による拡散調査、北海道の有珠山噴火のときの無人ヘリによる土石流調査を結びつけたところから始まった。その後、細々と研究を続けて、防災訓練で使う計画などを進めてきたが、9.11 以降、テロリストを利する技術と批判された。その後、福島第一原子力発電所事故では、放射能分布測定の実用性から、研究を再開することになった。この事故当時、米国 DOE とヘリを使って行い、並行して無人ヘリ測定技術開発を進めてきた。さらに、建屋内外での汚染状況を調べる必要があり、広く使われ始めたマルチロータードローンに取付け可能な省電力、かつリアルタイムで視覚化できる小型のコンプトンカメラの開発を行った。これに、スラムやフォトグラメトリという合成技術も取り入れることによって、低い高度で飛行し、比較的広い範囲で 3 次元放射線分布を短時間で測定することを可能にした。核セキュリティにおいては、いろいろな核種が使われる可能性があるため、さらに、高分解能で位置の特定精度が高く、かつ小型軽量化であるような装置開発が必要である。

Melamed 氏: 新しい技術により、いろいろな仕事をより簡単に進めることができるようになる。グローバルマテリアル安全保障局は、IAEA の CRP での TRACE アプリ開発をサポートしてきた。このアプリは、検出した放射能と化学物質の同定に使うことができる。また、今後、ビッグデータを使った分析やそれを用いた仕事のレベルを上げる可能性がある。こうした技術は脅威に対する有益な技術としても期待できる。例えば、メンテナンスレポートを分析することで、有用な情報を抽出できる。

野呂座長: 技術開発においてニーズとシーズのマッチングをどうやってマッチすれば良いか考えていきたい。すでにパネリストのプレゼンにも示されていたが、警察組織での現場での経験など話を伺いたい。

土屋氏: ニーズの吸い上げの場としては訓練がある。その中で、擬似放射性物質を使った訓練希望があったので、ウソトープというものを大学と協力して開発した。これは、携帯電話と電波発信装置を組み合わせたもので、電波発信源を放射性物質とみなし、携帯が受ける電波強度から放射線モニターのレベルを計算し、アプリで表示するものである。実際、大阪でこれを使った訓練を行った。放射性物質の探索や持ち込み検査、GPS と組み合わせてマッピングするなど、リアリティのある模擬訓練ができるようになった。自治体や原子力施設においても訓練に活用できるのではないかと。以上のように、実際にニーズを吸い上げ、技術開発につなげ、新しい技術を提供し、利便性を評価することを行っている。

野呂座長:IAEAにおいてCRPでは、どのようにニーズを吸い上げているのか。

Massey氏:常に現場のユーザーが何に困っているのかニーズの聞き取りをして、問題を検討した上で、CRPにしている。先ほど紹介したTRACEアプリでは、放射性物質が見つかった場合、評価物質が何のためにあるのかを情報検索することができるが、これもニーズの吸い上げにより立ち上がったプロジェクトの成果である。

野呂座長:広域モニタリングシステムは、比較的ユーザーと技術開発が近いと思うが、ユーザーのニーズとこの研究開発マッチングはどのように行っているのか。

鳥居:当時は、放射性物質の飛散を調査するために研究開発が始まった。その過程で小型化してきており、地元や自治体と話している。将来的には市販化のため、誰でも使えるソフトの開発を進めている。東京電力は、高線量場で人が立ち入ることができない場所における測定を求めており、ロボットのような遠隔操作によるシステム開発が必要となっている。このようにニーズを確認しながら研究開発を進めている。

野呂座長:最後に、サステナビリティについて議論したい。特に、セキュリティ対策の関係者について、施設、救急、地方自治体、治安関係、国境管理、核・放射性物質取扱業者など、どのように意識啓発をし、継続し、人材育成するのか考えてみたい。

Melamed氏:ここでは、グローバルマテリアル安全保障局が行っている、病院などで使われる放射能利用を代替装置に置き換える動機付けプログラムを紹介する。このプロジェクトでは、米国の国内向けのプログラムで、まずイベントなどで関心を持たせ、全ての機関が参加しないと安全が守れないことを理解させる。また、業界と連携してセキュリティ・バイ・デザイン(SBD)を広める努力をしている。事象が起きたときの対処に関して、地元警察、医療機関、研究所などに演習に参加してもらっており、これは好評である。より広いコミュニティで啓蒙啓発し、持続的な安全対策を日常に組み込んでいくことが大事である。

Massey氏:核セキュリティの方が比較的予算があるため、同じような装備が必要な場合、安全側を呼び込んで連携できる。例えば、輸送モニタリングで、放射能が申告より高い時、それが搬送数の間違いなのか、それとも汚染なのか確認する必要があり、両者に関わってくる。レアアースビジネスにおいては、鉍物輸送における放射能アラームへの対応が輸送効率に関わるため、安全とセキュリティで産業界とシンポジウムを開くなどの活動を進めている。

土屋氏:警察は、人の異動が早いいため、放射線防護に関する教育・実習を継続的に行う必要がある。訓練も、ケーススタディを入れて、事象への対処を全職員で行うなど、マンネリ化しないことが重要である。

鳥居:広域モニターの研究開発では、テロリストを利する技術と認識され、技術開発が進まなかったが、3.11震災後に風向きが変わった。この経験から、研究は細々でも継続することが必要であると考え。また、分野外での反響もあるので、プレス発表など、広く技術を公開していくことが大事だと考える。

フロアとの質疑応答:

[Q] 技術は諸刃の剣だが、オープンにしていくことに賛成する。米国ではドローンを使った測定が行われていると聞く。実際、日本でのオリンピック・パラリンピックで使うかどうか教えていただきたい。

[A]鳥居: 広域モニタリングシステムは、市販化していきたい。その一方で、テロリストがどのような核物質を使うかわからないので、高分解能の装置を開発する必要がある。装置の高度化を行い、いろいろな場所で挑戦して、汎用化する。縦と横の開発を同時に進める必要がある。

[A]土屋氏: ドローンは、操縦者が目視しないと操縦できない。分解能もエネルギーだけでなく、車両や人が判断できる程度の位置分解能があると有効である。

座長総括: 本日は様々な核セキュリティの課題について議論した。その中で、インサイダー、サイバー、ドローンなどの課題が取り上げられた。Howsley 氏からは、費用対効果の評価の必要性について問題提起があった。技術的なアプローチでは、広域モニタリングのようにテロ対策にも活用可能な技術開発が紹介された。このような活動を継続していくためには、IAEA や INTERPOL のような国際機関、グローバルパートナーシップや GICNT といった組織を活用する必要があるとの意見をいただいた。さらに、訓練の場を使った人材育成・技術開発の可能性が紹介された。今後も皆様と一緒に核セキュリティの強化を議論していきたい。

【パネル討論 2】

「次世代原子力システムと核不拡散・核セキュリティ、将来に向けての人材の確保」

国際的に活発な議論が行われている新型炉、小型モジュール炉を含む新しい原子力システムについて、核不拡散・核セキュリティに関する制度的、技術的課題の議論を行った。また、核不拡散・核セキュリティ体制の持続可能性(sustainability)を確保する上で重要な人材の確保、若手研究員の育成について議論を行った。



パネル討論 2 の様子

論点 1:

次世代原子力システムの現状と課題、核不拡散・核セキュリティに関連する取組・課題

清浦座長:本件は大変広範で、午前中の基調講演やパネル討論 1 の話題とも関連するが、特に原子力イノベーションと保障措置・核セキュリティの観点から議論する。本パネルは 2 つから構成されており、最初は原子力イノベーションとして国際的に注目されている次世代原子力システムと核不拡散・核セキュリティの検討状況及び課題を議論し、続いて同イノベーションを視野に入れつつ、核セキュリティ・保障措置に係る人材確保・育成について議論する。最初に特に第 4 世代原子炉(GEN IV)の取組、JAEA の取組等について川崎氏に説明をお願いしたい。

川崎:第 4 世代原子力システムに関する国際フォーラム(GIF)は INPRO 同様に 20 年の歴史がある。日本は GIF プログラムに参加しており、関係省庁の下、JAEA が参加している。GEN IV は、政府間協力として次世代原子炉に着目して作られた協力プログラムである。100 程のコンセプトから 6 つのコンセプトを選び、その 6 つは、20 年前の段階で、ナトリウム高速炉、鉛高速炉、ガス高速炉、超高温ガス炉、超臨界圧炉、熔融塩炉。各々異なる開発状態の中、開発プログラムを持っている国同士がワークシェアして推進している枠組みである。GIF は開発プログラムを持っている 12 カ国が参加して、各々が興味のある炉に参加している。GIF の目標は sustainability で、燃料サイクルを閉じること、安全性、経済性、及び核拡散抵抗性(PR)・核物質防護(PP)を目標としており、非常にハイレベルなところに PRPP が入っていることが 1 つの特徴と考えており、これは設計段階から PRPP を取り込むということである。

清浦座長:次にテキサス A&M 大学(TAMU)で SMR の保障措置ワークショップ(WS)が開催されたと同っており、その状況等も含め、Mendoza 氏から説明をお願いしたい。

Mendoza 氏:核物質管理学会(INMM)の学生支部主催により、2019 年 4 月に SMR の保障措置 WS を 2 日間、最終日の 3 日目は原子炉視察をそれぞれ実施した。本日は

その一部を紹介する。米国 DOE/NNSA、アイダホ国立研究所(INL)等、また海外からは JAEA/ISCN、ブラジル・アルゼンチン核物質計量管理機関から7名のスピーカーに参加いただくとともに、異なる分野の専門家に参加頂いた。参加者の半分は学生、その他国立研究所(国研)、規制当局、ベンダーからであった。次世代炉の保障措置のニーズ、課題等について WS の中で議論し、トピックスは、先進炉技術、エンジニアリングシステム的设计手法、熔融塩炉の保障措置分析演習、保障措置技術開発、保障措置コンセプト、アプローチ及び政策であった。

清浦座長: 文部科学省(MEXT)は原子力の研究開発(R&D)を担当しており、原子力イノベーションから見たときの我が国の最近の取組を紹介する。世界経済フォーラムでは、毎年、新興技術のトップ 10 を出し、2019 年は、より安全な原子炉(Safer Nuclear Reactors)が入っており、原子力イノベーションが国際的に最近非常に注目されていることを示す例である。我が国のエネルギー政策は、エネルギー基本計画として方針を決めながら取り組み、昨年策定の同計画の中で原子力分野もイノベーションが大事と記載されたことは着目すべきポイント。同計画の中で、MEXT は特に基礎基盤を支える役割を担い、経済産業省(METI)とのダブルクレジットでの作成資料は安全性向上を中心とし、これを満たしながら核不拡散等を満たす R&D を目指すものとなっている。また、ステークスホルダーへの対応の重要性が記載され、イノベーションを進める上で非常に意識されている点は、民間の創意工夫の活用であり、国が支える仕組み作りを議論している。また、規制との対話も早いタイミングにする重要性を記載。Nuclear Energy × Innovation Promotion(NEXIP)では、原子力イノベーションに向けた取組を MEXT と METI が連携して実施し、新事業を検討中。社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業は新事業として今年度から始まり、様々な革新炉開発に向けた民間事業を支えるもので、来年度から新しい枠組みで進めようと思っている。一方、ブレイクスルーを生み出すような創造的アイデアの支援の仕組みや応用研究におけるボトルネックな課題解決支援も考えている。加えて、この一連の原子力イノベーションを支えていく重要な役割の 1 つとして、自ら開発するという役割であった JAEA が基盤を支える役割のハブ機能を担って強化する政策もある。特に原子力研究開発基盤を応用に繋げる仕組みと、先ほどの Mendoza 氏の話に出た原子力以外の分野からも人や知識を呼び込む基盤作りが必要であり、そこを強化するということ。

清浦座長: 次は午前中の基調講演でも紹介があった新しい原子力に対する IAEA の取組の核不拡散、保障措置に関する課題解決に向けた活動等について Boyer 氏から紹介いただきたい。

Boyer 氏: 新たな原子炉に対する査察技術が非常に重要である。先般の PRPP 会合にて参加者が SMR を輸送に使う旨発言した。海上原子力発電があったとしても日本の原子力船むつ等は NPT がなかった時代で、原子力船の場合の保障措置協定はどうなるのかのような法的問題等がある。IAEA として SBD の大事なポイントはパートナーシップであり、Mendoza 氏が先ほど指摘した米国でのパートナーシップとして産学官が参加し、この分野に関心を持っていることに注目したい。このような加盟国を超えたパートナーシップを拡大し、新しい原子炉の SBD を実施して欲しく、採算等、実施する意味がある形にしていきたい。技術開発部門が SMR の WS を開催し、INPRO とも関わりを持っている理由は、このような技術をいずれ評価しなくてはならない可能性が

あるためである。気候変動の絡みで原子力システムと再生可能エネルギー(再エネ)との関連において、再エネ、ガスタービン、SMR を系統に接続した場合のバランス具合、自然エネルギーで不可避な変動をガスタービンと原子炉で補完する方法、SMR の負荷追従の能力など 20 年前の INPRO 発足時、このような質問は考えなかった。フレキシブルでこれまでにない革新的なことを考える必要がでてきた。

清浦座長:次に相樂氏から東京工業大学(TIT)の取組を紹介いただいた上で全体の議論をしたい。

相樂氏:現在、SMR が脚光を浴びているポイントは社会的受容と技術の相互関係。新型原子炉に関する保障措置・核セキュリティ上の課題について、2018 年に参加した IAEA 保障措置シンポジウムで多くの話題があったので紹介する。特に SMR、新型原子炉の保障措置の課題について多くの発表があった。既に報告書が出ており、結論も出ているが、SMR、新型原子炉は、新たな市場を形成し得る将来技術であると位置づけられるも、保障措置の課題、例えば、燃料交換を行わないタイプの可搬型原子炉はパッケージとして工場生産し現地へ持っていく場合に従来法の検認、計量管理が使えないであろうことが課題と言われおり、新型原子力施設への斬新で効果的な保障措置アプローチとして、SBD(safeguards by design)、すなわち設計段階から適用すべき保障措置を検討して設計することが重要と纏められている。また、新しい保障措置アプローチが必要になるため、大学が参加し得るフィールドであると纏められている。INL が事故耐性燃料として実用化開発しているシリサイド燃料は、プルトニウム(Pu)の分離工程において UO_2 に比べ分離し難い性質がある故、事故時の不正転用等を目指す敵対者に対し困難性を高められ、安全のみならずセキュリティ、不拡散からもこのような新型燃料により軽水炉の安全性、セキュリティ性、不拡散性の向上が得られる可能性があり研究を進めている。更に、IAEA の査察労力低減のための非立会検認技術開発としての放射断層撮影法等の高度化 R&D、また、制動放射線を使用した不明物中の核物質検知の R&D も行っている。

清浦座長:様々な立場から新しい次世代原子力システムとそれに伴う保障措置に関する様々な取り組みの紹介があった。Boyer 氏の説明では 20 年前は考えられなかったということであったが、GIF、INPRO の炉開発者と、保障措置や本日のパネル 1 のセキュリティ関係者との対話を実施すべき状況になっていると思う。Boyer 氏に伺いたいのは IAEA の中も様々な担当部局に分かれているが、全体としての進め方について最近 IAEA 内部でどのような議論を実施しているか紹介いただきたい。Mendoza 氏には、先ほど説明にあった WS の実施の経緯を紹介していただきたい。

Boyer 氏:先進炉等は検知、検認技術が極めて重要と考える。相樂氏の熔融塩炉のトリウムサイクルの話にもあったが、U-233 とトリウムの検認技術の有無、燃料サイクルから生まれる Pu や U との混合状態における検認の可否、また、再処理のようにバルク施設になり複雑化するため、廃棄物を含め出入りがバルクであるので計量管理が難しく、設計でもっと留意が必要である。来年のダイアログ・フォーラムはパートナーシップがトピックであり、どのように民間とパートナーシップを組むかが課題である。IAEA が評価するとしてもある特定のモデルを推進或いは特定の国、会社を推薦しているように見られてはいけないため、留意が必要。

Mendoza 氏:WS を行った経緯を説明する。TAMU には、相樂先生の TIT と協力して

いる核セキュリティ科学政策研究所があり、保障措置、セキュリティ、安全を研究している。INMM、TAMU の核セキュリティ科学・政策センター(NSSPI)により、TAMU の同研究所がエンジニアリング・フォーカスされており、学生に不拡散、セキュリティ、安全を経験させることが目標である。自分が前年度会長であった時に WS を考えた。米国や世界各地で GIF、SMR 等が話題になっているため、特に新しい原子炉のための新たな保障措置を作ることが急がれているので、今回の WS には完璧なトピックであると考えた。

清浦座長:これまでの議論の中で、SBD との言葉が何度も登場してきており、パネル 1 のトピックスでは security by design という議論もあった。また Boyer 氏のコメントの中で、負荷追従を満足するシステムの在り方のような新しい視点の紹介もあった。設計段階から様々な要素を組み入れながらの R&D が非常に重要であることが共通していると思う。例えば、政府は R&D に対して投資する立場故、早い段階から様々なニーズの組み入れを様々な政策ツールを使用して促していくことは政府の役割として今後考えていく必要があるのではないか。これまでの GIF、INPRO でもそのような取組はあったが、今後このような取組をより促進する上で、どのような取組をした方が良いか、それぞれの立場からコメントがあればありがたい。

相樂氏:非常に重要な視点と考えており、また、safety by design、security by design 及び safeguards by design について、研究の中でこれを一体的に取り扱えるよう考えながら進めている。SMR の研究を進めているが、規制側も非常に関わるところであり、IAEA を通じてカナダの規制当局で関心のある方々とセキュリティ規制、保障措置規制等について従来炉との違いの検討を進めている。このような規制とのコミュニケーションがあると R&D を進める側として目標が見え易くなり、やり易くなると思う。日本でも、規制当局との R&D に関しての議論が出来る場があるとやり易くなるのではないかと考えている。

川崎:イノベーションの加速方法の観点にて、GIF の中で立場が違う人(例えば、原子力協力の国際枠組み:IFNEC)と話す機会があり、イノベーションは技術的なものに限らず、先ほど話に出た規制との対話として、米国は新型炉の設計に関する講座を DOE が設け、原子力規制委員会に説明し、交流を図り、より合理的な規制、安全設計基準を作る等の方法論も含めてイノベーションとしている。他の産業から学ぶことは技術のみならず方法や仕組みも含むと思う。国際協力で様々な国が参集し、IAEA も GIF 公式オブザーバーとして参加し、各々の得意分野、例えばフランスは再エネとの調和に取り組んでおりその分野はフランスがリードし、IAEA は安全設計基準等の得意分野がある。GIF と IAEA は年 1 回会合を開き、協力分野等を協議している。立場の違いの人が集まると、自分の得意分野を持ってくるため、そのような機会を多く作ることがイノベーションを加速させると思う。

清浦座長:Boyer 氏は今のトピックスにコメントがあるか伺いたい。

Boyer 氏:保障措置部門にいたときに、やり取りする国等は SBD(safeguards by design) について、どのようにすれば承認を得られかを知りたいが、IAEA はお墨付きを与えない。国レベルアプローチで縛りがかかっているため、安全性のような基準がない。ベンダーを支援し、設計段階でのバックフィットの必要性緩和、異なる技術の必要性低減等、負担軽減するようベンダーを支援したいと考えている。

論点 2:

核不拡散・核セキュリティに従事する若手研究者の育成の取組とその良好事例、若手研究者育成に対する大学・学会の役割、COE(拠点研究機関)、産業界と大学との連携のあり方

清浦座長:ここでの人材育成は先ほどの新しい時代の原子力の動きも踏まえた上で保障措置や核セキュリティに係る人材をどう確保、育成すべきかという観点を中心に幅広く紹介いただければと思う。まず、相樂氏から大学の取組を紹介いただきたい。

相樂氏:現在行っている 3S 教育について、安全は随分前より講義等に取り込んでいるが、セキュリティや保障措置は、2011 年頃から MEXT のリーディング大学院の中で教育がスタートし、2017 年から原子力規制委員会の補助金事業として体系化を行った。これは 2017 年から新しい講義、実習科目、インターンシップでスタートし、これらを体系的に学んだ者が 3S を体系化したビジョンを持ちながら研究や就職先での個人の視野拡大に繋げる目的で、講座等を単位化し、認定書も発行するまでのプログラムを構築。昨年度は 155 名程の履修者で、今年度も同程度であり、毎年多くの参加がある。このような形で TIT では人材育成と、保障措置・セキュリティ教育を一体的に行っている。

清浦座長:次に Mendoza 氏から TAMU の取組について紹介いただきたい。

Mendoza 氏:新世代の研究者の育成のために学生支部として行う責務があり、それは大学教員と産業界との共同講師、産業界と共に学生のためのイベント主催を通じ、学生に様々な経験をさせること。学部では、保障措置・セキュリティの授業はなく、自分が教授にお願いしなければ、産業界との経験はなかった。また、NNSA や国研の専門家に話をしてもらい、将来何をするのかを考える参考になる。さらに学科間の親睦醸成目的で料理コンテストを実施。イベントで学生同士、教職員と学生のコミュニケーションを促し、橋渡しの役割を果たす。

清浦座長:Boyer 氏に IAEA の取組について紹介いただきたい。

Boyer 氏:大学とのアウトリーチ、特にロシアの大学との連携があり、我が課にもロシア人、ロシア語を喋るスタッフが多いので特にアウトリーチをしており、INPRO スクールにて、我々の方法論・ツールの使用方法を教えている。これをヨーロッパ、アジア等に普及させたいと考えている。保障措置で何が起きているか等を若い専門家や大学生が学ぶことが出来る。また、INPRO 方法論を次世代にも広げて原子力エネルギーシステムの評価に使われるようにと考えており、これが将来に向けた目標である。加盟国がスポンサーしてインターンを受入れることも継続したいと思っている。

清浦座長:基調講演を頂戴した DOE の Melamed 氏にも取組を紹介いただきたい。

Melamed 氏:次世代の人材育成は大事。統計上の数値では NNSA 本部職員の 1/4 が 5 年間で定年の年齢を迎える。人材育成プログラムの例では、大学連携プログラムとして卒業前に有望な学生がいれば研究者と共同研究する。また、大学コンソーシアムがあり国研と共に専門家を教育。さらに学生と研究所間で研究プロジェクトを行い、複数の大学とのプロジェクトがある。本部での 1 つのプログラムは、安全保障分野で優秀な若者が本部を目指すよう、インターンプログラムがあり、NNSA が面談を行い、国研の従業員として 1 年来てもらおう。その年の最後に上手くいけば本採用ができる。

清浦座長: 人材問題は日本でも重要課題で、保障措置等に限らず原子力全体で若者の参入方法を非常に意識している。今、皆様の発表に様々なヒントがあったと思う。日本も、単独大学ですべてを賄うのは難しい時代。先ほどコンソーシアムとの言葉もあり、若手に良い経験の場を与える環境整備の観点で、複数大学の連携や研究機関が協力し、民間の原子力関係への経験を一緒に出来るような仕組み作りを考える必要がある。大学関係者 2 人に若者を惹きつける方法を伺いたい。

Mendoza 氏: Melamed 氏の言うとおりの、奨学金、フェローシップ等が良い。極力早く、国研、規制当局等との接触を経験させることが重要。省庁や国研等の現場で現状を経験することができ、プロジェクトへの参加も可能故、インターンシップがベターと考える。また、うまくいけば採用の可能性もある。

相楽氏: TIT はまだ状況が良いが、原子力工学科全体は非常に苦しんでいると思う。TIT では、廃止措置の社会的ニーズ、就職先の具体性から特に福島を地元とする入学者が多く、キャリアビジョンの明確化が重要。核物質管理も研究施設の学生にインターンシップ等の機会での現場での業務内容に接触させ核不拡散という仕事の存在を知ってもらい、就職のキャリアパスもあることを見せることで入学に繋がる間口を広げ、様々な機会があることを見せることに努めている。

フロアとの質疑応答:

[Q] R&D、法政策とも関連して、軍縮・不拡散教育の中に、そうした新しい要素を少し入れておくということが、良いのではないかと思うが、如何か。

[A] **清浦座長:** 原子力の分野に限らず一般論として科学技術を支える研究者等が人文社会の素養も身に着けることが大事と言うことは全体の流れ。原子力分野では、ご指摘の原子力に関する歴史、外交も含めて理解している人材が望ましいと個人的に思っており、各大学の中で連携して原子力に興味がある学生が深い見識を持てるようにしていきたいと考えている。

[Q] 本日はあまり話題に出なかったが、SMR の開発と合わせて HALEU (High-Assay Low Enriched Uranium: 濃縮度 5~20% の低濃縮ウラン) 燃料の開発は、セキュリティの観点でどのように捉えているか。

[A] **Boyer 氏:** 小型炉のセキュリティの予算についてはビデオで出ていた Roger Howsley 氏の話がある。セキュリティの予算は SMR については少ないであろう。物質のフットプリントも大きくはない。パトロールについて人、物、金はそれほどかからない。問題はコストが上がる可能性があり、セキュリティが同じ予算であれば、SMR の設計で何とか工夫を試みると言われている。

座長総括: 非常に広範な議論であったが、全般を通じて、新しいイノベーションに向けた取組について、早いタイミングで、核不拡散、保障措置、核セキュリティの分野とも対話しながら進めていくこと、また、様々な分野を超えた或いは産学官の壁を越えて、人と対話を通じながら進めていくことの重要性が大変多く話題に出たと思う。

3. おわりに

本国際フォーラムは、核不拡散・核セキュリティに関わる国内外の有識者が参加して、公開の場で議論することにより、広く一般の方も本分野での理解を深める機会となることを意図している。今回フォーラムで焦点を充てた核セキュリティの現状と課題、今後の方向性、及び次世代原子力システムの核不拡散・核セキュリティ、将来に向けての人材の確保に関わる議論を通じて、それらの諸課題を共有し、課題解決に向けての取組み、日本の貢献や国際協力のあり方に対する理解を深める一助となれば幸いである。今後も、こうした議論を展開する場として、本フォーラムをさらに充実させていきたいと考えている。なお、本フォーラムの資料は、JAEA の Web に公開の予定である。



講演者・パネリストの集合写真

4-2 EC/JRC イスプラにおける遅発ガンマ線分光試験

ISCN 技術開発推進室では、文部科学省核セキュリティ強化等推進事業として、EC/JRC(European Commission / Joint Research Centre)と共同で、アクティブ中性子非破壊測定技術開発を進めている。その一つである遅発ガンマ線分析技術開発では、再処理工場における核分裂生成物やマイナーアクチノイドを含んだ高線量核物質(HRNM)中の $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$ 比を非破壊で測定することを目的として、JRC イスプラ(イタリア)にある PUNITA(Pulsed Neutron Interrogation Test Assembly)および PERLA(PERformance Laboratory)実験施設にて、実用化に向けた基礎試験を進めている。遅発ガンマ線分光では、核物質試料に中性子を照射し、誘発核分裂によって生じる核分裂生成物(FP)が放射性崩壊する際に放出する遅発ガンマ線を測定する。 ^{235}U 、 ^{239}Pu および ^{241}Pu の核分裂では、FP の収率がそれぞれ異なるため、測定される

ガンマ線スペクトル上のいくつかのピークを比較することにより、試料中の $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$ 比を測定することができる。HRNMに含まれる ^{137}Cs をはじめとした長半減期FPによる干渉を避けるため、数秒から数分の短半減期のFPが放出する高エネルギー(3MeV以上)のガンマ線に注目して測定する。実際には、短半減期FPからの遅発ガンマ線測定の統計精度を高めるため、中性子の照射とガンマ線測定を繰り返し行う。今回は、2019年10月30日～11月15日の約2週間にPUNITAで実験を行った。後半の11月10日～11月15日には、PERLAにおいても並行して実験を行った。

PUNITAは、黒鉛とポリエチレンブロックで構成された2m程度の立方体で、内部の空洞に設置されたDT中性子発生管により、中性子を照射する。これまでに、ウラン酸化物標準試料(CBNM)とプルトニウム・ガリウム合金試料を用いて ^{235}U と ^{239}Pu を測定し、スペクトルに違いが見られることを確認した。シミュレーション計算の結果からは、中性子照射時間とガンマ線測定時間を変えることにより、スペクトルに違いが生じることが分かっている。 $^{235}\text{U}/^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$ 比の測定のためには、各FPのガンマ線ピークの比が最も顕著に見られるように中性子照射時間とガンマ線測定時間のパターンを選択する必要がある。JRCの協力により、これまで手動で行っていた中性子照射のON/OFFが自動化され、中性子照射時間のパターンを容易に変更できるようになった。そこで、今回の実験では、中性子照射時間とガンマ線測定時間のパターンを変化させ、以下の表の5つのパターンについて測定を行った。両者の合計時間がおよそ1時間になるまで照射と測定を繰り返した。

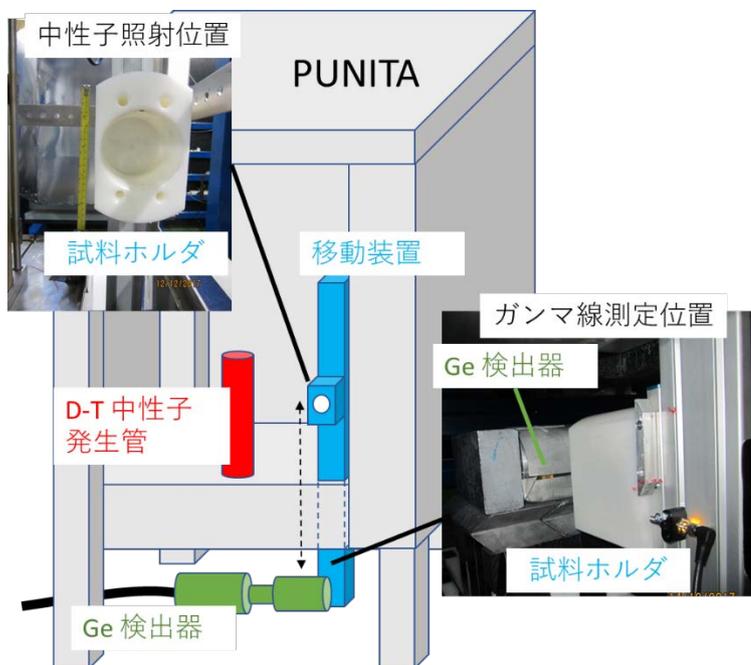


図1 PUNITA 装置概要

表 中性子照射時間とガンマ線測定時間のパターン

パターン	中性子照射時間 (秒)	ガンマ線測定時間 (秒)	繰り返し回数
1	10	10	158
2	300	60	10
3	300	300	6
4	60	300	10
5	60	60	29

シミュレーション計算での予測の通り、照射と測定のパターンの違いによるスペクトルの変化を観測することができた。例えば、パターン1、3、5は合計測定時間がそれぞれ1580秒、1800秒、1740秒と大きな差がないが、中性子照射後すぐに繰り返し測定しているパターン1では、 ^{91}Rb などの数十秒の半減期を持つFPがより顕著に現れ、特に半減期の短い ^{97}Y のピークはパターン1でのみ確認できた。一方で、パターン1では、測定中の不感時間の変化が顕著であり、測定精度の向上のためには不感時間の補正が課題となることが分かった。また、既存の核データライブラリを用いた計算結果と比較して差異が見られるピークも存在し、核データの改善が必要であることを確認した。今後、各スペクトルの詳細な分析を進め、最適なパターンを検討する。

PERLA 実験施設では、実際の再処理施設の分析ラボにおいて、グローブボックスの下に設置可能な小規模装置の設計に向けて、基礎試験装置を用いたテストを進めている。中性子減速体のサイズを $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 以下にすることを目標としており、本装置では $70\text{cm} \times 70\text{cm} \times 50\text{cm}$ の減速体を用いている。本装置では、 ^{252}Cf 線源を用いて中性子を照射しており、線源を中央に設置した中性子減速体の内部とガンマ線検出器の間で試料を往復させることで、中性子照射とガンマ線測定を繰り返す。これまでの実験では、ガンマ線測定中に鉄の即発ガンマ線(6MeV程度)など、 ^{252}Cf 線源が放出する中性子に起因する高エネルギーのガンマ線がバックグラウンドになることや、中性子照射後の試料から多量のX線が放出され、検出器の信号増幅器が飽和するなどの問題点が明らかになっている。今回の実験では、これらの問題に対処するため、遮蔽体や線源強度などの条件を変えた試験を行った。今回の実験では、約41MBqの ^{252}Cf 線源を使用した。0.71%から4.46%までの濃縮度の異なる4種類のCBNM試料を測定し、全ての試料で遅発ガンマ線が測定できることを確認した。また、ロッド形状のものとディスク形状の2種類のプルトニウム試料を測定したところ、ディスク形状の試料でのみ遅発ガンマ線を確認することができた。これは、形状や密度により、中性子が試料の内側まで到達せず、十分な核分裂を誘発できなかったことや、遅発ガンマ線が試料によって遮蔽されてしまうことなどが原因と考えられる。

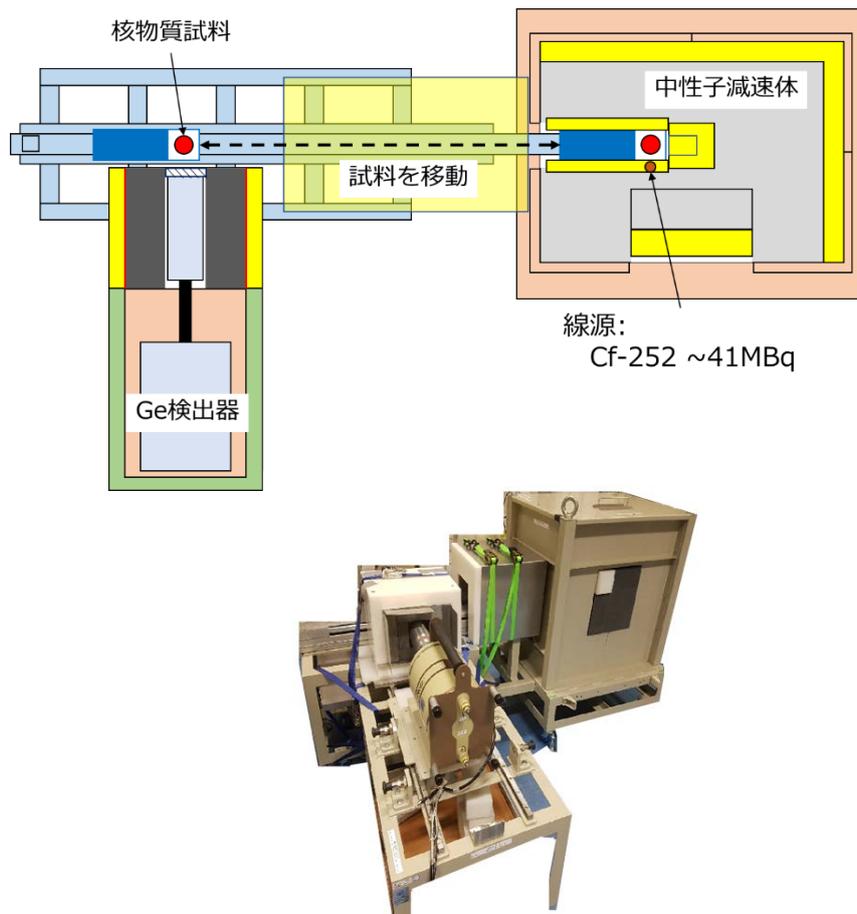


図2 基礎実験装置の概念図(上)および写真(下)

今回の実験結果を基に、2021年度末に予定している実証試験に向けた打ち合わせを開始した。特に、PERLAは実証試験の場所の第1の候補であり、実証実験を行うために必要な事項や課題についての議論が中心となった。主な課題として、ウランとプルトニウムの混合試料が無いこと、ウラン試料とプルトニウム試料の形状・密度が大きく異なるため、実証実験に不向きであることが挙げられ、利用可能な核物質試料の検討を進めていくことを確認した。

【報告:技術開発推進室 高橋 時音】

発行日：2020年1月30日

発行者：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(JAEA)
核不拡散・核セキュリティ総合支援センター(ISCN)