



ニュース

No.60 2016

京都大学 環境安全保健機構 放射性同位元素総合センター

2 / 巻頭言 RI とセキュリティ : 「RI 安全・セキュリティ文化」の構築にむけて

京都大学 原子炉実験所 教授
宇根崎 博信

4 / 研究紹介 特異的阻害剤を利用したミトコンドリア呼吸鎖複合体-Iの構造と機能の解明

京都大学大学院農学研究科 応用生命科学専攻 助教
村井 正俊

8 / アミノ酸類縁体、ムギネ酸類の植物生長促進メカニズムの解明

公益財団法人 サントリー生命科学財団
荒木 良一、村田 佳子、村田 純

11 / 福島レポート2016 「残された課題 ポスト原子力災害クライシスへ」

放射性同位元素総合センター 助教
角山 雄一

19 / コラム 続々編 : 日本を飛び出し自然放射線探査

放射性同位元素総合センター 准教授
戸崎 充男

24 / 自己紹介

放射性同位元素総合センター 技術職員
垣下 典永

26 / センターの活動

32 / 記録・人事等

RIとセキュリティ： 「RI安全・セキュリティ文化」の構築にむけて

京都大学 原子炉実験所 教授
宇根崎 博信

海外に出向いた折、乗り継ぎ時間が刻一刻と迫る中、空港での手荷物検査に並ぶ長蛇の列にトラップされて身動きが取れなくなるという場面にしばしば出くわす。空港の例だけでなく、近年、社会の全ての側面において「セキュリティ」の根本的な見直しと強化が行われているという事実は様々な場面で痛感される。原子力・放射線分野においては、特に9.11以降、現実的にテロリズムの標的となりうるものとして、核燃料物質と原子力施設に対する核セキュリティの強化が世界的に進められている。核燃料物質管理の厳格化、施設への出入管理に加え、監視、警戒等、ハード・ソフトの両面での様々な要求事項に対応すべく、各事業所では苦慮をしているところであり、読者をはじめとするユーザーの方々にとっても、関連施設への立入や利用に対するハードルが一気に上がってしまったことは否めない。多くの方々が「なんか大変なことになっているなあ」と実感されておられるところであろう。さて、「核セキュリティ」という言葉からは、上述した核物質や原子炉施設のみが対象となっているような印象を受けがちであるが、RI及びRI関連施設を含めた（広い意味での）「核」セキュリティを如何に確保するかということが近年の大きな課題となっていることは、多くのRIユーザーには意外と知られていないのではないかと思う。IAEAが2011年に定めた勧告文書「放射性物質及び関連施設のセキュリティ措置」をベースとして、我が国においては、原子力委員会において、RIセキュリティにおける脅威の特定、防護対象施設の特定等の基本的方針の整理と、国際的な勧告への対応状況等について着実に検討が進められている。我が国における現在の考え方では、RIは核爆発装置の材料にならないことから、大線源または大量の放射線源を除いてセキュリティ上の重要性は核燃料物質に比べ低く、いわゆる等級別取り組みの原則に基づき、RI利用活動に与える規制の影響が最小限となるように配慮しつつ防護措置を規定すべき、ということが述べられている。この考え方に沿って、現在では滅菌用線源や医療用線源など、致死的な被ばくリスクが存在する大線量線源装置を主な対象とし、先行する核燃料物質・原子力施設のセキュリティ措置を参考としてRI施設のセキュリティ確保にふさわしい規制のあり方に関する検討が進められている。このように、規制のあり方の原則として、RI利用の現状を十分に勘案し、過剰な規制によって利用が阻害されないようなバランスが配慮されていることは大いに歓迎すべきで

あるが、反面、多くの RI 利用の側面において、「対象とならないのだからセキュリティのことなんか考えなくてもいいんだ」という意識が持たれてしまう恐れを否定できないことが、実は個人的に懸念される場所である。放射性物質の意図的な悪用の事例が、特に非密封 RI について近年でも散見されることは読者諸氏もご存知のことと思う。2002年にはメキシコの医療センターでコーヒーに I-131が意図的に混入され、11人が被ばくした。この例では、最大被ばく量は甲状腺で185 Svであったと推定されている。国内においても、2000年に、研究所職員が実験用の I-125を持ち出し、大阪・高槻市の JR 高槻駅構内で散布した事例がある。この例では幸いに有意な被ばく被害は報告されていないものの、大きな社会的騒乱を引き起こしたという点で記憶に新しいところであろう。これらの事例は2000年初頭、すなわち9.11以前に起こったものであり、当時はテロリズムとの関連はさほど大きく取り上げられていなかったと記憶しているが、現在、同様の事例が発生した場合には、たとえ被ばくの観点からは有意な被害は無くとも、極めて大きな社会的影響、特に放射性物質のセキュリティに関する議論が沸き起こることは容易に想像できよう。原子力規制においては、特に福島事故以降、安全とセキュリティの協働のあり方についての議論が深められており、ともすれば相反する側面を持ちうる両者のバランスをとって、広い意味での「安全」「安心」を社会に示していくことが重要視されている。多くの方々が携わっている一般的な RI 利用においても、上述した事例のようなごく僅かな RI の所在不明や盗取が社会に与える影響の大きさを改めて認識し、たとえ規制上は対象とならなくとも、ユーザー一人一人が、これまで醸成されてきた RI 安全上の意識に加え、「RI セキュリティ」という観点からの認識を持って、安全かつ安心な RI 利用に努めるという姿勢がこれから重要となってくるのではないか。RI の安全取扱いと、RI セキュリティとを自然な形で意識し、実践する、いわば「RI 安全・セキュリティ文化」を醸成することと、それを可能とするような環境、いわば「風土」をいかに構築していくか。これまで「安全」という観点が主であった RI 利用において、ユーザー教育を通じてこれから取り組むべき大きな課題であり、今後の RI 利用の安全性をさらに向上させるための重要なステップであると考え次第である。

特異的阻害剤を利用したミトコンドリア呼吸鎖複合体-Iの構造と機能の解明

京都大学大学院農学研究科 応用生命科学専攻 助教
村井 正俊

1. 緒言

ミトコンドリア呼吸鎖複合体-I (NADH-ユビキノン酸化還元酵素) は、ミトコンドリア内膜やバクテリア細胞膜上に存在する呼吸鎖電子伝達系の初発酵素であり、基質の酸化還元と共役してプロトンの能動輸送を行う膜タンパク質複合体である。複合体-Iの構造は、基質の酸化還元を担う“親水性ドメイン”とプロトン輸送を担う“膜ドメイン”の2つのドメインから構成され、哺乳類ミトコンドリアの場合、複合体-Iは総サブユニット数45の超分子複合体であり、その分子質量はおよそ1 MDaにも達する (図1, ref. 1)。

複合体-Iは、ATP合成の駆動力となるプロトン電気化学的ポテンシャルを形成するエネルギー代謝

とプロトン輸送を担う“膜ドメイン”の2つのドメインから構成され、哺乳類ミトコンドリアの場合、複合体-Iは総サブユニット数45の超分子複合体であり、その分子質量はおよそ1 MDaにも達する (図1, ref. 1)。

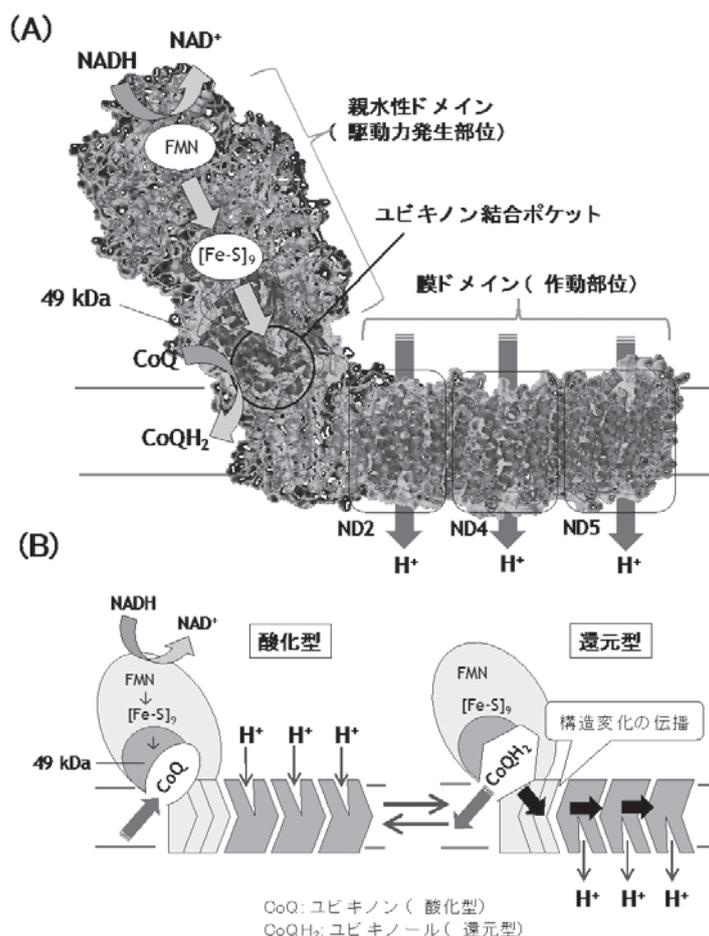


図1. (A) 好熱細菌複合体-Iの結晶構造とユビキノン結合ポケットの位置. (B) 結晶構造から想定される複合体-Iの反応機構のモデル図.

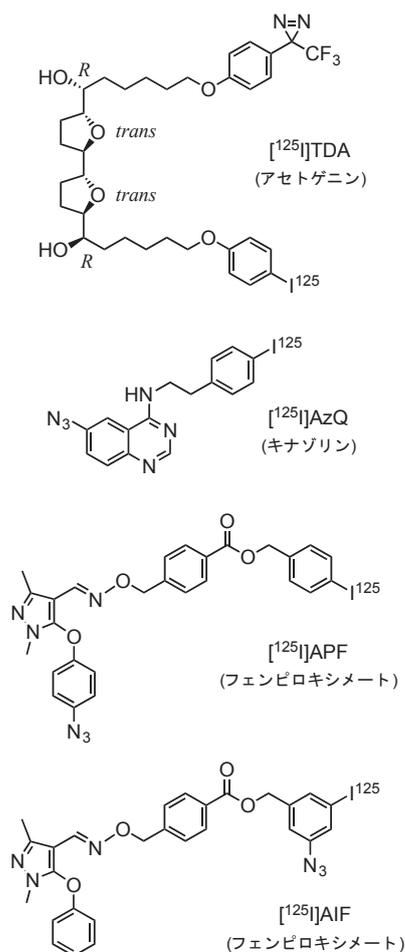


図2. ウシ心筋ミトコンドリア複合体-Iの光親和性標識実験に用いた光反応性アセトゲニン ($[^{125}\text{I}]\text{TDA}$), キナゾリン ($[^{125}\text{I}]\text{AzQ}$), およびフェンピロキシメート ($[^{125}\text{I}]\text{APF}$, $[^{125}\text{I}]\text{AIF}$) の構造.

の基幹酵素であり、ヒトでは複合体-Iの機能障害によって発生した活性酸素が原因となって、パーキンソン病などのさまざまな神経変性疾患が発症することが知られている。また、抗寄生虫薬や殺虫・殺ダニ剤の標的酵素としても複合体-Iが注目されていることから、本酵素の基礎研究の進展は、疾病のメカニズム解明や新規な医薬品の開発などの応用研究に資するところが大きい。しかしながら、複合体-Iはその構造的な複雑さゆえに、ミトコンドリア呼吸鎖酵素の中で最も研究が遅れている。本稿では、当研究グループが実施してきた複合体-Iの構造と機能の解明のための化学的アプローチについて紹介したい。

2. 光親和性標識法による複合体-Iのユビキノン結合部位の同定

複合体-Iの研究において、重要な分子ツールとして古くから用いられてきたのが、ロテノンやピエリシジンに代表される特異的阻害剤である。これらの阻害剤は、基質であるユビキノンの結合部位に特異的に結合することで、ユビキノ還元と共役したプロトン輸送を阻害すると予想され、阻害剤(すなわちユビキノ)結合部位は複合体-Iの機能中枢であると考えられていた。しかしながら、筆者らの研究スタート段階では「複合体-Iのユビキノ結合部位が何処に、幾つ存在するのか」という基本的な知見が不明のままであった。

筆者らは、複合体-Iにおける阻害剤/ユビキノ結合部位を同定することを目標に、代表的な阻害剤であるアセトゲニン、キナゾリン、フェンピロキシメートを鋳型とした光反応性プローブ(図2)を合成し、ウシ心筋重ミトコンドリア粒子(SMP)を実験材料として光親和性標識実験を行った。その結果、アセトゲニンはND1サブユニット、キナゾリンは49 kDaサブユニットとND1サブユニットの境界領域、さらにフェンピロキシメートは49 kDaサブユニットとPSSTサブユニットの境界領域に結合することを明らかにした[2-4]。

これらのサブユニットは、いずれも複合体-Iの親水性ドメインと膜ドメインの境界領域を構成するサブユニットである。光親和性標識実験の結果は、複合体-I阻害剤はこれら3つのサブユニットで構成される共通の空間に結合し、その結合様式は化合物の多様な構造特性を反映して少しずつ異なることを意味している。一連の研究成果は、「複合体-Iのユビキノ結合部位は、親水性ドメインと膜ドメインの境界領域にただ1ヶ所存在する」ことを明確に実証したものである。

3. トシル化学法による複合体-Iのユビキノン結合部位のピンポイント化学修飾

2013年に、Sazanovらによって好熱細菌 (*Thermus thermophilus*) 由来の複合体-IのX線結晶構造が3.4Åの解像度で解かれた (図1A, ref. 5)。複合体-Iは特徴的なL字型構造をとり、光親和性標識の結果から筆者らが予想した通り、ユビキノン結合部位はPSST, 49 kDa, ND1の3サブユニットで構成される細長い空間 (ユビキノン結合ポケット) として存在することが明らかになった。ユビキノン結合ポケットは、親水性ドメインと膜ドメインの境界領域に位置し、親水性ドメイン内の cofactor を移動してきた電子がここでユビキノンへと受け渡される。一方、膜ドメインはプロトン輸送の作動部位であり、Na⁺/H⁺ アンチポーターのホモログである3サブユニット (ND2, ND4, ND5) がプロトン輸送を担うと考えられている。Sazanovらはプロトン輸送のメカニズムとして、『キノンの還元反応によってキノン結合ポケット内に構造変化が誘起され、これが膜ドメインに伝搬し、3つのサブユニットの構造変化が順次誘導されてプロトンが輸送される』というユニークなモデルを提唱したが (図1B)、これを支持する直接的な証拠は未だに得られていない。

もしユビキノン結合ポケット内を蛍光色素などの機能性分子で特異的に化学修飾を施すことが出来れば、プロトン輸送の駆動力となる構造変化を検出することが可能になる。そこで、酸化還元にもなう複合体-Iの構造変化を直視することを将来的な目標に見据え、酵素を様々な機能性分子で位置特異的に化学修飾する方法論の確立を試みた。筆者らは、タンパク質化学修飾法である Ligand-Directed Tosyl Chemistry (トシル化学) に着目し、複合体-Iを特異的に修飾するリガンド分子 (AL, 図3) を合成した。トシル化学とは、リガンドの持つ高い結合親和性を利用して、リガンド分子内に組み込んだタグを標的タンパク質へ誘導し、求核置換によって固定させるといふものである。標的タンパク質へタ

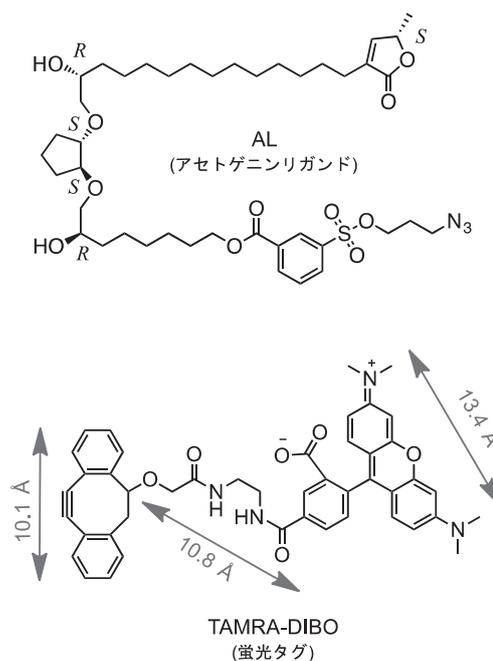


図3. トシル化学による複合体-Iの特異的修飾のために合成したアセトゲニンリガンド (AL) と蛍光タグ (TAMRA-DIBO) の構造.

グを運ぶためのリガンド部には、複合体-I阻害剤のアセトゲニンを選んだ。タグには末端アジドを採用し、これをタグ導入後の反応の足場として、2次タグとなる蛍光発色団やビオチンなどの機能性分子をクリックケミストリー ([3+2] 環化付加反応) により非破壊的に導入することを意図した。

ウシ心筋 SMP と AL を37°Cで24時間インキュベートしたところ、複合体-Iのユビキノン結合ポケットの最深部を構成する49 kDa サブユニットの160番目のアスパラギン酸 (49 kDa Asp160) が特異的にアジド化されることがわかった。また、Asp160がアジド化された (Asp160-N₃) 複合体-Iを含むSMPを、蛍光基 TAMRA を持ち反応性に富む歪んだ環状アルキン (TAMRA-DIBO, 図3) とクリックケミストリーで反応させた。その結果、興味深いことに、Asp160-N₃と TAMRA-DIBO は直接的に反応し、過剰量のユビキノンや阻害剤の存在下でも抑制を受けなかった [6-7]。

4. 総括

好熱細菌複合体-Iの結晶構造を参照すると、ユビキノン結合ポケットは、入口の内径約7 Å、奥行き約30 Åの狭く細長い空間を形成し（“洞窟モデル”）、嵩高いTAMRA-DIBOが最深部に位置するAsp160に接近することは不可能なはずである。この結果は、複合体-Iのユビキノン結合ポケットの構造は“洞窟モデル”で説明できるほど単純なものではなく、多様な構造を持つ低分子化合物を収容できるほど高い柔軟性を持つことを意味している。これらの実験結果は、複合体-Iの反応機構を考察する上での重要な知見である。

5. 謝辞

筆者のグループがRIセンターで実験をさせて頂くようになって、およそ10年になります。全くの素人の状態でRI実験を立ち上げてから現在に至るまで、いつも快適な実験環境を整備して頂いているRIセンターのスタッフの方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

1. Hirst, J. (2013) Mitochondrial complex I, *Annu. Rev. Biochem.* 82, 551-575.
2. Murai, M., Ishihara, A., Nishioka, T., Yagi, T. and Miyoshi, H. (2007) The ND1 subunit constructs the inhibitor binding domain in bovine heart mitochondrial complex I, *Biochemistry* 46, 6409-6416.
3. Murai, M., Sekiguchi, K., Nishioka, T., and Miyoshi, H. (2009) Characterization of the inhibitor binding site in mitochondrial NADH-ubiquinone oxidoreductase using a quinazoline-type inhibitor, *Biochemistry*, 48, 688-698.
4. Shiraishi, Y., Murai, M., Sakiyama, N., Ifuku, K., and Miyoshi, H. (2012) Fenpyroximate binds to the interface between PSST and 49 kDa subunit in mitochondrial NADH-ubiquinone oxidoreductase, *Biochemistry*, 51, 1953-1963.
5. Baradaran, R., Berrisford, J. M., Minhas, G. S., and Sazanov, L. A. (2013) Crystal structure of the entire respiratory complex I, *Nature* 494, 443-448.
6. Masuya, T., Murai, M., Ifuku, K., Morisaka, H. and Miyoshi, H. (2014) Site-specific chemical labeling of mitochondrial respiratory complex I through ligand-directed tosylate chemistry, *Biochemistry* 53, 2307-2317.
7. Masuya, T., Murai, M., Morisaka, H. and Miyoshi, H. (2014) Pinpoint chemical modification of Asp160 in the 49 kDa subunit of bovine mitochondrial complex I via a combination of ligand-directed tosyl chemistry and click chemistry, *Biochemistry* 53, 7816-7823.

アミノ酸類縁体、ムギネ酸類の植物生長促進 メカニズムの解明

公益財団法人 サントリー生命科学財団

荒木 良一¹、村田 佳子、村田 純

1. はじめに

微量元素（ミネラル）は種々の代謝酵素や転写因子などの co-factor として働くほか、細胞の pH や浸透圧の維持に必須であることから、我々人間をはじめ、あらゆる生物にとって重要な栄養素である。植物の場合、ミネラル源のほとんどは土壤中の無機金属で、植物はそれらを吸収し、適宜体内で再分配・蓄積している。しかし土壤中のミネラル構成比は必ずしも植物生長にとって最適な存在量・存在比で存在せず、また容易に吸収できる形態となっているわけではない。例えば鉄（Fe）は土壤に豊富に含まれるものの、一般に 3 価の不溶態（Fe(III)）として存在する。とりわけアルカリ性土壤環境ではほとんどの鉄が不溶態となるため、多くの植物種の生育が抑制される。このため、いかに不溶態鉄を可溶化し体内に吸収するかが植物の生存にとって重要となる。我々はそのような厳しい‘鉄欠乏’環境でも生育するイネ科植物（イネ、トウモロコシ、オオムギ、コムギなど）が根から土壤に分泌する鉄キレート化合物（phytosiderophore）、ムギネ酸類に着目し、phytosiderophore を介した鉄吸収・分配機構の解析を行ってきた。今回はイネの主要なムギネ酸類、2'-デオキシムギネ酸（DMA）を介した鉄吸収の *in vivo* 評価実験、およびそれにより明らかになった DMA の新規生理作用について紹介する。

2. ムギネ酸類研究の経緯

植物の鉄吸収機構は、Fe(III) を Fe(II) に一旦還元してから Fe(II) 輸送体により細胞内に取り込む方法（Strategy I）、および根から分泌する phytosiderophore と Fe(III) との錯体の特異的輸送体により細胞内に取り込むという、イネ科植物に特徴的な方法（Strategy II）の二つに大別される。ムギネ酸（mugineic acid）は、オオムギ（*Hordeum vulgare*）から見出され¹⁾、アミノ酸類縁化合物であると判明した²⁾。その後イネ（*Oryza sativa*）から 2'-deoxymugineic acid（DMA）など、ムギネ酸類縁化合物が続々と見出されると共に、ムギネ酸生合成経路及び根からの分泌機構や、ムギネ酸—金属錯体トランスポーターを介した根から地上部の様々な組織への金属の分配・輸送機構が精力的に研究され、植物の金属ホメオスタシス機構におけるムギネ酸の重要性が明らかにされてきた³⁾。しかしアルカリ性土壤でのイネ科植物の生育に対するムギネ酸の貢献度や必要十分性、またムギネ酸類を介した鉄吸収が植物生長に与える波及効果については不明であった。その主な理由は、ムギネ酸類を得るためには鉄欠乏処理した水耕イネあるいはオオムギの根からの分泌物を回収するほかなく、植物へのムギネ酸の投与実験など、ムギネ酸の生理機能探索に十分量のムギネ酸の確保が非常に困難だったことによる。したがって、鉄キレート以外の生理機能がムギネ酸

¹現所属：和歌山大学教育学部

類にあるのかどうかについては、なおさら不明な点が多かった。

3. ムギネ酸類の化学合成確立と⁵⁵Feの利用により明らかになったムギネ酸類の新規生理機能

そこで我々は徳島大・難波教授との共同研究により DMA の化学合成法を効率化して⁴⁾ 生理実験に十分量の DMA を確保し、これを水耕液に添加した場合のイネ幼苗の生育への影響を調査した。その結果、至適 pH である pH 5.8 に比べイネ幼苗の生育が著しく阻害される pH 8.0 条件において、添加した DMA の濃度依存的にイネ幼苗の生育が回復することを見出した。このとき 30 μM ムギネ酸の添加が、草丈、SPAD 値（クロロフィル蛍光 = 光合成能の代用指標）（図 1）、鉄吸収関連遺伝子の発現プロファイルなどから見て、pH 5.8 に比べて遜色ないレベルに回復するのに十分なことを見出した。これは高 pH 条件で本来誘引される植物生長抑制が、単一化合物の添加によりほぼ完全に克服され得ることを意味する。興味深いことに、30 μM という

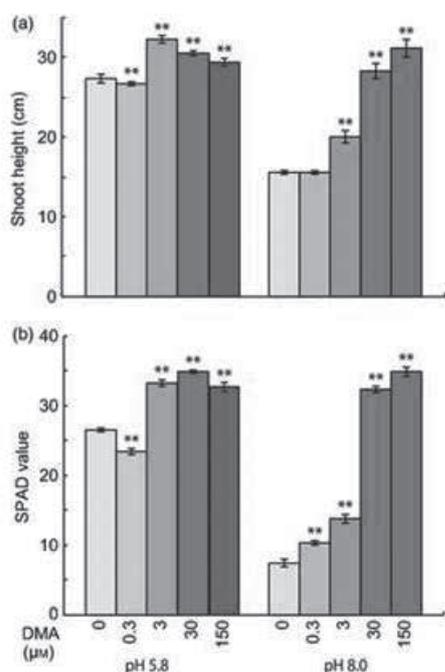


図 1. DMA 添加による、高 pH 条件下でのイネ幼苗生長の回復 (**P < 0.01; Student's t-test). Values shown are mean ± standard deviation (SD) (n = 5).

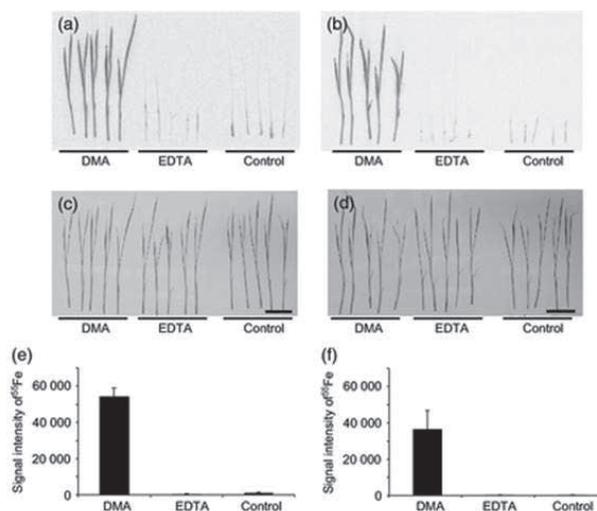


図 2. 高 pH 条件での培地からの⁵⁵Fe 吸収は DMA 錯体の場合に著しく促進される pH 8.0 (a, c, e) および pH 5.8 (b, d, e) にて 2 週間栽培したイネ幼苗の水耕液に 5 μM の EDTA-⁵⁵Fe あるいは DMA-⁵⁵Fe を添加して 4 時間後の⁵⁵Fe 吸収量。(a, b) イネ幼苗のオートラジオグラム (c, d) イネ幼苗地上部の写真 (e, f) イネ地上部の放射能。Control はキレート無添加。スケールバー = 4 cm

DMA 濃度は、報告されているイネ根圏における DMA 濃度⁵⁾ とほぼ同等である。さらに、DMA 添加がイネ幼苗の生長に与える正の影響が、果たして培地からの鉄吸収が促進されたためか、あるいはイネ幼苗組織内の鉄の再分配が最適化したためかを明らかにするため、あらかじめ作成した⁵⁵Fe と DMA との錯体を pH 8.0 の培地に鉄源として添加し、イネ幼苗中の⁵⁵Fe の組織分布について調査した。その結果、⁵⁵Fe-DMA 錯体添加後 4 時間でイネ幼苗地上部全体から⁵⁵Fe 由来のシグナルが検出されることを見出した（図 2）。一方、鉄キレートとして多用される合成キレート EDTA との錯体 (⁵⁵Fe-EDTA) の場合、添加後 4 時間経過した時点でイネ幼苗地上部にほとんど輸送されなかった。これらの結果から、DMA が示すイネ幼苗への高 pH 耐性付与活性は、単に DMA が土壌中の不動態鉄を可溶化するだけでなく、Fe-DMA 錯体が根からの鉄錯体吸収、さらにはイネ幼苗全身への鉄輸送を促す形態であることによると推察された。

以上に加え、マイクロアレイおよび qPCR によりアルカリ培地で栽培したイネ幼苗の遺伝子発現プ

ロファイルをムギネ酸添加の有無で比較したところ、鉄の吸収量の改善にともなって硝酸トランスポーター遺伝子の発現が昂進することが明らかになった。硝酸還元酵素活性も併せて上昇することから、DMA が鉄吸収と硝酸吸収の調節・維持に重要な役割を果たす、‘植物生長促進因子’である可能性が示唆された。

4. 今後の展望

化学合成により飛躍的に容易に一定量のDMAを得ることが可能になったことで、天然の‘植物生長促進因子’としてのDMAの生理活性の再評価が進むと思われる。最近我々は、DMA オオムギ由来のムギネ酸-鉄錯体トランスポーター *HvYSL* 遺伝子を導入した形質転換ペチュニアがDMA-鉄錯体を取り込み、高pH条件下での生育が向上することを報告しており⁶⁾、本来 Strategy I 型の植物にイネ科だけが持つ Strategy II 型の鉄吸収機構を付与できる可能性も見えてきている。今後は圃場レベルでのアルカリ土壌におけるDMA添加効果の検証など、より大きなスケールでの実証実験によりムギネ酸の社会的利用価値の検証が進むことが期待される。(本研究の詳細は Araki, R., Kousaka, K., Namba, K., Murata, Y. and Murata, J. (2015) 2'-Deoxymugineic acid promotes growth of rice (*Oryza sativa* L.) by orchestrating iron and nitrate uptake processes under high pH conditions. *Plant J.* 81, 233-246. DOI: 10.1111/tpj.12722 にて報告した。図表も同論文より転載。)

参考文献

- 1) Takagi, S. Naturally occurring iron-chelating compounds in oat- and rice-root washings. I. Activity measurement and preliminary characterization, *Soil Sci. Plant Nutr.* 22, 423-433 (1976)
- 2) Takemoto, T. *et al.*: Structure of mugineic acid, a new amino acid possessing an iron-chelating activity from roots washings of water-cultured *Hordeum vulgare* L., *Proc. Japan Acad.* 54, 469-473 (1978)
- 3) Kobayashi, T. and Nishizawa, NK. Iron sensors and signals in response to iron deficiency, *Plant Sci.* 224, 36-43 (2014)
- 4) Namba, K. *et al.*: A practical synthesis of the phytosiderophore 2'-deoxymugineic acid: a key to the mechanistic study of iron acquisition by graminaceous plants, *Angew. Chem. Int. Ed.* 46, 7060-7063 (2007)
- 5) Kawai, S. *et al.*: Concentrations of iron and phytosiderophores in xylem sap of iron-deficient barley plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47, 265-272 (2001)
- 6) Murata, Y. *et al.*: Transgenic petunia with the iron(III)-phytosiderophore transporter gene acquires tolerance to iron deficiency in alkaline environments. *PLoS One* 10, e0120227 (2015)

福島レポート2016

「残された課題 ポスト原子力災害クライシスへ」

放射性同位元素総合センター 助教
角山 雄一

東京電力福島第一原子力発電所の事故から5年以上が経過した。未曾有の原子力災害に接した私たち科学者はそこから何を学ぶことができたのだろうか。

原発事故を契機として、筆者はこれまでに数十名の科学者たちと専門分野を超えた研究交流を続けてきた。今回の福島レポートでは、この研究交流の中で見えてきた我々科学コミュニティに残される課題について取りあげる。

1. 原発事故の直後、科学者たちはどう動き、社会に何を残したのか？

平成25年10月1日～平成28年9月30日の三年間、独立行政法人日本学術振興会に「放射線の影響とクライシスコミュニケーション」に関する先導的研究開発委員会が設置された。この委員会は、もしも将来に原子力災害クライシス（原子力災害に起因する危機的状況）に再度直面した場合、その社会的被害を最小限に抑えるために、科学者が行う情報開示行動とはどうあるべきか？クライシス直後に、エビデンスに基づいた市民とのコミュニケーションは可能か？もし可能ならばその理想的な情報伝達手段は？など、①原子力災害クライシス時における科学者と市民とのコミュニケーションのあるべき姿を検討し、②その理想の実現に向けて必要とされる課題を抽出し、③さらに社会に対して何らかの提言を行うこと、を研究目標の柱としていた。

この委員会には、山下俊一委員長（長崎大学副学長）を筆頭に、産学合わせて総勢34名の委員が参加した（図1）。山下氏は、チェルノブイリ原発事故の影響調査をはじめとする放射線影響学分野にお

る世界的大家であり、福島原発事故直後には福島県放射線健康リスク管理アドバイザーに任命された方でもある。また、副委員長の坂東昌子氏は、湯川秀樹の弟子にあたる理論物理学者であり、かつて物理学学会会長も務められるなど日本を代表する科学者である。他の委員は、放射線影響学、分子生物学、免疫学、理論物理学、情報学、統計学など、様々な分野の科学者と、医師、IT系や測定機器メーカーなどといった企業の技術畑の方々である。委員会は三つの分科会で構成され、各分科会の研究テーマは、第1分科会が「最新の知見に基づく放射線の影響に関する情報の分析と整理」、第2分科会が「科学コミュニティ内での合意形成と情報開示手段の研究」、第3分科会が「放射線計測結果の危機的状況下での情報開示手段の研究」となっていた。筆者は第2分科会に参加し、新聞紙面における科学者の発言動向の分析と、科学コミュニティが情報発信をする際の理想モデルの提言などを担当した。

第2分科会ではまず、福島での原発事故後に、科

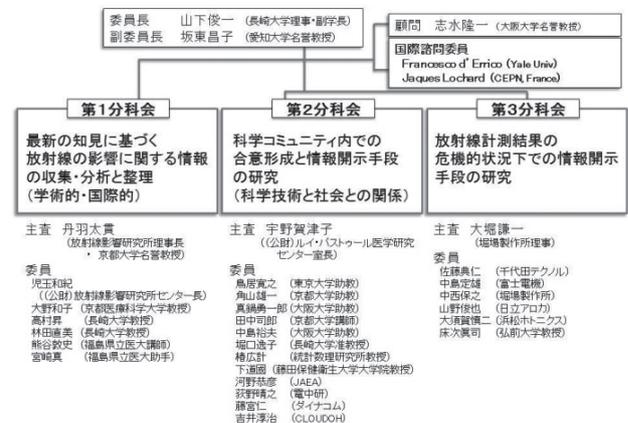


図1: 「放射線の影響とクライシスコミュニケーション」に関する先導的研究開発委員会組織図

学者や専門家がどう動いたのかを詳細に分析することにした。その分析結果から、長期の低線量率放射線被ばく影響のような科学的に未解明な部分が残る事柄について、クライシス時に一般市民に対してどのような形で科学的な情報を提供することが理想なのかを見極めることにした。

あの事故の直後、科学者や医師、原子力のエンジニア、あるいは学会等の学術団体、各大学や研究機関は、テレビや新聞、雑誌、書籍、ネットを通じてさまざまな情報を発信していた。確かに一部の学会や大学、NPOを含めた科学コミュニティは、クライシス直後から果敢に事態に向き合おうとしていた。ところがその努力にもかかわらず、とても残念なことに、クライシス対応としては大きな欠陥も見受けられた。この分科会の分析で明らかになったことを以下に要約する（委員会の最終報告書は、第2分科会の分だけで105ページにのぼる）。

(1) 事故当時の我が国には、低線量低線量率放射線被ばくの人体影響について、科学的な統一見解を示すことができるオーソリティ（権威）の存在が希薄であった。このような権威を持つ団体あるいは個人は、本来であればクライシスの発生前から市民にその存在が認められていることが望ましい。しかし残念ながら、例えば放医研や放射線影響学会などの専門家集団の存在は一般市民に十分には浸透していなかった。

(2) (1)の結果、人体影響の専門家ではない者が放射線の影響についてメディア等を通じて情報発信をしていた。多くの場合、その動機として一個人としての正義感が伺える。ことさら過剰に人体への悪影響を危惧する発言をした者もいれば、そのいっぽうで科学的データを十分に示すことなく安全を唱える者もいた。この両極端な主張は、どちらも結果的に市民、特に被災住民の間に不安の増大や科学者への不信を広げることにつながった。

(3) 一部の緊急時政策に対して、科学コミュニティが十分に関与したといえるのかについては疑義が残る。とくに基準値が事故直後に変更されたことや原発の北西地域の住民避難が遅れたことについては、未だに疑問視する声住民のみならず科学者の間にも根強く残っている。そもそも政策にかかわることなのだから、政治家が責任を持って最終決断をしたはずである。しかしこの政策決定プロセスに、放射線影響の専門家の意見が十分に反映されたとは言い難い。それどころか、専門家が政策に対する市民からの批判のスケープゴートにされた事例さえあった。

(4) 一部の学会や研究機関を除き、メディアを十分に活用できなかった。SNS等のネットツールを利用するなど、現代メディアの特性を知った上での確に情報発信を行っていれば事態は違っていただのかもしれない。たとえば当時、保健物理学会は放射線影響に関するQ & Aサイトを立ち上げ、さらにtwitterを活用し、科学的にコンセンサスが得られたことのみを根拠として丁寧に市民への疑問に答え続けていた（図2）。この学会がとったクライシス対応の評価は今も高い。今後の参考とすべき事例のひとつであると思われる。

我が国の科学界がこのような状態であったのだから



図2：保健物理学会が原発事故後に立ち上げた「暮らしの放射線Q & A」ウェブサイト

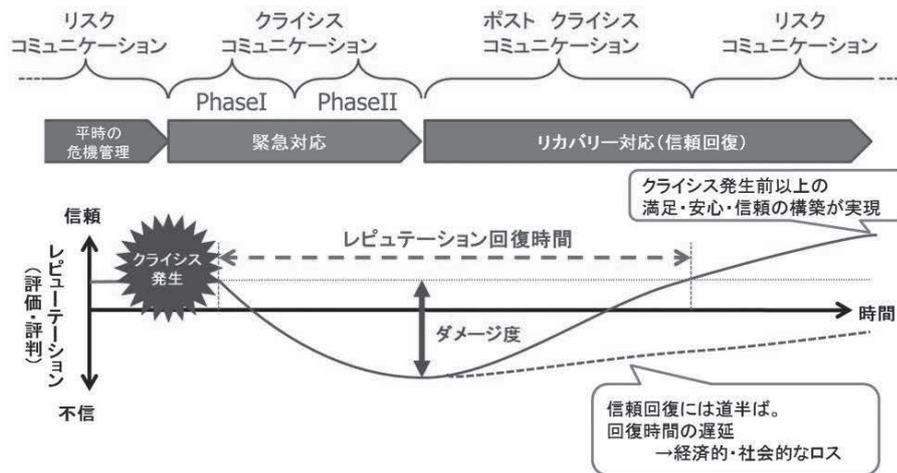


図3：分科会で定義したクライシス前後におけるコミュニケーションの区分

ら、市民が放射線の影響について当時大きな不安を覚えたとしても無理もない。実際、事故から数年後に訪れた福島で、「どの専門家の言うことが正しいのか？」という科学者への疑念、あるいは科学そのものに対する不信をよく耳にした。一度失った信頼を回復するためには大変な時間と手間を要することになる。このことについては、委員会に参加していたIT企業CLOUDOH社の吉井淳治氏が提示した図（図3）を引用して説明する。

図3は、クライシス前後の時期の区分と各区分におけるコミュニケーション方法の切り替えについての概念図である。平時はリスクコミュニケーションを重視する、すなわち市民と科学コミュニティが双方向の情報交換を心がけ、時間をかけてじっくりと議論を深めながら互いに信頼関係を醸成する。ひとたびクライシスが発生したら、避難などの際に即座に役立つ情報を中心に、短くわかりやすく、科学コミュニティあるいは政府自治体が市民に対して一方的に情報を発信する（クライシスコミュニケーションPhaseI）。その後避難などが一段落したら（PhaseII）、市民からの疑問などに丁寧に応えていく。そして、平時に回復するまで市民との対話や社会貢献活動などを継続する（ポストクライシスコミュニケーション）。原子力災害の場合、平時に回復するまでに相当長い時間を要するが、完全に復興

すれば平時のリスクコミュニケーションに戻ることが期待できる。また、この図の下半分には、科学者に対する市民の評価（レピュテーション）の推移についての予測が示されている。この推移のグラフは想像の域を出ないものであるが、もしこのとおりであれば、例え科学先端技術がクライシスを引き起こした一因だったとしても、時期に応じたコミュニケーションを十分かつ適切に実行することで、ポストクライシス後に市民からの支持が強まることさえ期待できる。しかしもちろん対応を誤れば、科学コミュニティへの信頼をクライシス前のレベルに戻すことなど困難なものとなる。

図3の区分に従えば、現在はポストクライシスコミュニケーションの時期にあたる。しかも、クライシス前のリスクコミュニケーションが明らかに欠如し、なおかつ前述の通り直後のクライシスコミュニケーションについてもさまざまな問題があった。この状態のままポストクライシス期を迎えている。実際に、科学コミュニティに対するレピュテーションの回復がままならない状況下にある。それでも、科学への信頼を取り戻す努力を今後も続けて行くほかには道はないようだ。以降に、筆者がこれまで関わってきた、あるいはこれから始まるポストクライシス期における取り組みをいくつか紹介する。



図4：小良ヶ浜地区の民家付近での空間放射線量率。地上高1 m 付近で $3.6\mu\text{Sv/h}$ 前後であった（平成28年9月撮影、Thermo Scientific 社 RadEye B20-ER を用いて測定）。



図6：旧富岡駅西側のアパート。今も津波の跡が見える。後方は復旧工事中の常磐線の線路（平成28年9月撮影）。



図5：夜ノ森地区の住宅街、現在の様子（平成28年9月撮影）。

2. 被災住民の小規模コミュニティごとに放射線の消防団・自警団を

福島県双葉郡にある富岡町は、東京電力福島第一原発の南方およそ10kmの地点にあり、町の東の海岸沿いに第二原発を有する。町は三つの避難区域に分断され、1万3,000人余りのすべての住民が避難生活を余儀なくされている。この町の北東部の小良ヶ浜地区などは依然として放射線量が高く（図4）、かつて住宅が密集していた夜ノ森地区は今も帰還困難区域の中にある。最近見たJR夜ノ森駅付近の住宅街は、まるで5年前から時が止まっているかのようであった（図5）。

現在富岡町は、津波にのみ込まれたJR富岡駅付近（図6）の再開発をすすめている。常磐線の一部

が来年再開することに合わせて（来年、いわき側から富岡まで、仙台側から浪江までが復旧、3年後には全線が営業運転を再開する予定）、駅の西側を拠点とした市街地を新たに造成する計画である（図7）。以前に町役場がアンケート調査を実施した時点では、積極的に帰還しようという住民はあまり多くなかった。しかし、できることなら帰りたいという意思を持ち続ける皆さんも少なからずいる。町では平成28年9月17日より、自宅などに長期間宿泊できるようにする「準備宿泊」を開始した。準備宿泊とは、帰還を前提とした宿泊のことで、町は来年4月に帰還困難区域を除いて避難指示の解除を目指している。役場によれば、全住民の1%ほどではあるが、56世帯119人が準備宿泊の事前登録を済ませているという。

前々から、遠く離れた京都からでもこのような復興に役立つことができないものかと思案していた。ようやく今年度から、筆者を含めたRIセンターの職員有志が、環境省の予算を得て富岡町の復興支援プロジェクトに参加することになった。本プロジェクトのスローガンは「富岡町に放射線の消防団・自警団を」である。これまで本学にある20か所の放射線取扱施設で長年実施してきた自主的自発的な安全管理の文化を、この町の帰還予定の皆さんの間に根づかせることができないか、という挑戦的な試みで

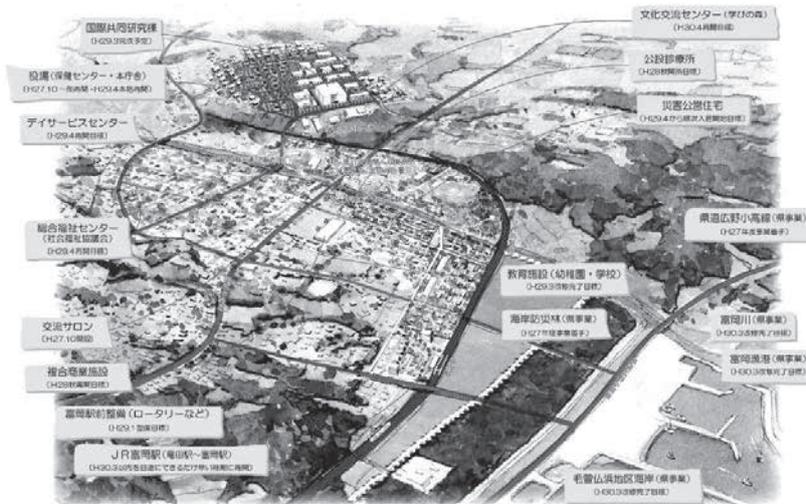


図7：復興拠点整備概要のイメージ図（富岡町役場作成の資料「富岡町再生・発展の先駆けアクションプラン」より引用）

ある（図8）。今後、町役場の健康福祉課や公益財団法人原子力安全研究協会が選任する放射線アドバイザー、それに長崎大学の医師らとも連携し、官学一体の町民支援に臨む予定である。このプロジェクトは三年間継続される予定である。

3. 異分野の学者との交流が生み出した一冊の書籍

原発事故の後、福島県から近畿に避難された方や放射線について疑問や不安を持つ京都市民数名が、NPO 法人「知的人材ネットワークあいんしゅたいん」（先の坂東昌子氏が代表）に集まってきた。そ

して、坂東氏と交流のあった科学者たちと市民との間で放射線影響に関するさまざまな議論や勉強会が重ねられていった。やがてこの交流に参加した皆が大きな疑念を抱くことになる。「いったい放射線被ばく影響について、科学はどこまで明らかにしているのか?」。ところが、いろいろ調べても一向に得心がいかなかったという。そもそも坂東氏を中心とする理論系の物理屋と生物屋との間には決定的な隔たりがあった。放射線影響の分野だけでなく、生物を扱う研究には生物種間の差や個体差を考慮するという特質がある。つまり、すべての関連データを物

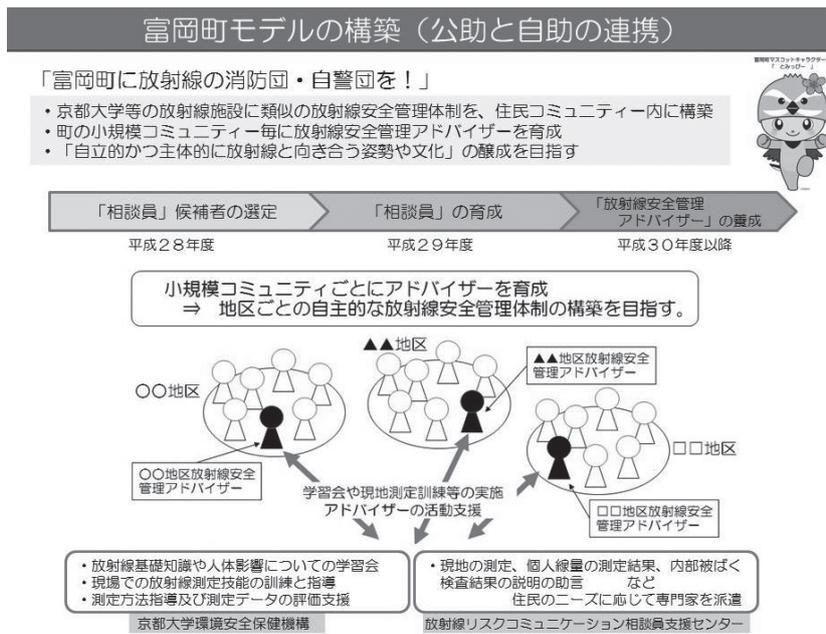


図8：今年度から始まる富岡町復興支援プロジェクトの概要

理学のように統一的に捉えることはなかなか難しい。それでも、一から自分たちで勉強しようということになり、事故以前から提示されていた疫学調査や動物・細胞実験の具体的なデータを洗い出していたのだそうだ。次第に、想いを共有する科学者の輪が広まる中、筆者もそのひとりとして勉強会に参加するようになった。その後、科学史の研究者が仲間に加わり、LNT 仮説は科学としてどこまで正しく、また歴史的にどうしてここまで重視されることになったのかについて知ることになった。さらに医療統計学者が参加し、最新の統計学の見地から、かつてのチェルノブイリや現在福島県で行われている甲状腺がんの疫学調査のデータをどう評価すべきかについても議論を深めていった。なお、この勉強の過程と得られた成果については、この話題に関心を持つ市民の皆さんたちと情報を共有するよう常に心がけた。また、このような取り組みが全国的にも稀有であったことから、勉強の成果を書籍化することもこの活動のひとまずの目標となった。

書籍出版の企画自体は、原発事故の翌年には持ちあがっていた。しかし、ここからが大変であった。単に疫学調査や照射実験の結論だけを市民に押しつけるような、いわゆる教科書的な書籍は避けたかった。そもそも疫学調査や種々の実験がどのような手法で行われているのか、その手法の長所と欠点は何か、調査研究から得られたデータを読み解いてそのデータの価値を評価するために科学者たちがどのような作業を日々行っているのか、などなど、科学者たちにとっては不文律の作法ともいえる科学調査研究の手法を、この本を通じて市民にも理解してもらいたいと願っていた。そこで、放射線影響に高い関心を持つ市民と一緒に、学者たちが書いた執筆原稿について議論や検討を重ね、幾度となく修正を加えた。出版までの間に検討された論文は200報を超える。一時的にもて流行らされたもののその後見直された論文や、今ひとつ学術的に評価が定まっていなかった論文などは省かれ、結果32の論文の解説に

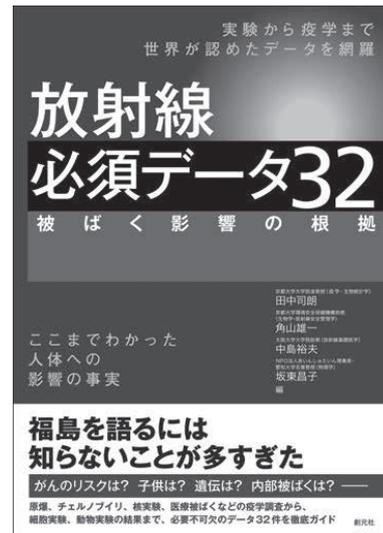


図9：3年かけてようやく刊行された書籍「放射線必須データ32 被ばく影響の根拠」（創元社）

絞られた。市民の代表と科学者たちとの間で取り交わされたメールは数千通にも上った。編集者も採算を度外視して最後までつきあってくれた。いろいろと手間がかかったため、最終的にこの書籍が本屋に並んだのは平成28年3月のことであった。本が完成する間に、編集者に思わず漏らしてしまった言葉がある。「福島を語るには、私たち科学者でも知らないことが多すぎましたね。」と。この言葉は、ともに苦労した編集者の胸にどうやら響いたらしく、そのまま本書の帯に採用された（図9）。

4. 放射線基礎教育と関係者の苦闘

原発事故が起きてから間もない頃、京都市内の小中学校や高等学校の理科教諭数名とセンター職員有志とで勉強会を始めた。この勉強会は現在も「京都放射線教育研究会」（<http://krera.jp>）として不定期ながらも活動を続けている。大学の側から学習プログラムや教材等を押しつけるようなことはしない、実際に教育現場に立たれている先生方が自ら発案される取り組みを尊重し支援する、というのが当会の基本方針である。会の活動の一例をあげると、震災から2年後に京都女子中学高等学校の理科教諭から「放射線に関する社会問題について生徒たちにディベートをさせたい」という提案があった。ディベ

ト学習を通して、生徒たちは相対する意見に耳を傾けることの意味や、自ら興味を持って冷静に考え続けることの大切さ、誰かが数値を出して主張する場合はその根拠を探ることの重要性などを学ぶこととなる。このカリキュラムに参加した高校生には好評で、京都女子中学高等学校では毎年恒例の行事となりつつある。

この研究会に参加しているうちに、子ども向けの放射線学習用教材が非常に限られていることに気がついた。ならば、ということでカードゲーム専門のゲーム会社 Tansan の若者たちとカードゲームを開発することにした。ゲームの基本設計とプロトタイプは震災から半年後にはできていた。しかし大手出版社などに企画を持ち込んでも、風評被害を恐れたり儲けが期待できないなどの理由で次々と断られて

しまった。あきらめきれないので、研究会の理科教諭の皆さんにご協力いただき、小学生から高校生まで実際に遊んでもらって、戦略性やデザインのバージョンアップを続けた。昨年、ゲーム会社の若者たちがとうとう自腹を切って製品化に踏み切った。現在はネットや大手家電量販店のカードゲームコーナーなどで販売されている（図10）。

ようやく製品化されたカードゲームを、郡山市に避難している富岡町の子どもたちに配り、試しに遊んでもらった。嬉しいことに子どもたちは1時間ほどゲームに興じてくれて、その後「紙で止まる放射線は？」と聞いてみたら、それまで放射線の種類になど馴染みのなかった子どもらが「α線！」と一様に答えてくれた。カードゲームの学習効果を目の当たりにした瞬間である。このときの様子は毎日新聞にも取りあげられた（図11）。この紙面を借りて、ゲームの製品化にご協力くださった皆様に厚く御礼申し上げます。

このような小中高での教育活動を展開するいっぽうで、京都大学の学生に対しても何らかの学習プログラムを用意できないかと考えていた。実現するにはいろいろとハードルがあり、あれこれ悩んでいたら当時環境安全保健機構の助教でいらした浅利美鈴氏（現・地球環境学堂准教授）が救いの手を差し伸べてくださった。彼女の元に来る学生たち、「エコ〜ど京大」のメンバーを被災地域に連れて行ってもいいというのだ。これは学生に福島の実状を知ってもらおうとない好機と思い、早速富岡町役場に問い合わせて視察の了承を得た。まずは事前に、放射線の物理や化学、人体影響、放射線測定の基本、福島の実状についての集中講義を RI センター分館で実施した。そして昨年度末の3月7日に福島入りを果たした。日曜日だったにもかかわらず、町役場の方たちがドライバー役までかって出て、帰還困難区域の中まで見学させてくださった（図12）。除染などで発生した大量の放射線廃棄物の黒い袋が山積みされている仮置き場（図13）を目の当たりにして、

あそんでわかる。放射線のこと。



原案・監修：角山雄一（京都大学放射性同位元素総合センター）
ゲームデザイン・グラフィックデザイン：TANSANFABRIK
イラスト：U井
協力：京都放射線教育研究会

TANSANFABRIK

Amazon, 楽天, 大手家電量販店サイトなどで販売中!

図10：世界初？放射線基礎学習用カードゲーム「ラドラボ」



図11：「ラドラボ」は富岡町から避難している子どもたちにも受け入れられた。



図12：帰還困難区域内にある富岡町役場の方の自宅の前
にあったホットスポットを調査する本学学生たち

学生たちは福島への復興にはまだまだたくさんの問題が残っていることを肌で感じたようだった。視察のあとは役場の方が郡山市の居酒屋に学生たちを招待してくれた。しこたま美味しい日本酒を何本も空け、福島視察の旅は終了した。後に役場の方が、「学生さんたちをまた連れてきて。また呑みに行こうと言っておいて！」と言ってくださったのが何よりも嬉しかった。

福島県庁によれば、現在も10万人近い県民が地元に戻れない、あるいは帰らない状態にある。ところが被災地から離れた地域では、福島のことはいくらも済んだことのように思っている人が次第に増えて

いる。

筆者は京都大学や他の大学で放射線分野と生物分野の授業をいくつか担当しているが、必ず福島の今を伝える時間を設けることにしている。現地で見聞き体験したことを、少しでも多くの学生たちに伝えたいという思いからである。何れの大学でも授業後に多数の学生から「福島の現状を知ることができてよかった」という内容の感想をもらう。今春に担当した講義（理系と文系がおおよそ半数ずつの一般教養レベルの生物学の講義）では、14回の講義の中で福島のことを取り上げたのはたった1コマだったにもかかわらず、二百数十名の受講生のうち50名近い受講生が現地の様子をもっと知りたい、あるいは原子力発電や原子力災害のことをこれからも真剣に考えて行きたい、という感想を届けてくれた（なお、これらの感想は出席票の自由記述欄に自主的に書かれたものであり、私の方から成績評価などの目的で書かせたものではありません）。

すっかりマスコミ等では福島の露出が減ってしまったが、若者たちの興味や問題意識は決して消えることはない。ポストクライシス期の苦闘が続く中、筆者にとっては学生たちの前向きな姿がとても大きな救いとなっている。



図13：大量の放射性廃棄物が集積された富岡町第二仮置場（小良ヶ浜地区）。約60haの仮置場の敷地内に、町内で発生した放射性廃棄物が詰められたフレキシブルコンテナや大型土のう（いわゆる黒い袋）が約100万袋積み上げられている（平成28年1月時点の数）。町にはこの他に二か所仮置き場がある。いずれこれらは全て第一原発近縁の中間貯蔵施設へ移送される計画だが、移送完了の目途は立っていない。

続々編：日本を飛び出し自然放射線探査 —宇宙線：ガンマ線エネルギースペクトルの測定—

放射性同位元素総合センター 准教授

戸崎 充男

1. はじめに

夢は抱くものである。好奇心は育むものである。高度12 km の上空でガンマ線のエネルギースペクトルを測定する夢が叶った。前回、前々回と当センターニュース (No.58, 2014、No.59, 2015) に、国際線の航空機内で、 γ 線の線量率と中性子の線量 (線量率) を測定し、放射線計測の基本的な考えと自然放射線の存在する環境を再認識させられた。その測定過程でいろいろ悩み、感じたことを徒然にセンターニュースに綴った。そして結論に、『地上の γ 線スペクトル (バックグラウンド) のパターン (顔) は見慣れている。高度12 km での機内の γ 線はどうなっているのだろう。そこには地上と違う「普通」があるはず。中性子や高エネルギーの陽子が飛行機をバンバン叩いている。機内の環境 γ 線スペクトルを見てみたい。そこにはまだ私の知らない「普通」がある。』と締めくくった。そしてこの夢は叶えられた。今回は、ガンマ線エネルギースペクトルを測定した、その報告である。前回でこの「日本を飛び出し自然放射線探査」は完結と述べたが、意外とこれは果てしなく続くテーマになるかもしれない (好奇心は止められない)。

2. ガンマ線エネルギー測定

γ 線エネルギースペクトル測定を二台の装置で行った。一つは、半導体素子 CdTe をセンサーに用いた放射線検出器 (TA100U *¹、テクノ AP 製、写真1)、もう一台は、シンチレータ CsI(Tl) を用

いた放射線検出器 (C12137*²、浜松ホトニクス製、写真2) である。これらの検出器自体はコンパクト (サイズは携帯電話ぐらい) であり、データ (エネルギースペクトル) の取り込みにはノートパソコンを使用する。機内で乗客として行動 (測定) したが、同乗者の皆様には迷惑にならずに行えた (と思っている)。前者の検出器の結晶は、1 mm 厚で、後者は、20 mm 厚である。実に、この結晶 (センサー) の厚みの違いで、興味深い測定結果が得られた。こ



写真1：半導体式放射線検出器 Mini SPECTRUM METER TA100U (テクノ AP) 半導体：CdTe 10×10×1 mm



写真2：シンチレーション式放射線検出器 C12137 (浜松ホトニクス) シンチレータ：CsI(Tl) 13×13×20 mm, MPPC

の測定結果は意図していたと言いたいが（論文仕立てだと意図していたと言うところだろうが）、実際は、CdTe 検出器の結果に驚き、CsI(Tl) 検出器で確認（比較）測定をしたというのが真実である。したがって、2つの検出器で同時に γ 線のスペクトルを測定したのではなく、同じルート（関西空港－ヘルシンキ空港）であるが、約1か月のずれがある（これにはまた別の理由がある）。

ここで、読者に予防線を張っておく。測定器は何を測っているか、常に注意が必要である。いろいろな放射線場（宇宙線場：様々な線種があり、必ずしもそのエネルギーは一定ではない）の環境で働かせる検出器、例えばガンマ線検出器だからガンマ線だけに反応しているわけではない。特に、数値で結果（評価）を示してしまうような測定器は注意が必要だ。評価（値の導出）が正しく行われたものか、測定者の意図した数値（評価）なのか、ボーとしていると騙される。逆に、故意かどうか知らないが、騙されたままその数値を使って主張（結論）する人がいる。ご注意あれ。

3. 宇宙線のはなし*³

今回の測定環境がどのような放射線場（宇宙線）なのか、改めて述べておく。宇宙起源で地球に降りそそいでくる宇宙線を1次宇宙線、それが大気と反応して生成する大量の粒子を2次宇宙線という。機内空間の状況に焦点を当てると、測定環境は2次宇宙線の間ということになる。

まず、一次宇宙線は、主に（約90%）高エネルギーの陽子で、地球を目がけてやってきて、大気中の酸素、窒素、アルゴンなどの原子核と衝突し核反応を起こす。そこで粒子や放射線の生成・消滅の壮大なドラマが短時間に繰り返される。この過程（カスケード）は「空気シャワー」と呼ばれ、この2次宇宙線の中を我々は飛行しているのである。一次宇宙線の高エネルギーの陽子の多くは約600 MeVで、約10 MeV から GeV のエネルギー分布を持ってい

る。高い方は、 10^{14} MeV まで分布していると言われている。エネルギーが大きすぎてピンとこないが、現在加速器の最大エネルギーが 10^7 MeV くらいしかないことを考えると、宇宙線に注目して研究したくなる理由がわかる。

この1次宇宙線の陽子が起こす大気中の原子核との反応で、散乱、破碎により、中性子、 π 粒子（パイメソン）などが生成される。この生成した π 粒子は、瞬間に、崩壊してしまう。

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu \quad (1)$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (2)$$

電荷を持つ π 粒子（式（1））は、 μ 粒子とニュートリノに壊れ（寿命： 10^{-8} 秒）、また中性の π 粒子（式（2））は2つの光子（ γ 線）に崩壊する（寿命： 10^{-16} 秒）。この生成した μ 粒子が地上に到達し、我々が一番浴びている宇宙線がこの μ 粒子である。地上の 10cm^2 に毎秒1個程度到達し、通常毎秒手のひらに1個などと言われている。この μ 粒子が2次宇宙線の主成分で、最終的に地表付近では、約70%は μ 粒子、残りが電子、陽電子、 γ 線である。また、 μ 粒子の寿命は 2×10^{-6} 秒という短さである。本来、この μ 粒子の寿命では地上まで到達できないが、相対性理論で説明されるように寿命が延びる（我々が観測すると）。この現象は相対性理論の良い例としてしばしば引用される話である。本来、 μ 粒子や中間子、陽電子は、空気シャワーの観測により発見された粒子である。1次宇宙線は、地球大気層（約 1 kg/cm^2 で10 mの水の厚さに相当）によってほぼ遮蔽される（姿を変える）宇宙線で、そのままの姿では地表まで到達できない。地上に来る宇宙線は、この1次宇宙線により発生した2次宇宙線（ μ 粒子、電子、 γ 線）である。

しつこいが、今後の展開（説明）に必要なので、さらに2次宇宙線の「空気シャワー」について話をする。高エネルギーの陽子が起こす反応（1）、

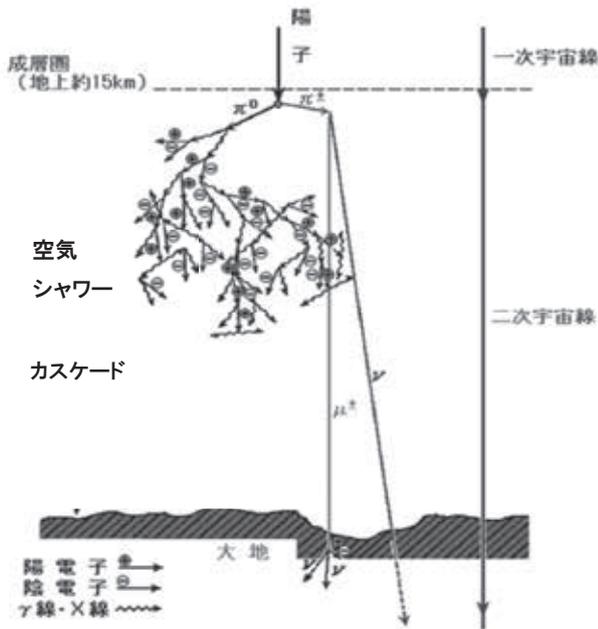


図1：宇宙線 (出典：江藤秀雄ほか、放射線防護、丸善 (1982. 12) p73)

(2)のうち、反応(2)は2本の高エネルギーの光子(γ線)に消滅する。このγ線が高エネルギーのため、電子対(電子・陽電子)生成を起こす。陽電子はさらに消滅γ線を出して姿を消し、そのγ線がさらに電子対生成をし、消滅・生成を繰り返しながらエネルギーを分散していく。陽電子も電子と同様に制動放射を起こす。制動放射と電子対生成の繰り返し、これが空気シャワーと呼ばれる放射線場である。放射線物理の基礎知識がある方は、このプロセスは理解できる話であろうが、不案内の方は、最終的に、このシャワーによって、我々(機体)は、γ線と電子、そして電子陽電子の消滅γ線(511 keV)が飛び交う空間を飛行していると理解していただければよい。この2次宇宙線の状況のイメージを図1に示す。私は2種類の検出器を用いて、この空気シャワーの放射線環境の中で、γ線のエネルギーを測定した。

4. 測定結果

(1) 検出器：シンチレータ CsI(Tl)

シンチレータ CsI(Tl)によるγ線エネルギースペクトルを図2に示す。この図に、高度12 km 上空

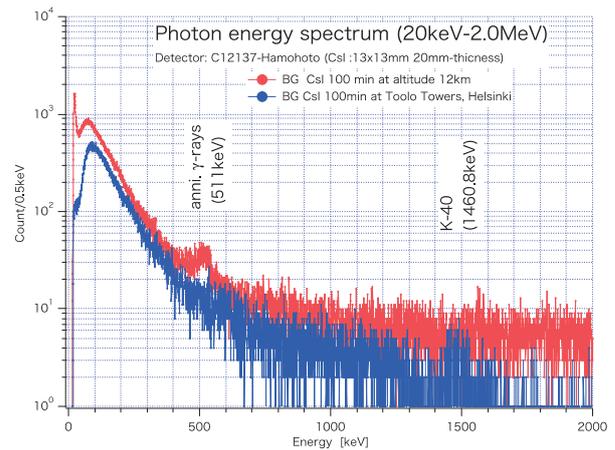


図2：ガンマ線エネルギースペクトル CsI(Tl) 検出器

で測定したデータ(赤)と、比較のために(地上のデータとして)ヘルシンキの宿舎で測定したデータ(青)を合わせて示す。測定時間は共に100分である。

高度12 kmでのスペクトルは、511 keVの消滅γ線のピークがはっきりと確認できる。ところが、地上(宿舎)で測定したスペクトルでは観測されない。つまり、この511 keV γ線は、「空気シャワー」に原因がある。一方、宿舎の測定スペクトルには、K-40(1460 keV)が観測された。このK-40は系列を持たない自然放射性同位体で、地殻や建築資材に含まれ、通常的生活空間で主なバックグラウンドとなる馴染み深い放射線である。また、我々の体に一番多く存在する放射性同位体でもある。図2より、K-40によるγ線は、地上環境中では観測されるが、上空では大気に遮蔽され明確に観測されない。また、同様に、上空の511 keV消滅γ線は地上には届かない。大気の遮蔽が両スペクトルの差になったと考えられる。

この測定器が示す地上と上空での線量率は、地上が0.18 μSv/h、上空が0.31 μSv/hであった。地上(ヘルシンキ)のバックグラウンドは都市(国)が厚い岩盤の上に成り立ち、K-40の影響を強く受けていると考えられる。核廃棄物を岩盤地下数百メートルに建設している埋設施設「オンカロ*4」の話もうなずける。山らしい山などほとんどなく、湖と森の美しい自然の国である。ちなみに、この測

定器を用いても日本（京都）ではK-40の明確なピークは観測できない。もちろん、Ge半導体検出器でのBGとして、日本でもはっきりと観測される。（量の問題である。ヘルシンキのBGは京都の線量率約0.08 $\mu\text{Sv/h}$ の2～3倍の線量がある）

(2) 検出器：半導体 CdTe

半導体 CdTe による γ 線エネルギースペクトルの測定結果を図3に示す。図に高度12 km の測定データを赤で示す。また、比較のために、地上のデータを（フィンランドと京都を青と黒で）示す。どのデータも測定時間は12時間である。ただし、上空の測定時間は、行きと帰りの高度12 km の安定飛行6時間を合わせ12時間のデータとした。

上空のデータ（赤）は、CsI(Tl) 検出器の結果と同様で、511 keV の消滅 γ 線のピークが確認できる。ところが、上空のデータは、500 keV 以上で、約750 keV 辺りにピークを持つ広い分布がある。これは地上のデータ（図3、青、黒）にはなく、さらに、CsI(Tl) 検出器にも観測されていない（図2）。同じ γ 線測定器なのに結果が異なる。

二つの検出器とも、高度12 km の γ 線エネルギースペクトルで、空気シャワーが原因と考えられる消滅 γ 線511 keV を観測することが出来た。しかし、同じ上空で同じ γ 線を測定しているのに、CsI(Tl) と CdTe 検出器は、500 keV 以上のエネルギー分布に差が観測された。この原因を次に考察する。

5. エネルギースペクトルの解釈

実際は、はじめに、CdTe の検出器で高度12 km での γ 線エネルギースペクトルを測定した。普段見られない（予想していなかった）エネルギーの「こぶ」に驚いた。何か想定外のものを測定していないか、いろいろ無い知恵を絞って考えた。そして「高エネルギー電子のエネルギー損失」の考えに辿り着いた。その考えを確認するために、CsI(Tl) 検出器による測定を行い、その確信を得た（とってい

る）。

2 台の測定器によるエネルギー分布の差を説明をしようと思うが、この紀行文調の報告では、専門的になり読者を惑わすだけで終わりそうなので、超簡単に（本筋は外さず）解説したい。

今、機内の我々は、空気シャワーの中にいる。 γ 線測定といいながら、この環境に高エネルギーの電子がウジャウジャいる。もし、この電子が検出器の中に入り込んだらどうなるか？ここで検出器の結晶の厚さが問題になる。この高エネルギーの電子は、どちらの検出器も通過してしまうが、20 mm 厚の CsI(Tl) 結晶では約20 MeV を付与し、一方1 mm 厚の CdTe 結晶には、約800 keV のエネルギー付与をする。結晶を通過する際に、電子は一部のエネルギーを失い（損失）、結晶はそのエネルギーを受け取る（付与）。一応、このあたりの話に興味を持たれる方のために、CdTe に対する電子のエネルギー損失のデータを図4に示す。損失のあり方に、衝突と放射があるが、衝突によるエネルギー損失（細線）に注目すると、電子のエネルギーが MeV から数百 MeV で CdTe 1 mm 厚では、700-900 keV のエネルギー付与となる。

つまり、CdTe の検出器で、高エネルギーの電子の通過時のエネルギー損失を測定したと考えられる。ちょうど分布が、750 keV 辺りのエネルギー損失として、運良く測定できた。CsI(Tl) の検出器だと測

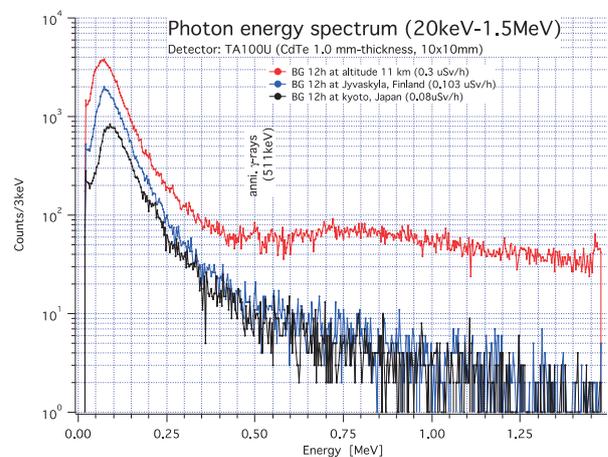


図3：ガンマ線エネルギースペクトル CdTe 検出器

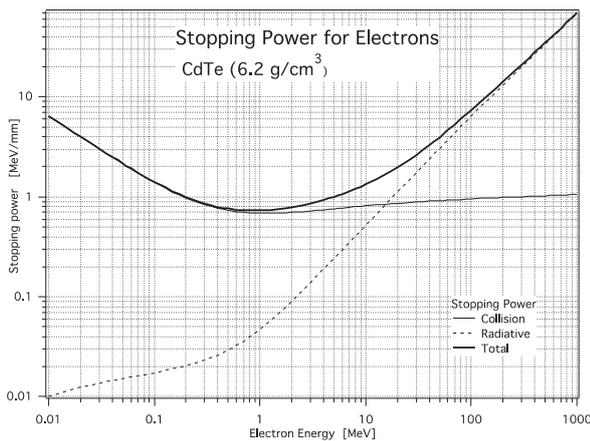


図4：電子に対する CdTe の阻止能*5

定範囲のエネルギー（2 MeV 以下）に取まらない、つまり測定できなかった、ということである。

6. おわりに（ごさでんぱん）

我々（機体）は、2次宇宙線の中を飛行し、いろいろな放射線をあびていることが、これまでの測定器を通じて実感が持てた。すこし特殊な環境ではあるが、飛行内も環境放射線の領域である。それを踏まえると、そろそろ宇宙時代のBG（バックグラウンド）を身近な問題として考える必要があるかもしれない。宇宙を指向するなら、我々は地球の大気に守られていることを忘れてはならない。火星までの往復で、1 Sv の被曝らしい。単純にその7倍以上の距離となると我々人類にとって、生身では旅（生活環境）を拡大出来る範囲ではなくなる。宇宙進出の未来は、放射線プロテクター（スキン）の開発とか、放射線耐性を有する人間に進化（DNA改造？）に道を求めるのだろうか？一言に、BG（バックグラウンドの放射線）と言っても、「どの空間（環境）ですか？」と言う時代が来るのだ。

天気、気候のメカニズムに宇宙線による大気の電離（エアロゾル）が関わっているという話がある（研究が進められている）。振り返ってみると、ウィルソンが放射線の大気に及ぼす影響を研究する中で、霧箱の発見（1896）につながったことを思い出す。いろいろな自然現象が絡み合い、地球気象環境の解

明に宇宙線が関わって来るとは、これもなんと壮大な話へと繋がるではないか。近年の異常気象も宇宙線の影響を無視できないかもしれない。

ところで、本当にこれをもってこのシリーズは完結とする。まだ夢もあり、好奇心も続くが、この先は、もし可能ならもっと高度なアプローチで取り組みたい。この様な散文では済まされない領域を志向したくなった。

謝辞：今回使用したシンチレーション検出器は、大野和子先生（京都医療科学大学）から借用した。ここに感謝致します。

参考文献等

- * 1 : Mini SPECTRUM METER TA100、www.techno-ap.com/seihin_TA100.html
- * 2 : 放射線検出モジュール C12137、www.hamamatsu.com/jp/ja/C12137.html
- * 3 : 宇宙素粒子物理学 クラウス・グルーペン 丸善出版 (2012)
- * 4 : フィンランドの核廃棄物の最終処分場：オンカロ (onkalo: 洞窟) www.posiva.fi/en/final_disposal/onkalo#.V88-ZZiLQII
- * 5 : ESTAR Database, www.nist.gov

宇宙線研究の大家



Victor F. Hess
The Nobel Prize in Physics 1936

1912年、ヘスらは気球に乗って高度と放射線の強さの関係を測定し、宇宙線の存在を実証した。
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/

自己紹介

放射性同位元素総合センター 技術職員
垣下 典永

2016年7月1日付で、京都大学環境安全保健機構放射性同位元素総合センターの技術職員、放射線取扱主任者に就任いたしました。

これまで私は、近畿大学ライフサイエンス研究所（医学部共同研究施設 RI 共同研究室）で34年間、放射線の安全管理業務に携わってきました。また、種々の委員や講師をさせていただきながら、放射線教育にも力を入れてきました。

平成13年からは、こちらの施設の宮武秀男氏らとともに日本アイソトープ協会主任者部会（現放射線安全取扱部会）教育訓練問題検討分科会委員として教育訓練に関する検討会を行い、分科会として毎年ポスター発表や口頭発表を行ってきました。平成16年から平成21年までは、日本アイソトープ協会主任者部会の近畿支部委員として、近畿での放射線教育訓練にも協力しながら、第2種放射線取扱主任者試験問題解答例作成委員もさせていただきました。これらの様々な経験から、放射線教育をさせていただくというより、私自身がこれまで以上に多くのことを学ばせていただきました。

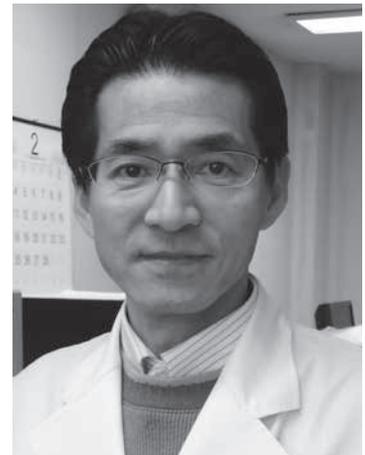
また、日本アイソトープ協会主任者部会実行委員や、日本放射線安全管理学会学術大会実行委員、として大会を行う側の準備や苦勞なども学ばせていただきました。ちなみに、平成22年には、日本アイソトープ協会主任者年次大会では、京都大学放射性同位元素総合センターの川本卓男氏、角山雄一氏、宮武秀男氏らと一緒に大会実行委員をさせていただき、その熱意や技術などを学ばせていただきました。

そのほか、内外の放射線教育訓練にも力を入れ、企業や消防学校、消防署、大学などでの放射線教育

の講師をさせていただいたり、小学校、中学校、高校、一般での放射線教育講師も、文部科学省の委託事業として数多くさせていただき、これまでと違った観点から放射線を見つめることで、より幅広く、またどのようにしたら伝えられるのかといったことを学ばせていただきました。それから、原子力安全技術センターの放射線取扱主任者試験（国家試験）登録資格講習講師や、大阪府放射線災害時における指導・助言協力員もさせていただくなど、より違った角度からの学びもさせていただいております。

放射線の安全管理には様々な形態があり、それらの技術や情報交換はとても有効ですが、そういった面から、全国の医学系の放射線施設管理者で作られている「医学系放射線管理グループ」ネットワークにも参加しており、ネットをはじめとした情報交換や質問・解答などにも力を入れてまいりました。これらのネット環境を通じた情報交換は、特に少ない人数で管理している放射線施設の管理者にとって、放射線の安全管理に非常に有効なものとなっております。

そういった知識や技術、そして諸先輩方の知識や技術を引き継いでゆくことも非常に重要となっておりますが、その必要性から角山雄一氏、宮武秀男氏らの呼びかけで作られた「放射線取扱施設にお



ける放射線安全管理技術の継承分科会」にも参加し、多くの技術を蓄積し、継承するという取り組みにも挑戦しております。

そのほか、趣味として様々なボランティア活動をしており、天文・科学分野として、星や宇宙のお話と天体観測会を行ったり、楽しい科学実験や発電について楽しく学ぶ体験教室などを行っております。文化、芸術分野では、和太鼓や伝統文化を紹介したり、イベントを陰で支えるホールでの裏方ボランティアをはじめ、楽しい絵手紙教室として一般の方々や、老人福祉施設などで体験していただくことなども行っております。また、地域での産業や活性

化のイベント支援等にも挑戦しております。様々なことを行うことは、もちろん大変ですが、より違う観点からの学びやコミュニケーション、ネットワークも生まれ、多くのことに参加することは非常に多くの学びを生み出すと実感している次第です。

そういったことが生かせるかどうか解りませんが、京都大学放射性同位元素総合センターをはじめ、京都大学、そして地域に貢献できればと思っております。

とはいえ、まだまだ未熟でございますので、どうぞ皆様のご指導をよろしくお願いいたします。

