

第 68 回放射線科学研究会聴講記

標記研究会は 2019 年 4 月 17 日 (水) 午後 1 時半から 5 時半まで住友クラブにおいて、中野敏彰氏 (量子科学技術研究開発機構)、櫻井博儀氏 (理化学研究所)、井岡邦仁氏 (京都大学基礎物理学研究所)、秋津 裕 (エネルギーリテラシー研究所) の 4 名の講師をお招きして開催した。座長は前半 2 件を、児玉靖司先生 (大阪府立大学) が、後半 2 件を岩瀬彰宏 ONSA 専務理事が務めた。なお、講演会終了後、講師の先生を囲んで技術交流会が行われた。

1. 放射線によって生じる DNA 損傷の可視化と定量法の確立

量子科学技術研究開発機構 中野敏彰

電離放射線による生物影響を定量的に調べるには、生成される DNA 損傷の種類と量を定量的に把握することが基本となる。これまでに、放射線による様々な DNA 損傷、例えば、DNA 鎖切断や塩基損傷等について、ゲル電気泳動や損傷塩基特異的抗体を用いた免疫蛍光染色等による定量法が用いられてきた。しかし、DNA とタンパク質が共有結合して形成される DNA-タンパク質クロスリンク (DPC) については、これを定量する適切な方法がこれまでになかった。そこで中野講師は、2 つのアプローチによる DNA-タンパク質クロスリンク



図 1 講演中の中野講師。

(DPC) の定量法を開発した。DPC は損傷となるタンパク質による立体障害のために、これを修復する酵素が容易に近づくことができないため、致死に直結する損傷とこれまで考えられてきたものである。定量法の一つは、DNA に結合したタンパク質を蛍光物質で標識し、その蛍光強度を測定する方法である。このとき、濃度既知のタンパク質 (ヒストン H1、または牛血清アルブミン) を同じ蛍光物質で標識し、その蛍光強度を測定して比較することにより、DPC 損傷量が求められる。この方法を用いれば、DNA 塩基対あたり何個の DPC 損傷があるのかを調べることが可能である。もう一つの方法は、この DPC 損傷について原子間力顕微鏡を用いて可視化して測定するものである。この方法では、架橋形成するタンパク質サイズが小さいと見逃すことが問題となる。そこで、タンパク質をビオチンで標識し、このビオチンにさらにアビジンを結合させてサイズを大きくして顕微鏡で観察する。そこで実際に、マウス大腿部に腫瘍を移植し、正常酸素分圧下、並びに大腿部を結束して誘発した低酸素分圧下にて X 線 (60 Gy) を腫瘍に照射し、その後腫瘍における DPC 損傷を前者の蛍光強度に基づく定量法で計測した。その結果、放射線によって生成される DPC 損傷量は、ヒストン H1 で標準化した場合には、正常酸素分圧、及び低酸素分圧で、それぞれ 1.7 、及び $6.4/10^7$ 塩基対/Gy であり、牛血清アルブミンで標準化した場合には、それぞれ 0.7 、及び $2.7/10^7$ 塩基対/Gy であった。すなわち、低酸素分圧下で照射されると、3~4 倍程 DPC 損傷が多く形成されることが明らかになった。次に、原子間力顕微鏡を用いた可視化定量法により、同様の条件下で放射線による DPC 損傷量を調べた。その結果、正常酸素分圧、及び低酸素分圧で、それぞれ 1.0 、及び $4.4/10^7$ 塩基対/Gy であり、やはり低酸素分圧下では、4 倍程 DPC 損傷が多く形成されることが分かった。この可視化法と蛍光強度法で定量した DPC 損傷量がかなり近い値を示したことは驚くべきことであり、この全く異なる 2 つのアプローチによる DPC 損傷量の定量法が非常に信頼性の高い測定法であることを示し

ている。さらに、この損傷が低酸素条件下で生じやすいことは、がんの放射線療法において意義深い結果である。最後に、クラスター損傷に係る可視化の試みが紹介された。クラスター損傷とは、10～20塩基対内で2箇所以上の損傷が生じたものであり、その修復は困難、かつ修復誤りが起きやすいとされる損傷である。このクラスター損傷は、特に高LET放射線できやすいと想定されていたが、これまで直接観察されたことはなかった。適切な測定方法が無かったからである。そこで、先のDPC損傷可視化法を応用してプラスミドDNAにおける塩基損傷を可視化できる方法を新しく開発した。その結果、世界で初めて、クラスター損傷の原子間力顕微鏡による可視化に成功した。この方法により、推定通り高LET放射線によりクラスター損傷量が多くできることが明らかになった。この成果は、重粒子線の生物影響を解明する重要な糸口を提供するものである。本研究で新しく確立されたDNA損傷の可視化による定量法は、今後さらにクラスター損傷の修復動態の研究等に威力を発揮すると考えられ、さらなる成果が大いに期待される。

(児玉靖司 記)

2. 高レベル放射性廃棄物低減に向けた基礎研究と今後

理化学研究所 櫻井博儀

原子炉で燃焼された燃料中に含まれる高レベル放射性廃棄物の処理は、重要な問題である。特に長寿命の核種は、処分場を1万年以上も管理できるかという問題もあり、何らかの方法で短寿命化する必要がある。その1つとして加速器を用いた方法が提案されている。この方法の特徴は、一部の長寿命核分裂生成物(LLFP)については、低減化だけでなく、資源化も考慮されていることである。

2014年10月から革新的研究開発推進プログラム(ImPACT)の1つ「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」(藤田玲子プログラム・マネージャー)の中の1つとして研究が本格化し、群分離と核変換、両面での研究が行われた。核変換については理化学研究所の重イオン加速器施設「RIビームファクトリー(RIBF)」でのデータ取得と革新的な加速器が発案された。そのシナリオを図2に示す。

高レベル放射性廃棄物に含まれるLLFP、Se-79、Sr-90、Zr-93、Tc-99、Pd-107、Sn-129、I-129、Cs-135、Cs-138などを分離回収し核変換することで、放射能のレベル化を進め、後世代への負担を低減する。更に、分離回収したLLFPを白金族やレアメタル等に資源利用することにより、海外市場に左右されない供給源を確保することができる。そのためには核反応データとその解析結果に基づき、加速器を用いた核変換システムの開発を前提に、その要素技術としてのビーム種、強度、エネルギー、標的性能、FP標的材などの研究が必要である。



図1 講演中の櫻井講師。

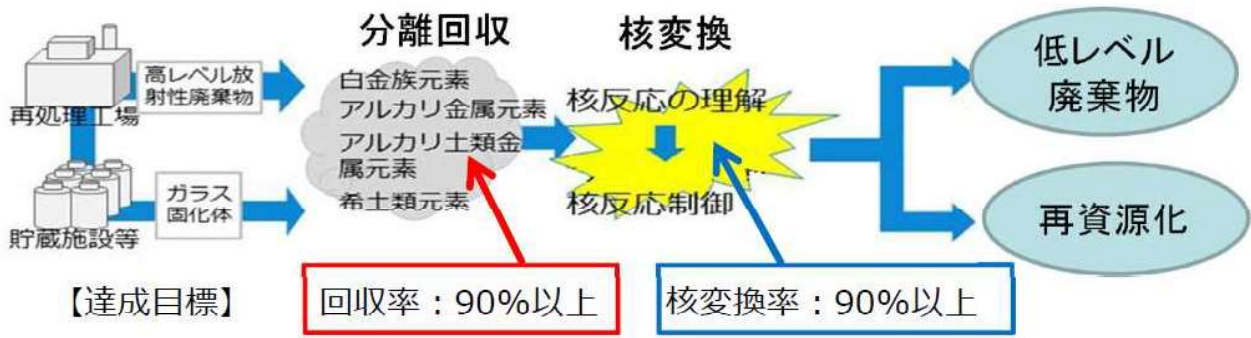


図2 加速器を用いた放射性廃棄物の再処理。

理化学研究所は、RIビームファクトリー（RIBF）において、世界最高性能の加速器、分離生成装置、大強度ビーム、大強度ビームに耐える標的の開発等の実績を有する。RIBFでは2007年の本格稼働後、重陽子からウランに至る多種多様なビームを大強度で加速しており、その強度は世界最高である。それを用いてLLFPの核データの取得が、潰したい核種をビームにし、核変換誘発粒子を標的にする、逆運動学的手法を用いて行われた（図3参照）。2014年4月に核子当たり約200MeVのエネルギーをもったCs-137とSr-90を陽子、重陽子標的に照射し、破碎反応のデータを取得した。破碎してできた反応生成物はほぼビームと同じスピードで前方に飛び出してくる。ビームおよび反応生成物の一つ一つを識別することで、反応生成物の生成断面積が取得できた。

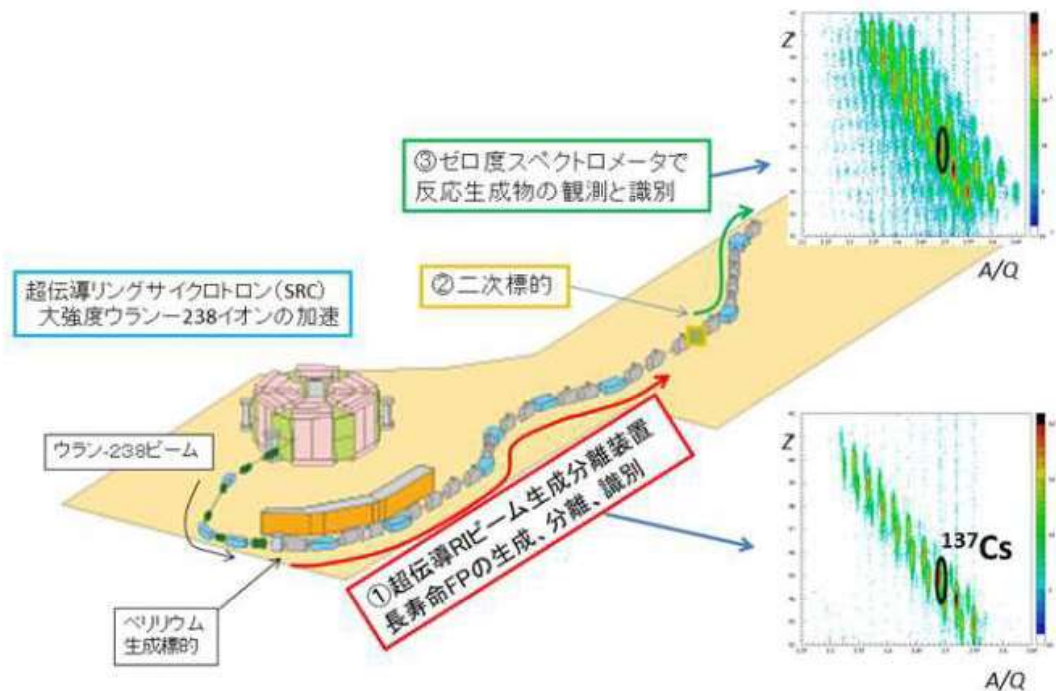


図3 実験の概要。超伝導サイクロトロンで加速されたウランビームを標的に照射し、Cs-137やSr-90をビームとして取り出し、二次標的に照射する。二次標的での反応生成物は、ゼロ度スペクトロメータで分析する。

この実験データによって核子当たり200MeVの陽子、重陽子を、同位体分離されたCs-137やSr-90に直接照射したときに、どういう核種ができるのかをシミュレーションできる。例えば、生成物の半減期の分布などを知ることができ、照射後の分離プロセスに関する知見を得ることができる。

再処理施設で年間に処理されるLLFP量に見合う核変換処理量を達成するために、加速器にはどれだけ

のビーム強度が必要かの議論の結果、1GeVの陽子ビームを直接LLFPに照射したとき、再処理施設から出る1年分の量を3年で半分にする強度として、1アンペアが必要という概算値がでた（図4参照）。1アンペアの強度は、現在稼働中の加速器施設の強度の1000倍である。

強度の次は、ビーム種についての議論であった。電子の場合には、物質中での制動放射によってつくられた10MeVガンマ線での光吸収反応により核変換を引き起こす。中重核では断面積は約0.2バーン程度である。これに対し、10MeVのガンマ線が対生成を起こす断面積は10バーンと大きく、電子ビームのエネルギーはほ

とんど電子と陽電子を生成するのに使われてしまう。次に陽子か重陽子が良いかの議論を行い、重陽子を選んだ経緯が述べられた。重陽子の場合には、重陽子の破碎で中性子を作り易く、ミュオンを生成する能力も優れているからである。最後にビームのエネルギーは、重陽子を直接入射する「直接照射方式」と重陽子をリチウム標的に照射して2次中性子をつくり、中性子を標的に照射する「中性子照射方式」とを比較して決定された。中性子は物質中で電磁的にエネルギーを損失しないため標的厚を厚くすることができるので、中性子照射方式では100-200MeV/uで直接照射方式を上回る。そこで、目標エネルギーは100MeV/u程度と設定された。

ImPACT期間中に考案された方法は、核融合炉用NBIイオン源を利用して直径15cm程度の1Aのイオンを取り出し、高周波四重極加速管（RFQ）を使わない、シングルセルキャビティで加速空洞を制御する方式である。省エネを実現するために超伝導加速空洞を導入することや永久磁石を利用することも検討されている。この加速器は、大強度のビームが取り出せることから、核変換だけでなく、様々な用途に利用できる革新的な方法であり、特許出願中である。加速器だけではなく、1Aのビームを受けられる新しい液体リチウム標的も考案され、現在、これも特許出願中とのことである。

200MeV×1A=200MWの重陽子ビームが、例えばφ30cm長さ50cm程度のターゲットに当たった場合の発熱は大変なものである。その除熱方法についての質問があった。冷却剤をラセン状に回転させることで効率よく除熱できるとの答えであった。そのような発想が生まれたのは、プロジェクトチームの構成員が基礎科学の研究者だけでなく、技術者も含まれていたからとのことである。

高レベル放射性廃棄物低減化に向けた研究は「トイレなきマンション問題」の解決のために必要なものである。この問題については、昨年10月の第67回放射線科学研究会で大久保成彰講師による「ADS用材料に関する研究の現状」、今年1月の第27回放射線利用総合シンポジウムでの上出英樹講師による「エネルギー社会の変革と高速炉サイクルの実力」そして今回と連続して講演がなされた。大久保講師の講演は加速器駆動システム（ADS）を用いての、上出講師は高速炉を用いての、そして今回は大強度加速器を用いての核変換処理である。何れの方法にも長所があるが、処理できる核種は多少異なるようである。これらの方法を工業的に確立させることは、再処理工場の稼働、最終処分地の選定と同様、重要な課題である。

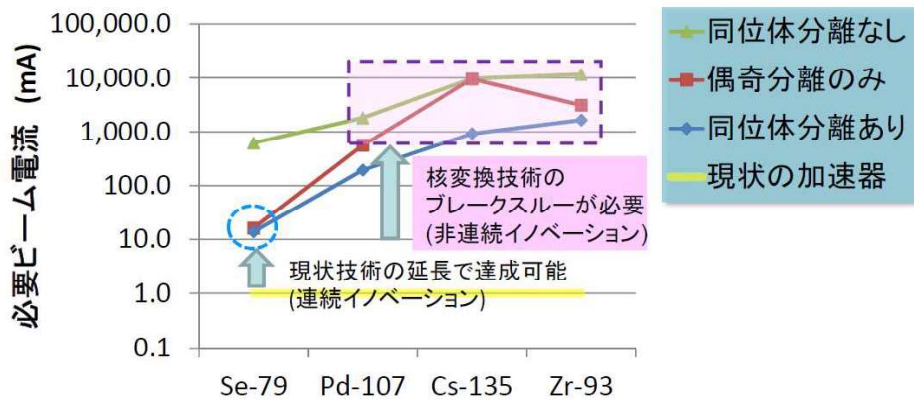


図4 再処理施設で生産される長寿命核種を核変換半減期3年で処理するために必要なビーム強度。

(義家敏正 記)

3. 重力波と同時観測されたガンマ線バーストの正体は？

京都大学基礎物理学研究所 井岡邦仁

2019年4月10日、国際プロジェクト（イベントホライズンテレスコープ）が巨大ブラックホールの存在を画像で直接捕らえられたことを発表し、ブラックホールが一躍、多くの人たちの関心の的となっている。本講演は、ブラックホールや中性子星の合体と、それに伴う重力波、各種電磁波の放出と観測に関する内容であった。研究会参加者が非常に多くなった理由の1つに、直前に話題になったブラックホールへの関心があったと思われる。

とはいえ、一般の人たちにブラックホールを十分理解するのは大変難しい、ということから、井岡講師には、初歩的な事項の説明から講演を始めていただいた。

まず重力と重力波の説明があった。重力の本質は、空間を横に潰し縦に伸ばすというもので、この力が波として空間を伝わっていくのが重力波である。重力波による空間の伸縮はたった 10^{-21} cmという極めて微弱なため、それを観測するのに、片腕が4kmにも及ぶ巨大なレーザー干渉計からなる重力波望遠鏡が用いられる。アインシュタインが一般相対性理論で重力波の存在を予測してちょうど100年目の2015年9月14日に、米国ハンフォードとリビングストンに設置されたレーザー干渉計（図2）によってブラックホールの合体に伴う重力波（GW150914）が直接観測された。この功績により、米国の研究者R. Weiss, B. C. Barish, K. S. Thorneの3名が2017年ノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい。

重力波の初めての直接観測に続いて、その2年後の2017年8月17日にレーザー干渉計LIGOとVIRGOによる



図2 米国リビングストンのレーザー干渉計 LIGO。



図1 講演中の井岡講師。

重力波（GW170817）の観測事象は、正に歴史的な一大イベントとなった。これは単に連星中性子星合体の発見というだけでなく、GW170817 検出の後に、X線・ガンマ線のショートガンマ線バースト（sGRB）、紫外・可視・赤外のマクロノバ、X線・電波の「残光」という広い波長領域の電磁波の観測が世界中の3000人以上の観測者によってなされたことであり、本格的なマルチメッセンジャー時代の到来を強烈に印象付けたのである。

以上のような概略の説明の後、GW170817に伴う電磁波発生やその

起源にかんして少し詳しい説明があった。sGRBは、毎日1回程度宇宙のどこかで起こっているガンマ線の大爆発で、その起源の最も有力な候補が、連星中性子星の合体である。図3に示すように、GW170817の観測（中性子星の合体）の1.74秒後に約2秒間ガンマ線が観測された。このガンマ線はsGRB170817Aと呼ばれる。このガンマ線は、連星中性子星の合体に伴って検出されたため、ついにsGRBの起源が明らかになったか、と大騒ぎになったそうである。

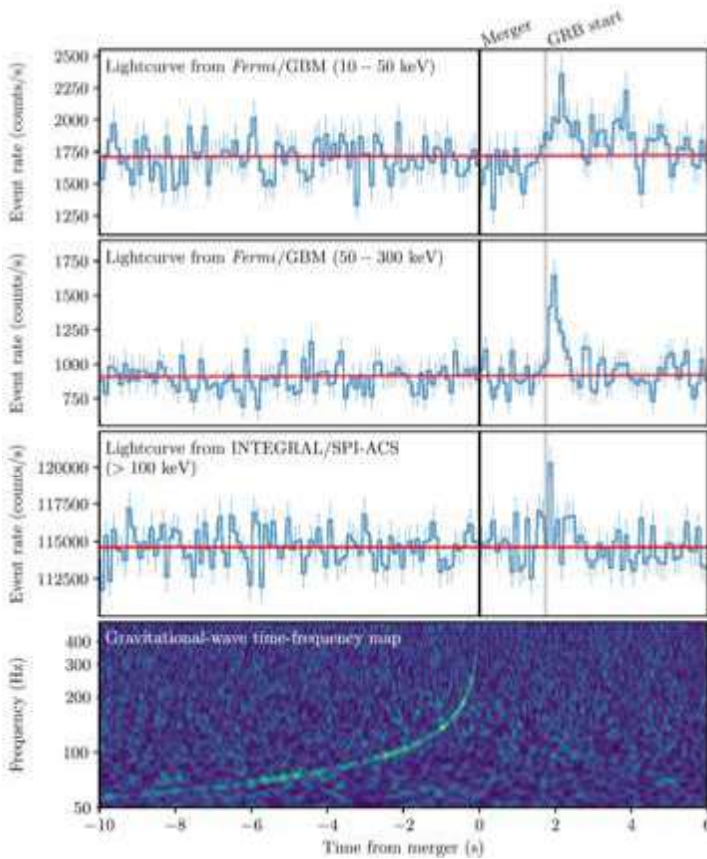


図3 重力波（最下部のグラフ）に伴うガンマ線バーストの光度曲線。

ジェットを見かけ上暗くするには、ジェットをoff-axis方向から観測すればよい。一方、連星中性子星合体時の飛散物質をジェットが貫通するのに失敗しても、そのエネルギーがコクーンに吸収され、コクーンは衝撃波を形成して膨張し、飛散物質を突破するときにsGRBが生じる可能性がある（失敗ジェットモデル）。最近、K. Mooleyたちは、電波残光の超高速運動の事象から、sGRB170817は相対論的ジェットが起源である決定的証拠を示したということである。

最後に、連星中性子星の合体が金やプラチナなどの重い元素生成の起源であるとの話があった。これら重元素の生成過程はr-processという名前で見られる。r-processの起源に関しては、いまから15年ほど前の大阪ニュークリアサイエンス協会・大阪府立大学共同主催の放射線利用総合シンポジウムにおいても、ある専門家に講演をいただいたが、その時は、r-processの起源は、超新星爆発による大量の中性子発生と、それに伴うベータ崩壊によるものであるということであったと記憶している。その点について質問したところ、この数年で、r-processの起源として、連星中性子星の合体のほうはかなり有力になっているそうである。この学問分野の最近の目覚ましい発展を改めて認識させられた。

（岩瀬彰宏 記）

ところが、sGRB170817Aは、これまで観測されているsGRBと比べて2桁以上も暗いイベントであったため、本当にこれまでのsGRBと同じ種類のものなのかどうかの大論争が巻き起こっている。これまでも今回のような暗いsGRBは検出されていたはずであるが、重力波との同時観測がなければ追観測は行われず、見過ごされてしまっていた可能性が高い。

そこで、sGRB170817は従来のsGRBと同類なのか、つまり、相対論的ジェット（ジェットとは、中性子星やブラックホールなどの天体によって生成される細く絞られた磁化プラズマの流れ）が起源かどうかというのが問題となる。現時点ではジェットでも説明できるが、他の説も提案され、大論争が続いている状態ということである。通常のsGRBを説明するためには、連星合体時に飛び散る飛散物質をジェットが貫通する必要がある（成功ジェットモデル）。暗いsGRB170817は、連星中性子星が合体するときに飛散する物質を貫通できない弱いジェットに伴うものとは考えられない。しかし、

4. 次世代のための効果的なエネルギー教育をめざして～エネルギーリテラシー研究より報告～

エネルギーリテラシー研究所 秋津 裕

秋津講師は東日本大震災のつなみによる福島原発事故の前年の2010年から、エネルギー・放射線に関する幼児教育に携わるようになった。紙芝居を自ら作成して幼稚園児に正確な知識を伝える活動は講師の真骨頂かもしれない。筆者は福島原発事故の数年後に東京でのある会議で秋津講師の幼稚園児向けの紙芝居を実際に拝見して大変感銘を受けた。その後、秋津講師は京都大学大学院にて、2018年3月に工学博士（エネルギー科学分野）の学位を取得された。その間、オンサの研究会で講演をお願いしたいと考えていたが、今回は、中等教育に関わる学位論文の成果を中心に講演していただいた。近年の異常気候の主要原因とされる地球温暖化に歯止めをかけるために2016年11月にパリ協定が締結され、批准国（団体）は110にのぼった。

パリ協定での批准国はそれぞれの国情に応じたエネルギー対応を要請されることになっているが、協定には国民の意識を高め、地球温暖化解決への参加を促す教育の重要性が明記され、エネルギー・環境問題の解決は、技術発展、政策に加えて市民参加にかかっているとされていることから、市民のエネルギーリテラシーが重要である。はじめに様々な分野で耳にする「リテラシー」を次のように簡潔にまとめられた。リテラシーとは単に物事を知っているということではなく、(1) 書字文化による共通教養、(2) 教育によって育成される社会的自立の基礎、(3) 与えられた課題を社会の中で広く議論するために、必要な情報や知識を選択し判断する能力である。標題のエネルギーリテラシーに当てはめると図2のようになる。学校教育の場でのエネルギー教育の現状としてEU、米国、日本の例を紹介した。これらの国ではそれぞれの国情に応じた教育が実施されているものの、教育効果は必ずしも上がっていない。EUの国民の多くはエネルギー問題の責任は個人よりもむしろ政府にあり、エネルギー効率の改善は政府がやるべき課題と考えている。米国では国民の化石燃料や温暖化に関する知識の欠如が明らかになり、政府をして「国民の知識の欠如は経済的、技術的な問題より深刻であり、国家を躓かせるかもしれない」と言わしめている。日本ではエネルギー教育は環境教育の一部として認識されており、その学習指導要領は漸次整備されつつあるものの、教員からは位置づけが不明確、難しい、教材・費用の不足などの課題が指摘されている。特に福島原発事故以来、原子力をエネルギー教育の中で取り扱うことの困難さもある。続いて本論に入った。エネルギー問題に関する調査には多くの先行研究があるが、各々の調査はその目的に応じた設問設定になっており、それぞれの視点が異なるために、それらをまとめて整理しても合理的な総合評価は得られない。そのため、調査研究を系統的に行えるように米国のDeWaters



図1 講演中の秋津講師。

エネルギーリテラシーがある人とは：

- エネルギーの生産から輸送、貯蔵、変換、分配、廃棄に至るまでの包括的なエネルギープロセスを認識し；
- エネルギー選択が経済効率、エネルギー安全保障、環境に及ぼす影響を理解し；
- 持続可能な社会のためのエネルギー関連の問題解決のための、個々の貢献の必要性和有効性を認識し；
- ひとりひとりの知識、スキル、エネルギー関連情報を理解する能力を向上させるために努力し；
- エネルギー関連の問題解決に取り組むすべての人と協力し；
- 省エネルギーのための適切な行動を続ける人。

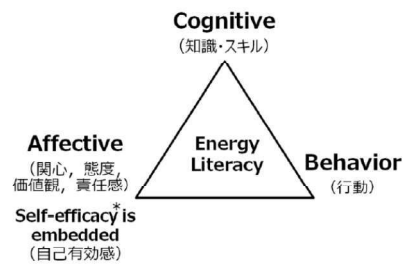
図2 エネルギーリテラシーのある人。

教授らによって提案されたエネルギーリテラシーフレームワークに基づいた手法を採用した (図 3)。これは各個人の知識やスキルを如何に有効に発揮させるかを考え、それを実際に行動に移す能力との相関を指標とするとよいであろう。これに基づいてまず日本の中学生のエネルギーリテラシーを調べた。中学生を対象としたのは義務教育の中でもエネルギーに対する単元が充実しており、またエネルギー使用、選択、行動を通じて、将来のエネルギーに関する決定に、直接あるいは間接的に影響を及ぼす世代のエネルギーリテラシーを理解することは、エネルギー教育開発のための手がかりを得ることを期待できると考えたからである。最初の調査は 2013 年 3 月に福島、東京、京都、長崎の 6 校の中学生に対して、全 90 項目の設問に対して行い、1316 通の有効な回答の統計処理による解析を施した。当時の中学生は約 350 万人であり、信頼度 95%、誤差±3%のサンプルサイズは 1067 人である。さらに DeWaters らの米国の同等の学年の生徒に対する調査結果との対比を行った。その際、米国にはなじまない一部の設問は除外した。得られたデータは日米の社会規範の相違を反映する興味深いものとなった。

すなわち日本では知識やスキルが高くても関心や行動

との相関に必ずしも結びついていないのに対して、米国で知識が低くても行動に対する自己有効感が有為に高くなった。その結果を踏まえて知識と行動との相関をさらに検証するために計画的行動理論 (TPB) と価値信念規範理論 (VBN) とを結合させた図 4 のエネルギーリテラシーの構造モデルを構築した。かみ砕いて言えば、知識があっても当事者がやる気を出さなければ、行動に移さないし、社会からその行動に対する評価が得られれば行動を起こすモチベーションとなる。それらの因子を考慮した新モデルに基づき、新たに国内の 6 地域 8 校及びタイ、マレーシア、インドネシア、台湾、フランスに調査を広げた。講演ではサンプル数の大きいタイと日本を比較して構造モデルの信頼性を評価した。タイは仏教国であり、その社会規範因子を反映する結果がみられるかもしれないという期待があった。その結果、知識尺度は明らかに日本の方が高いが、その他の構成要素はタイの方が高くなった。とりわけ主観的規範の差は大きかった。教育の観点から日本のエネルギー教育では早期より環境やエネルギー問題に関心を抱かせ、関連施設の社会見学や家庭内教育を通して共通の価値観の醸成を図り、各個人の貢献が重要であることが示唆され、タイでは主観的規範のスコアが高いことから、基礎知識の習得と課題解決のためには自らが考え、実行に移すような教育が望ましいと考えられる。社会科学における統計理論に詳しくない筆者にとっては、解析結果に有為の差があるかどうかの判断がつかかねる箇所もあったが、知識偏重の教育ではなく、みずから健全な社会人となる学校教育を目指すことが初等、中等教育では最も重要であることを指摘されたという印象であった。講演の最後に講師の活動の原点である初等教育用のテキストとして、当協会会員の (株) 原子力安全システム研究所から秋津講師の協力により 2018 年に発行された教育用絵本「はじめましてほうしゃせん」とその英語版の紹介があった。英語版以外の発行も考えているそうである。内容は同社のホームページからダウンロード出来るので、ぜひご覧下さい。

(大嶋隆一郎 記)



エネルギーリテラシーの尺度レベルや相関は比較できるようになったが、エネルギーリテラシー概念構造はまだ報告がない。



図 3 エネルギーリテラシーフレームワーク
Clarkson Univ., DeWaters et al., 2013.

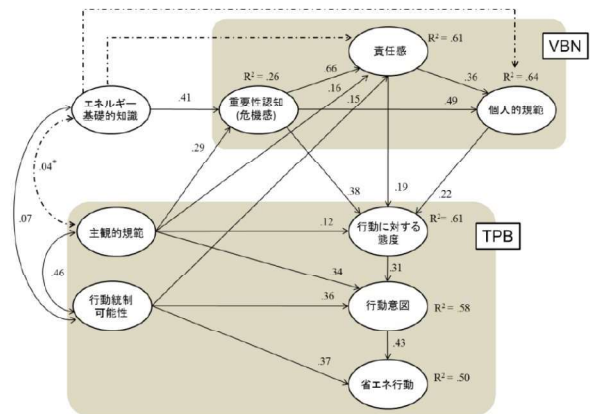


図 4 エネルギーリテラシー構造モデル。