



Radioisotope

# ニュース

No.64 2020

## 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 京大医学研究科での22年間の放射線安全管理をふりかえる

医学研究科 遺伝医学講座放射線遺伝学 教授  
武田 俊一

6 / 研究紹介 昆虫のキチン合成阻害剤の構造活性相関および分子レベルにおける作用機構  
～ RI センター共同利用40年を振り返って～

農学研究科 応用生命科学専攻生物調節化学分野  
中川 好秋

13 / 福島レポート2020「事故から間もなく10年・富岡町、そしてLNTへの挑戦は続く」

放射性同位元素総合センター 助教  
角山 雄一

20 / コラム 放射線で光る GM カウンター

放射性同位元素総合センター 准教授  
戸崎 充男

23 / センターだより RI センターにおけるコロナ対応について

放射性同位元素総合センター  
施設長 高木 郁二  
本館主任者 戸崎 充男  
分館主任者 角山 雄一

25 / センターだより 放射性同位元素等取扱施設安全管理担当教職員研修

放射性同位元素総合センター 教授  
川本 卓男

27 / センターだより『レンタサーベイはじめました』

30 / センターの活動

34 / 記録・人事等

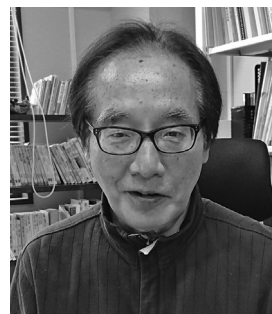
# 京大医学研究科での22年間の放射線安全管理をふりかえる

医学研究科 遺伝医学講座放射線遺伝学 教授

武田 俊一

## はじめに

私は、1980年に阪大医を卒業し、1981年から本庶佑先生の研究室（ノーベル賞を2018年受賞、1980年に阪大医・教授に着任）で分子生物学を学び始めました。1988年から8年間のスイス留学の後に1998年に医学研究科の教授職を拝命し、2021年3月に定年になります。放射線安全管理に従事する教員の方の参考の為に、私の院生時代からの放射線安全管理について記述します。放射線安全の考え方は各国や時代によって大きく異なり、我が国では国際的に最も厳格な放射線安全性が要求されています。私の意見は、大学の研究の場では、この厳格な放射線安全管理をやめるべきだと思います。



## 日本の研究所の放射線安全管理は外国に比べ非常に厳しい

1980年ぐらいから分子生物学実験が登場しました。DNA 塩基配列の決定の為に溶液中の DNA の<sup>32</sup>P ラベルが必須だったことから、非密封 RI 実験が盛んにされ始めました。1980年代前半は放射線安全管理がそれほど厳しくなく、液体シンチレーションカウンターが放射線管理区域外に設置されていました。1980年代後半から安全管理が厳しくなり、RI 実験は管理区域内でしかできなくなりました。スイスでは米国と同様に、RI 実験は非 RI 実験と同じ部屋で（ただし限られた区域において）実施できました。すなわち欧米の研究室では RI 実験室を陰圧にしたり RI 排水を別系統で処理するコストをかけていません。欧米は、このように RI 実験の規制が大変緩いのと対比的に、動物実験の規制が日本よりはるかに厳しくそして1988年-1995年のスイス留学中にも動物実験に必要な書類の種類が増えていきました。留学生活から、何を怖いかと感ずるか、それから倫理の中身は、国によって大きく違うと感じました。欧米では、放射線やウイルスに対する安心安全は個人が判断する課題であるという考えが日本より優勢です。

国によって大きく違う例として、英国では大学の動物実験のガイダンスにおいて動物実験中に過激派に襲われた時の逃げ方を教えるなど、日本で想像がつかないような、生命倫理に対する原理主義の考えを持った過激派がいます。それから欧米では、政府の命令（例、戸外ではマスクをつけなさい）に公然と反抗する人が少なからずいます。本学出身の UCLA の教員によれば、2020年末に毎日ロサンゼルス郡だけで15,000人ほど COVID-19新規感染者が出ているのにクリスマスパーティーに参加する人が多いようです。以上の例のように、国によって安心安全や倫理が大きく異なることをふまえて、私の考えでは、日本の課題は欧米と比

較して非常に厳しい RI 管理によって研究において税金の無駄遣いが生じることでしょう。

日本と欧米のこれらの違いは、どちらが優れているという問題ではありません。そうではなく、国際的に比較して非常に厳しい RI 管理（厳しさを多分世界 No1）は研究費の無駄遣いかも、という利益の問題です。「コストがどんなにかかっても安心安全を優先すべき」と国民が判断すれば、研究者がその判断に従うのは当然です。最後の章に書くように、日本の研究力の相対的低下が止まらない現在にあって、国民に実質的な利益をもたらさない超高コストの RI 管理が日本を経済的にじわじわと貧しくすることを国民が将来に理解くださることを期待しています。「日本の研究力の相対的低下」は、最後の章で再度触れます。

### 放射線安全管理の無駄と管理の効率化への努力

私が帰国した1995年は、「無駄遣い」が許された時代でした。日本の GDP が米国の GDP の 6 割に迫り（現在は1/4弱）、日本は基礎医学研究でも大変勢いがありました。1990年代は *Nature* 誌に掲載される日本のグループの論文の数が現在に比べ 10倍近く多かったです。研究費が潤沢で、医学部キャンパスには、1998年に非密封 RI 実験を行える施設が、京大 RI 総合センター本館の他に、医学部 B 棟 RI 実験施設、医学部 D 棟 RI 実験施設と合計 3 つもあり、さらに先端棟に RI 実験施設が2002年に新設されました。当時の日本は、潤沢さ故に、高価な施設（RI 実験施設のこと）の重複という、学者によるルーズな経営管理が許された「ルーズ」の当事者として反省しています。

次にこの20年間で実施された、「ルーズ」への対策（高価な施設の重複の廃止のこと）を次に説明します。五十棲泰人名誉教授が京大 RI 総合センターに教授として着任する前は、私の個人的意見ですが、センターは厳格な放射線安全管理を大義名分にルーズな経営がなされていました。具体的には、本部から潤沢に予算を支給されたセンターが厳格な放射線安全管理のために月曜—金曜の 9—18時のみ利用可であった一方で、お隣の医学部 RI 実験施設は24時間営業でセンターの10倍以上の RI 利用実績がありかつ重大事故なしで経営されていました。五十棲さんが京大 RI 総合センター長をされていた時代から、「多くの利用者あつてのセンター」という方向に経営方針が変わりました。それから蛍光ラベルの手法が発展し、医学・生物研究に RI ラベルが不要になってきました。それらの結果、私は、医学部で管理する RI 実験施設を全部、非 RI 実験室へ転換できました。従来、転換に伴う RI 除染作業はどの大学も業者任せでした。この業者任せを改め、B 棟 RI 実験施設（1462.8 m<sup>2</sup>）の RI 除染作業（2006年）では、五十棲教授と宮武秀男技術職員（当時、京大 RI 総合センター）の指導のもとに、川本卓男准教授（当時、放射線遺伝学に所属し、現在、京大 RI 総合センター・教授）が実験者とともに除染作業をしました。その結果、業者の見積もりでは3,200万円の除染作業を600万円に抑制できました。私は、医学部分子棟 RI 実験施設、旧胸部研究所 RI 施設、旧産科病棟 RI 施設のそれぞれの非 RI 実験室への転換にも関与しました。これらの RI 除染作業の費用が抑制できているのは、宮武さんのおかげです。2021年以降はすべての医学研究科の研究者が、京大 RI 総合センターで RI 実験をするようになります。

## 放射線被曝の健康リスクを経済的観点から合理的に評価する必要性

私が教授職を拝命してからの大事件は、2011年の福島原発事故と2016年の京大病院旧産科病棟 RI 施設の火事です。まず前者について書きます。私は、医学生には、日本の放射線管理の法令は原発事故を想定して設計されていないと教えてきました。日本の法令は、社会のごく一部の人（例、研究で RI 実験する人）の RI 実験を規制するにはその厳しさは一定の合理性があるかもしれません（最後の章で議論します）。しかし地域の全員が被曝する恐れがある場合に、被曝の当事者が長期避難するか否かの決断は当事者の意見がもっと尊重されるべきであり、日本の法令に従い、10年間合計200ミリシーベルトの被曝が原因で無理やり避難させて良いか大変疑問です。被曝リスクは、原爆被爆者の研究から、200ミリシーベルトの被曝が1%一生涯の発癌率を増加することが分かっています。それから2/3の日本人が癌に1回は罹患します。以上を考えると、1%増加程度のリスクと向き合ってどんな人生を歩むかは、公的機関が決めて良い決定項目では決してなく個々人に決定権があるように思います。

原発事故は、その被害者だけでなく、事故対応の責任者も大変苦勞されました。「日本の放射線管理の法令は厳しすぎる」と述べた放射線生物学者は、マスコミに東京電力の回し者扱いされ気の毒でした。それから法令に従い1%のリスクに対して各住民に対応しなければならない、現場の公務員の方も大変な苦勞をされたことと思います。医学生に授業で「発癌がどれほど増えたら現職や住居を諦めて遠隔地への避難を承諾するか」を尋ねると、一生涯の発癌率が20%-2倍増えるようであれば避難も考えると多くの学生は答えます。そして日本の法令が1%の増加で強制避難をさせると教えると、医学生は大変驚きます。京大生は、リスクへの対応法を自分で決断し、対応法の選択を他人や公的機関にお任せする人は少数派と思います。京大は、社会のリーダーとして、社会が安心安全の利益のみならずそのコストも考慮するような方向にもっていくべきというのが私の意見です。そして京大の卒業生は、社会を批判する側ではなく、社会のエリートとして批判される立場の職について、安心安全という利益とそのコストという不利益のバランスをとって頂きたいです。

## 各部局の放射線管理者は火事に対応できない

次に2016年の旧産科病棟 RI 施設の火事について書きます。火事は金曜夕方に発生しました。発生があと1時間遅れていたなら、京大 RI 総合センターの職員がすぐに駆けつけてくれることはなく消火作業に遅れが出ました。消防士は自分が放射能汚染することを気にするので、放射能測定器を持参して火事の現場に駆けつける必要があることを、私は火事の現場で初めて知りました。この火災事故がこれまでの RI 事故と全く異なる点は、火事がネットで放映されたことと、周辺の住民の方から RI 漏洩に関して強い懸念が示されたことです。これまでの RI 事故では、文部科学省（現在の原子力規制庁）への対応だけ考えていればよかったのが、ネットでの放映の結果、地域住民の皆さんへの対応を新たに考える必要が生じました。京大病院の対応は見事で、翌日土曜の午前中には RI 施設の、火事で破損した窓を全部塞ぎ、地域住民の皆さんにも火事による健康リスクは事実上ゼロであることを納得して頂きました。ただし、このような見事な対応は病院だからできたものであり、私のような学者には無理だったというのが、火災事故に対する私の総括です。原

子力規制庁との交渉では、原子力が専門の高木郁二先生（現在、京大 RI 総合センター長）にお世話になりました。

稲垣暢也病院長（当時）は、この事故を契機に、旧産科病棟 RI 施設の廃止を決断しそれを非 RI の実験室に転換しました。旧産科病棟 RI 施設のユーザー（主に医師）は、京大 RI 総合センターにおいて RI 実験を始める時に、当初、大きな実験スペースを要求していました。ところが、高木センター長が医師のユーザーに対しセンターは米国式にベンチフィー（実験台 1 面年数万円、格安！）を徴収すると説明されると、ユーザーは全員、占有スペースは実験台 1 面で十分と答えました。ベンチフィーや少しの不便（深夜や週末の実験は原則不可）を考慮しても、京大病院は年 2,000 万円の研究費（放射線安全管理を業者に委託する費用 + 窓口の事務員の人件費 + 光熱水道費）を節約できました。

### 国際的な比較において日本の研究力は低下し続けている

最後に「日本の研究力の相対的低下」をもう一度書きます。低下の内容ですが、まず 1980 年 - 2000 年とそれ以降では大学の雰囲気違います。2000 年までは、学生は研究者としてのキャリアに楽観的で、東大や京大の理学部の卒業生は半数が博士課程に進学しました。ところが現在は進学する卒業生は 20% を切っても質が低下しているのではないのでしょうか。DNA の  $^{32}\text{P}$  ラベルによって DNA の塩基配列を決定していた時代には、日本人の丁寧な実験が日本の研究力に大きな優位性を与えていました。ところが塩基配列決定が自動化されると、この優位性は無くなりました。同様に、日本人の丁寧な仕事ぶりが活かせないという理由から、自動車の電動化はこの産業を凋落させるでしょう。じわじわ貧乏になると「貧すれば鈍する」の喩え通り、研究力低下は悪循環に陥らないとも限りません。国の経済力が低下すると、最初に被害を受けるのは母子家庭であり、子供の数はますます減ります。私の意見では「1% 増加程度のリスク」にどう対応するかは個人が 100% 決めるべき案件です。それだけでなく、経済力の低下した国が安心・安全を丸抱えで責任を取れる時代は終わったでしょう。

以上、私が経験した放射線安全管理を書きました。安全管理についての考え方は、時代や国によって大きく異なることをご理解頂き、京大はより合理的な安全管理を国内に樹立するためにこれからもリーダーシップをとっていただきたいという希望を述べてこの原稿を終えます。

# 昆虫のキチン合成阻害剤の構造活性相関および 分子レベルにおける作用機構 ～ RI センター共同利用40年を振り返って～

農学研究科 応用生命科学専攻生物調節化学分野  
中川 好秋

## はじめに

京都大学の大学院修士課程にお世話になったのが1979年で、その翌年から今日までRIセンターを利用させていただいているので、共同利用者として40年になります。毎年、共同利用申請をしていますが、その申込書に新規教育訓練を受けた日を記載する欄がありますが、毎回、1980年5月22日と記入してきました。1990-92にかけて2年間アメリカのUC Davisに留学していましたが、そこでもRIを使って、本研究に関連した実験をしていました。大学院時代の研究テーマが昆虫のキチン生合成阻害剤に関するもので、修士論文の題目は『ニカメイチュウ (*Chilo suppressalis*) 皮膚組織培養系における昆虫成育阻害物質のクチクル形成阻害活性』でした。修士過程の間はRI実験を行っていませんでしたが、博士課程から渡米するまでの助手時代は、ほとんどRIセンターで実験を行ってました。帰国後も別のテーマでRIを利用することになり、RIセンターにはずっとお世話になっています。歴史は繰り返すとよく言いますが、私の研究生活も同じで、退職間際になって（数年前から）、中断していたキチン合成阻害剤の作用機構研究を再開することにしました。現在は、ここで紹介するキチン合成阻害剤に関する研究以外に、昆虫脱皮ホルモン、昆虫幼若ホルモン、サソリ毒、植物ホルモンの構造活性相関や分子設計に関する研究を行っています。今からちよ

うど20年前のRIニュースNo.44（2000年）では、『脱皮ホルモン類縁体の標識化合物を用いた活性評価系および構造活性相関』というタイトルで研究紹介をさせていただきました。本稿は、(故)栗原紀夫先生から執筆を依頼されて1993年に*RADIOISOTOPES*第42巻に執筆させていただいたミニレビュー『キチン生合成に影響をおよぼす化合物の生物検定系』の続きとと考えてください。現在は、修士2回生の森湖太郎君が計算化学的な手法を取り入れて作用点解明に向けての研究に取り組んでいます。

昆虫はキチンを主成分とした強固で伸縮性に乏しい表皮を外骨格としてもっているために、昆虫が成長していくためには古い殻を脱ぎ捨てると同時に新しい皮膚を作る必要があります。すなわち、昆虫をはじめとする節足動物は脱皮を繰り返すことによって成長が可能となります。昆虫によっては、卵からふ化して成体になるまでに体重が数千倍から数万倍にもなると言われています。特に幼虫期における成長は著しく、数回の脱皮を繰り返し、そのつど短時間の間に表皮の主成分であるキチンを大量に合成しなければなりません。したがって、昆虫にとっては、キチン生合成の阻害は致命的となります。一方、われわれ哺乳類にはキチン生合成能が備わっていないことから、キチン合成阻害剤は安全性の高い殺虫剤になると考えられてきました。

1972年にオランダの Philips-Duphar 社（当時）の研究者が、除草剤の開発中、D U19111（図1）処理区において、脱皮不全で死に至る昆虫がいることを見つけ（van Daalen *et al.*）、その後の構造活性相関研究によって、diflubenzuron（図1）が殺虫剤として実用化されました（Wellinga *et al.*）。DU19111や diflubenzuron はベンゾイルフェニルウレア（BPU）と総称され、作用機構研究によってキチン合成阻害剤であることが明らかにされました（Post & Vincent）。しかし、BPU類は菌類のキチン合成を阻害することはなく、その阻害機構は明らかにされてきませんでした。すなわち、抗菌剤として知られているポリオキシシンやニッコウマイシンは昆虫や微生物から調製したキチン合成酵素（Chitin synthase; CHS）を拮抗的に阻害しますが、BPU類は酵素系においては阻害作用を示しません。このように、BPU類の活性は無細胞系において消失してしまうことで、作用機構研究に関わっていた多くの研究者（筆者を含む）は手を引くことになりました。

ところが、2012年に殺ダニ剤 etoxazole 抵抗性のマダニ *Tetranychus urticae* の CHS1の1017番目のアミノ酸残基 Ile (I) が Met (M) に変異していること（Van Leeuwen *et al.*）、2016年には BPU 抵抗性コナガ (*Plutella xylostella*) の CHS1においても同じような変異 (Ile → Phe あるいは Met) が確認されました（Douris *et al.*）。（図2）。さらに、2017年には BPU 抵抗性ミカンキイロアザミウマにおいても CHS1に Ile から Met への変異が確認されました（Suzuki *et al.*）。これらの結果、BPU類や etoxazole の標的は CHS1であることが明確となりましたが、阻害部位は依然として明らかになっておりません。

現在、われわれの研究グループでは、標的部位を

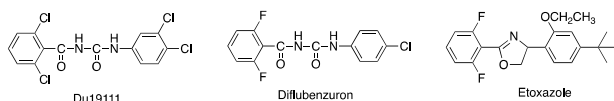


図1. 昆虫のキチン合成阻害剤の化学構造式

```

Px-S      -IIYLLSIPSMYLLLILYSTIN-
Px-R1     -IIYLLSMPSMYLLLILYSTIN-
Px-R2     -IIYLLSEPSMYLLLILYSTIN-
Tu-S      -LLYFLSIPCMYLLMIYSLVN-
Tu-R      -LLYFLSEPCMYLLMIYSLVN-
Fo-S      -IIYLMaipSMYLLLILYSIIN-
Fo-R      -IIYLMAMPsMYLLLILYSIIN-
Cs-S      -IIYLLSIPSMYLLLILYSIIN-
    
```

図2. CHS1の配列の一部。Px: コナガ (*Plutella xylostella*)、Tu: マダニ (*Tetranychus urticae*)、Fo: ミナミキイロアザミウマ (*Frankliniella occidentalis*)、Cs: ニカメイチュウ (*Chilo suppressalis*)；R: 抵抗性種、S: 感受性種

明らかにするために、コンピュータ化学を利用しています。すなわち、タンパク質モデリングの手法を用いて CHS1の立体構造を予測し、これまでに蓄積してきた構造活性相関の結果を取り込んで、標的部位を探索しています。タンパク質モデリングには梅山博士らのグループによって開発された FAMS (Full Automated Modelling System) というソフト (Ogata & Umeyama) を使わせていただいています。このソフトウェアの特徴は、一次配列を入力すると PDB のデータベースから自動的に類似の配列を探し出し、それを鋳型にして立体構造を構築してくれるユーザーフレンドリーなところにあります。FAMSにコナガの CHS1の配列 (1567残基) を入力したところ、紅色細菌 *Rhodobacter sphaeroides* のセルロース合成酵素 (PDB: 4HG6; 図3) (Morgan *et al.*) がヒットし、それを鋳型にして CHS1の3次元構造を構築することができました。われわれの研究室では、キチン合成阻害活性の評価にニカメイチュウの表皮を用いていることから、CHS1のモデルの構築にはニカメイチュウの CHS1 (CsCHS1) の

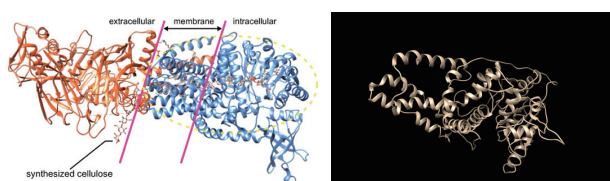


図3. セルロース合成酵素の結晶構造 (左) とそれをもとにモデリングの手法を用いて構築したニカメイチュウの CHS1 (CsCH1) の立体構造

一次配列を用いる必要がありました、CsCHS1の配列をインターネット検索したところ、中国においてニカメイチュウのゲノム解析が行われていて、CsCHS1の一次配列（1564残基）が分かりました。BPU 抵抗性種の CHS1においてアミノ酸に変異が認められた1017番目のアミノ酸残基の前後の配列と CsCHS1の配列を比べると図2に示すようになり、他の昆虫、ダニの CHS1とよく似ていることがわかりました。

図3に示されるように、セルロース合成酵素においては、細胞内で合成されたセルロースが膜外へ輸送されていることが分かります。筆者らのグループは、このセルロースの合成と輸送のメカニズムがキチン合成と輸送においても類似していると考えました。ここで問題となるのが、BPU 抵抗性種の CHS1のアミノ酸の変異 (Ile → Met/Phe) であります。この1017番目残基は、膜貫通酵素 CHS1の膜の外側に近いところに位置しています。現時点では、CHS1の1017番目の残基がキチン合成とどのような関係にあるかは分かりませんが、Ile が Met あるいは Phe に変異することによって BPU のキチン合成阻害作用が消失することは事実であります。このような背景のもと、われわれは、セルロース合成阻害剤がキチン合成阻害剤にもなり得るのではないかと考え、除草剤として知られているイソキサベン（図4）に着目しました。

BPU 類発見の後、チアジアゾール (TD) 骨格を持った LY131215に BPU 類と同様の活性が見いだされ、筆者らがその構造活性相関研究を行っていたことから、この化学構造にも着目し、両者を合わせた3-フェニルイソキサゾール (IOX) 類を合成する

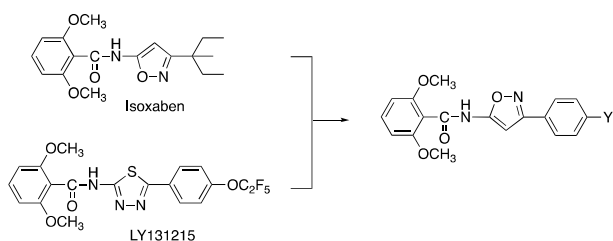


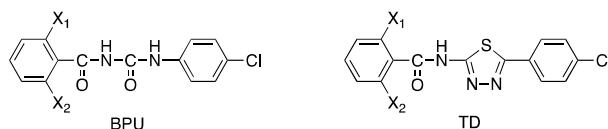
図4. イソキサベンの化学構造と新規化合物の設計

ことにしました。LY131215の右側（フェニル部）のベンゼン環の置換基は、diflubenzuron や etoxazole のそれ (2,6-F<sub>2</sub>) とは違って、2,6-(OCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>であります。そこで、筆者らは TD 類の置換基効果に興味を持って TD 類の置換誘導体の合成を行い、殺虫活性と培養表皮系における活性を定量的に求めました (Nakagawa *et al.*, 1996)。殺虫活性としては、ニカメイチュウに対する半数致死薬量 LD<sub>50</sub> (mmol/insect) を求めて、その逆対数値である pLD<sub>50</sub>を活性の指標としました。また、ニカメイチュウ培養表皮系を用いてキチン合成阻害活性と表皮形成阻害活性を求めました。キチン合成阻害活性とは、培養表皮への *N*-acetyl-[<sup>14</sup>C]-D-glucosamine ([<sup>14</sup>C]NAG) の取り込みをコントロールの50% 阻害する濃度 IC<sub>50</sub> (M) の逆対数値 (pIC<sub>50</sub>) です。表皮形成阻害活性というのは、顕微鏡で新表皮の厚みを測定するという方法で求めた活性で、表皮の厚みをコントロールの50% 抑制する濃度 IC<sub>50</sub> (M) の逆対数値 (pIC<sub>50</sub>) です。キチン合成阻害活性と表皮形成阻害活性は類似の活性と考えていますが、表皮形成阻害活性の測定では、顕微鏡を覗いて、厚み (0 から数 μm の間) を測定するというかなり煩雑で原始的な方法であったことから、pIC<sub>50</sub>値の精度にはやや問題があったかもしれません。また、疎水性の高い BPU 類を用いた場合、新表皮の形成阻害が明瞭に観察できず、表皮形成阻害活性 pIC<sub>50</sub>値を求めることができないということもあり、定量性にやや問題があったかもしれません。

左側ベンゼン環（ベンゾイル部）の置換基を種々変化させた BPU 類と TD 類のキチン合成 / 表皮形成阻害活性および殺虫活性は表1に示したとおりです。殺虫活性という個体レベルにおける活性評価系では、投与した化合物によっては、体内で代謝分解されて標的部位に達することができず活性が得られないことがあります。そこで代謝阻害剤を併用して活性を測定することが行われます。本研究でも、酸化代謝阻害剤 piperonyl butoxide (PB) を併用し



表1. ベンゾイル部に様々な置換基をもった BPU 類と TD 類の活性 (PB 併用下)



No.	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	キチン合成 / 表皮形成阻害活性 <sup>a)</sup>		殺虫活性 <sup>a)</sup>	
			pIC <sub>50</sub> (M)		pLD <sub>50</sub> (mmol/insect)	
			BPU	TD	BPU	TD
1	H	H	-, < 5.60 <sup>b)</sup> (0%)	<5.30 (0%)	<5.60 (0%)	<5.60 (0%)
2	F	F	7.69, 7.95 <sup>b)</sup>	<5.30 (42%)	6.64	<4.60 (0%)
3	Cl	Cl	7.16, 6.50 <sup>b)</sup>	6.42	5.69	<5.00 (5%)
4	CH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub>	6.99, 6.05 <sup>b)</sup>	7.16	5.20	5.48
5	OCH <sub>3</sub>	OCH <sub>3</sub>	7.22, 7.04 <sup>b)</sup>	7.23	5.79	5.96
6	F	H	6.82, 6.52 <sup>b)</sup>	6.14	<5.30 (0%)	<4.60 (0%)
7	Cl	H	-, 7.55 <sup>b)</sup>	< 5.30 (37%)	6.01	< 4.60 (41%)
8	NO <sub>2</sub>	H	-, 6.45 <sup>b)</sup>	< 5.30 (0%)	4.99	< 4.60 (0%)
9	CH <sub>3</sub>	H	7.45, 6.87 <sup>b)</sup>	6.80	5.88	<4.60 (0%)
10	OCH <sub>3</sub>	H	6.07, <6.00 <sup>b)</sup>	7.27	<5.30 (5%)	5.96

<sup>a)</sup> 括弧内の % は最大濃度 (薬量) での阻害率および致死率を表す。<sup>b)</sup> 表皮形成阻害活性

て活性を測定しました。しかし、PB 併用下であっても、TD 類においては、基礎活性が低いためか、殺虫活性が得られた化合物は少なく、置換基効果を定量的に解析することができませんでした。培養表皮系においても、化合物の中には酸化代謝を顕著に受ける置換体があったことから、PB を併用して活性を求めました。

表1から明らかなように BPU 類では2,6-F<sub>2</sub>体が高い活性を示しましたが、TD 類の2,6-F<sub>2</sub>体は *in vitro*, *in vivo* (殺虫) とともに活性を示しませんでした。2,6-(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>体や2,6-(OCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>体などのように電子供与性基で置換された TD 類は、相当する BPU 類よりも若干高い活性を示しました。さらに BPU 類では活性が認められなかった2-OCH<sub>3</sub>体に関しては、TD 類で高い活性が認められるという興味深い結果が得られています。2-Cl 体や2-NO<sub>2</sub>体などのようにオルト位に電子求引性基をもった BPU 類は高い活性を示しましたが、TD 類では *in vitro*, *in vivo* とともに活性を示しませんでした。また、BPU 類、TD 類どちらにおいても殺虫活性が認められなかった2-F 体が、培養表皮系において比較的高い活性を示

したことは興味深い結果でありました。

定量的に活性値が得られたことから、定量的構造活性相関 (Quantitative structure-activity relationship: QSAR) の手法を用いて、ベンゼン環上の置換基の効果を定量的に解析しました。表皮形成阻害活性におよぼす BPU 類のベンゾイル部 (左側ベンゼン環) の置換基効果の QSAR 解析を行ったところ式 (1) が誘導されました。

$$pI_{50}(\text{PB}) = 0.43 \sigma^{\#} + 0.85 \Sigma E_s^{\circ} + 7.83 \quad (1)$$

$$n = 21 \quad s = 0.279 \quad r = 0.892$$

式 (1) および以下の式において、 $\sigma^{\#}$  は電子求引性を表すパラメーター、 $E_s$  は立体パラメーターです。n は解析に用いた化合物の数、s は標準偏差、r は相関係数であります。各パラメーターは t 検定において95%以上の有意性を持っています。式 (1) から明らかなように、ベンゾイル部の置換基としては、電子求引性置換基の好ましいことが示されました。ここで、電子求引性パラメーターとして  $\sigma^{\#}$  が用いられていますが、これは、オルトモノ置換体に

対しては通常の電子パラメーター  $\sigma$  を、オルトジ置換に対して共鳴効果を考慮しない  $\sigma_I$  を用いていることを示しています。ジオルト置換体ではアミド平面に対してベンゼン環が垂直になるため、ベンゼンとアミド結合の間の共鳴がなくなり、共鳴効果による電子求引性効果がなくなると考えられるからです。ベンゾイル部に関しては、オルト位以外に置換基を導入すると活性が著しく低下し、活性値を求めることができませんでした。オルト置換基に関しても大きな置換基を導入することができず、さらなる QSAR 解析は行いませんでした。TD 類のベンゾイル部（左側ベンゼン環）の置換基効果に関しても、QSAR 解析を行うに十分な活性値 ( $pIC_{50}$ ) を得ることができず、QSAR 式を誘導できませんでした。

次に、フェニル部（右側ベンゼン環）に様々な置換基 (Y) もつ化合物を合成し、キチン合成阻害活性を求めました (表2)。ベンゾイル部（左側のベンゼン環）における置換基 (X) の効果とは異なり、置換基 (Y) の効果はBPU類とTD類の間で似通っていました。そこで、置換基効果をさらに詳細に調べるために、QSAR 解析を行いました。その結果は以下の式 (2) から (5) で表されます。す

で述べましたが、培養表皮系においても、酸化代謝阻害剤 PB の効果が顕著に表れる化合物があったことから、PB の効果を定量的に検討することにしました。その結果、表2に示したように。電子求引性基 (F, Cl, NO<sub>2</sub>, CN) で置換された化合物ではほとんど活性に変動はありませんが、無置換体や電子供与性置換基 (CH<sub>3</sub>, OCH<sub>3</sub>, OEt) をもった化合物では、PB を併用することによって活性が10倍程度上昇することがわかりました。

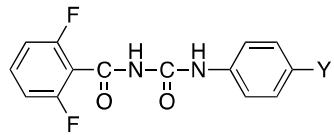
BPU 類について PB を併用しないで求めた活性  $pIC_{50}(\text{none})$ 、PB 併用下でもとめた活性  $pIC_{50}(\text{PB})$  について QSAR 解析を行った結果を式 (2) から (5) に示します。

$$pIC_{50}(\text{none}) = 1.28 \pi - 0.28 \pi^2 + 2.13 \sigma_I + 5.69 \quad (2)$$

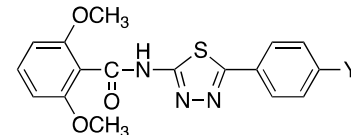
$$n = 15 \quad s = 0.375 \quad r = 0.916$$

式 (2) および以下の式において、 $\pi$  は置換基の疎水性を表すパラメーター。 $\sigma_I$  は誘起的電子求引性を表すパラメーターであります。n は解析に用いた化合物の数、s は標準偏差、r は相関係数であります。各パラメーターは t 検定において95%以上の有

表2. フェニル部に様々な置換基 (Y) をもった BPU 類および TD 類の活性



BPU



TD

		キチン合成阻害活性 $pIC_{50}$ (M)					
		BPU			TD		
No.	Y	none	PB	$\Delta^a$	none	PB	$\Delta^a$
1	H	5.19	6.79	1.60	5.53	6.55	1.02
2	F	7.51	7.80	0.29	7.01	7.05	0.04
3	Cl	7.69	7.72	0.03	7.27	7.23	-0.04
4	NO <sub>2</sub>	7.06	7.07	0.01	6.45	6.57	0.12
5	CN	7.28	7.27	-0.01	6.68	6.70	0.02
6	CH <sub>3</sub>	6.48	7.86	1.38	5.91	7.07	1.16
7	OCH <sub>3</sub>	6.04	7.28	1.24	5.65	6.78	1.13
8	OEt	6.53	7.62	1.09	6.19	7.02	0.83

a) PB による共力効果 ( $pIC_{50}(\text{PB}) - pIC_{50}(\text{none})$ )、 $\Delta = 1$ は10倍活性が上昇することを表している

意性を持っています。 $\pi$  (疎水性) に関しては二乗項の係数が負であることから、 $\pi$  に関してパラボラの関係となり、疎水性に関しては最適値のあることがわかります。PB 併用下で求めた活性  $pIC_{50}(PB)$  に対する QSAR 結果は式 (3) で表されます。

$$pI_{50}(PB) = 1.49 \pi - 0.57 \pi^2 - 0.59 \sigma + 7.19 \quad (3)$$

$$n = 15 \quad s = 0.267 \quad r = 0.916$$

式 (2) と (3) を比較すると明らかのように、電子的パラメーターの種類に若干の違いはありますが、係数が + から - に変化していることがわかります。すなわち、PB を併用しないで求めた活性  $pIC_{50}(\text{none})$  の QSAR 式 (2) において、電子的パラメーター  $\sigma$  の係数が大きくなった理由は、電子求引基の導入によって化合物の酸化代謝が抑制されたことを意味しています。PB を用いて酸化代謝分解を抑えたことにより、化合物の作用点レベルでの相互作用に近づいたと考えられます。すなわち、作用部位での相互作用では電子供与性基が好ましいと考えました (Nakagawa *et al.*)。

また、TD 類の右側ベンゼン環の置換基効果の QSAR 解析を行ったところ、PB を併用しなかった場合には、式 (4) が得られ、この結果は式 (2) の結果に似通ったもので、BPU 類のフェニル側置換基の電子効果に近いものでありました。しかし、PB 併用下で求めた活性  $pIC_{50}(PB)$  の解析では、式 (3) とは若干異なる式 (5) が得られました。すなわち、TD 類においても BPU 類と同様に、PB を併用すると電子的パラメーターの係数は 2.925 から 0.899 へと大きく低下しますが、BPU 類の場合とは異なり、TD 類では依然として係数は正で、電子求引性基が有効でありました。TD 類では酸化代謝を抑制しても、依然として電子求引性置換基が好ましいことがわかります。現時点では明確なことは言えませんが、キチン合成酵素と阻害剤との間の相互作用における静電効果に影響を与えていると考えてい

ます。さらに、式 (5) においては  $\Delta V_w$  が有意なパラメーターとなっていて、これも作用点での立体相互作用に関わるものと考えています。 $V_w$  は置換基のファンデルワールス体積を表す立体パラメーターで、 $\Delta$  は水素の大きさを差し引いたものです。すなわち、立体パラメーター ( $V_w$ ) に関しても、疎水性パラメーター  $\pi$  や電子的パラメーター  $\sigma$  と同じように、H を 0 に補正してあります。

$$pI_{50}(\text{none}) = 0.91 \pi + 2.93 \sigma + 5.35 \quad (4)$$

$$n = 15 \quad s = 0.266 \quad r = 0.908$$

$$pI_{50}(PB) = 0.58 \pi + 0.90 \sigma - 0.18 \Delta V_w + 6.76 \quad (5)$$

$$n = 15 \quad s = 0.226 \quad r = 0.818$$

以上の QSAR 結果は、1980年から90年代に報告したのですが、これらの結果は、現在筆者らが行っているインシリコ解析において重要な情報になると考えています。先に述べたように、CHS1によるキチン合成のメカニズムはセルロース合成酵素によるセルロース合成メカニズムに類似すると考えて、TD 類のチアジアゾール環をイソキサゾール環で置き換えた3つのフェニルイソキサゾール類 (図4) を合成し活性評価を行いました。その結果、全ての置換誘導体 (Cl, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, Ph) で活性が得られ、それぞれ  $pIC_{50}$  値を求めることができました。さらに、BPU 類や TD 類の場合と同様に、Cl 体に関しては PB の共力効果は認められませんでした。Et 体や Ph 体においては PB を併用することによって活性が顕著に上昇することがわかりました。

以上の様に、*in vitro* 活性評価系であるニカメイチュウの培養表皮系 (Nakagawa *et al.*) を用いて BPU 類、TD 類、エトキサゾール類、そして、最近新たに合成したイソキサゾール類のキチン合成阻害活性を定量的に求めました。現在、セルロース合成酵素の立体構造からモデリングしたニカメイチュウのキチン合成酵素を用いて、BPU 類をはじめと

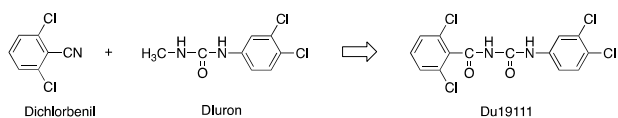


図5. 2種の除草剤の構造をもとにした Du19111の分子設計

する様々なキチン合成阻害剤の結合部位をインシリコで探索中でありま。BPU類は、図5に示したように、2つの除草剤 dichlobenil と diuron の構造をもとに設計されたものでありますが、dichlobenil は同じ Philip-Duphar 社によって開発されたセルロース合成阻害剤であります。約50年後に、除草剤の中のセルロース合成酵素阻害剤 isoxaben の化学構造と関係しているのではないかと、その類縁体の誘導体を合成したところ。3つの化合物にキチン合成阻害活性が見いだされた。これらの結果は、偶然なのか、必然的なものであったのか、興味のあるところあります。

### 謝辞

RI センターの職員の皆様には40年間に亘って大変お世話になりました。特に (故)栗原紀夫先生と元技術職員の宮武秀男様には本当にお世話になりました。栗原先生は、現在の私が所属している研究室 (生物調節化学) 出身の大先輩でもあり、公私とも

に大変お世話になりました。また、現在修士2回生の森湖太郎君をはじめ、これまで本研究に関わってくれた当時の学生の皆さんに御礼申し上げます。

### 引用文献

- 1) Daalen et al. *Naturwissenschaften* **59**, 312 (1972).
- 2) Wellinga et al. *J. Agric. Food Chem.*, **21**, 993 (1973).
- 3) Post and Vincent. *Naturwissenschaften* **60**, 431 (1973).
- 4) Van Leeuwen et al. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **109**, 4407 (2012).
- 5) Douris et al. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **113**, 14692 (2016).
- 6) Suzuki et al. *J. Pestic. Sci.* **42**, 93-96 (2017).
- 7) Ogata and Umeyama. *J. Mol. Graphics Mod.* **18**, 258 (2000).
- 8) Morgan et al. *Nature* **493**, 181 (2013).
- 9) Nakagawa et al. *J. Pestic. Sci.* **21**, 195 (1996).
- 10) Nakagawa et al. *Pestic. Biochem. Physiol.* **43**, 141 (1992).
- 11) Nakagawa et al. *Pestic. Biochem. Physiol.* **43**, 242 (1992).

# 福島レポート2020 「事故から間もなく10年・富岡町、 そしてLNTへの挑戦は続く」

放射性同位元素総合センター 助教  
角山 雄一

## 1. 富岡町の渡辺さん

2020年8月31日、曇り時々雨。福島県双葉郡富岡町岩井戸の渡辺さんのお宅に立ち寄った。2016年11月に初めて訪れて以来<sup>1)</sup>、6度目の訪問となる。お宅といっても、あの立派な日本家屋の母屋や、家族で営んでおられた味噌工場、二階建ての駐車場兼住居、広い農機具小屋などといった敷地内の建物はもうすっかり取り壊され、その跡地は砂利で綺麗に整地されていた。今や平家の味噌蔵と数本の庭木を残すのみである(図1)。

浜通りにある富岡町は冬になっても気候が穏やかで、積雪もほとんどない。かつて渡辺さんは、この富岡の地の大変豊かな自然に囲まれながら日々の生活を営まれていた。ところが原発事故直後の全町避難指示により、ここから40kmも離れた郡山市に避難することとなった。郡山市は福島第一の人口を有

する大都市で、内陸部にあるため富岡町よりもずっと冬の寒さが厳しい。当初は一時的な避難のつもりでいたが、いつしか避難生活も長引き、やがて故郷への帰還をあきらめざるを得なくなった。今や避難先であったはずの郡山が定住先となっている。それでも渡辺さんは、月に何度かかつて我が家があったこの地に足を運び、残された庭木や除染済みの小さな畑の手入れなどを続けている。

敷地に入り、唯一残された味噌蔵のシャッターをくぐると、入り口のすぐ前にかつて渡辺家の食卓で使われていた大きな木のテーブルが置かれていた。2年ほど前に本学の学生たちと訪れた際、渡辺さんを囲んで談笑したあのテーブルだ<sup>2)</sup>。その上には採れたてのおいしいそうな野菜がたくさん並んでいた。これから、いわき市にお住まいのお嬢様やお孫さんに持っていくという。実はここを訪れる直前まで、ど



図1：(左) 初めて訪れたときの渡辺靴店 (右) 4年後の現在の様子

のような気持ちで渡辺さんとお会いするべきか少し迷っていた。以前は「いつか必ず戻ってきて、孫たちをここで思いっきり遊ばせてあげたい。」そうおっしゃっていたのに現実は違ってしまった。もしも渡辺さんが悲嘆にくれながらこの地に通いつけているのだとしたら、どうお声がけしたらよいのだろう、学者の端くれとして何かお手伝いできることはあるのだろうか、などとあれこれ心配していた。ところが、いざお顔を拝見したらそういった諸々の不安は一気に消し飛んだ。渡辺さんは現状を受け入れ、今の暮らしを存分に楽しんでおられるようだった。自家用車を車中泊仕様にして寝泊りしながら旅をしている。先週は秋田県で登山をしてきた。今朝も1時間山歩きをしてから富岡に来た。今度の夏こそ琵琶湖に自転車を持って行って一周する……。などなど、ひとところに留まらないスタイルのとてもアクティブな暮らしぶりを次々と語ってくださった。唯一残された味噌蔵は決して悲劇の象徴などではなかった。渡辺さんにとっては畑付きの別荘のようなものらしい。とにかく前向きに人生を謳歌されている様子が伝わってきて（図2）、なんだか私の方が勇気づけられたような気持ちになった。



図2：富岡町の渡辺のり子さん。味噌蔵と車中泊仕様の愛車の前で。

同様な理由から戻らないという選択をされた富岡町の方々には他にもたくさんいらっしゃるようだ。令和元年8月末に実施された富岡町民6,612世帯を対象としたアンケート調査<sup>3)</sup>（有効回収数2,932世帯、44.3%）では、富岡町に居住していると回答したのはわずか7.3%の世帯のみであった（図3）。

富岡町役場はこれまでに、JR富岡駅付近などの町の一部地域を復興のシンボリックな拠点とし、住居の新設やインフラの整備、新しい産業の誘致など、さまざまな復興施策を推し進めてきた。そしてその成果が年々目に見える形となって表れている（図4）。富岡駅の周辺にはまっさらの復興住宅が建ち並び、病院や小中学校が再開され、ビジネスホテルや大型スーパーを備えた商業施設なども開業した。しかしそれでも人口減少になかなか歯止めが効かない。長期間にわたる全町避難がもたらした影響は甚大で、町は現在も地域コミュニティや文化、伝統などの喪失の危機に直面している。先ほども示したアンケート調査では、既に帰還を果たした方たちの多くが高齢で、若い年齢層ほど帰還意向が低いという結果となっている（図5）。町は今年3月、5ヶ年

## 2. 富岡町災害復興計画と住民意向調査

渡辺さんがこの地に帰還することを断念しなければならなくなった理由は主に以下の3つである。

- ①子育て世代の渡辺さんのお嬢様が、少量の放射線でも我が子に被ばくさせたくないと思われている。
- ②敷地の裏山やホットスポットの除染に限界がある。
- ③避難の長期化により避難先の都市部が日常生活の地となっている。

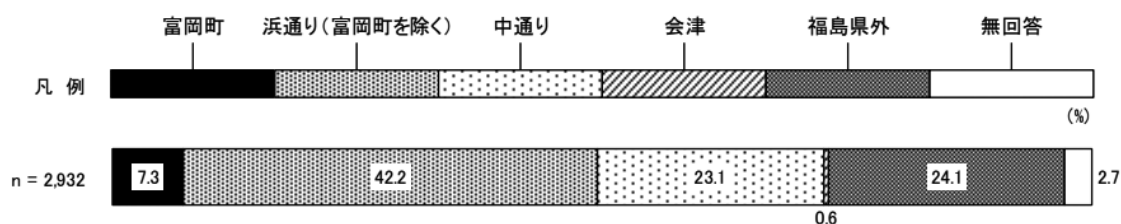


図3：現在の居住地域（令和元年度「富岡町住民意向調査報告書」<sup>3)</sup>より）



図4：(上左) 2016年3月撮影：津波の被害を受けたJR富岡駅の駅前駐車場。(上右) 土台のみを残し取り壊された旧ホーム。(下左) 2017年9月撮影：駅周辺に次々と建設される住宅群。(下右) 2018年3月撮影：現在のJR富岡駅。

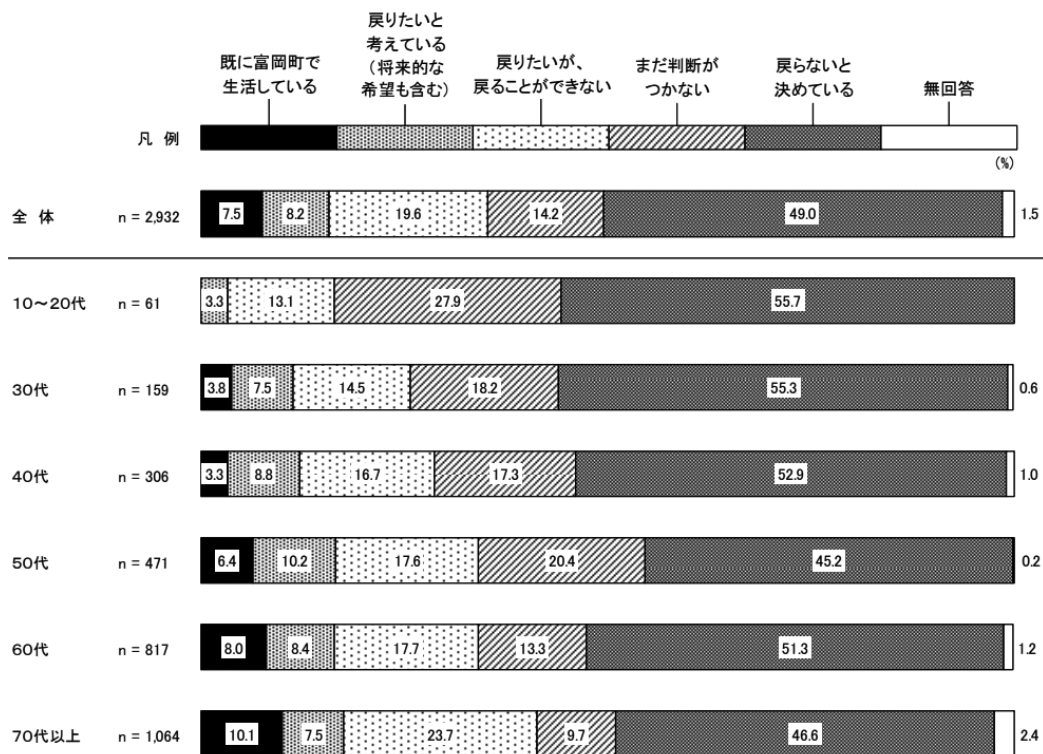


図5：年齢別富岡町への帰還意向 (令和元年度「富岡町住民意向調査報告書」<sup>3)</sup>より)

計画の「富岡町災害復興計画（第二次）後期」を発表した<sup>4)</sup>。そこには、さらなる復興に向けて町が進むべき方向性として、「町民一人ひとりの“心”の復興」と「町民の心をつなぐ“ふるさと富岡”の復興」という二つの基本理念が描かれている。果たして計画通りに若い世代をつなぎとめることはできるのだろうか。原発事故により深く傷ついた町の戦いは今後も続いて行く。

### 3. WAM モデルから放射線がん治療のための数理モデル「SS モデル」へ

福島に影を落とすさまざまな社会的課題の背景には、「長期間低線量の放射線を被ばくし続けるような環境下において、人体への影響、とくに確率的影響は有るのかなのか。」という問いが常に横たわっている。これに対して、現在の科学は明確な答えを出せていない。これについては、前回のレポート<sup>5)</sup>で詳しく述べた。除染により発生したがれきや土壌の処理に係る費用は6兆円に達する見込みだ。第一原発ではまもなくトリチウムを含む多核種除去設備等処理水の貯蔵タンクが満杯になるため、海洋放出などが検討されている。これには風評被害を恐れる地元漁業関係者からの反対の声が根強い。若者たちを対象とした甲状腺がん検査は昨年度末に4回目の本格検査を終えた。だが、県の健康調査検討委員会は影響は無かったと断言するような明確なメッセージは未だ表明していない。

科学者たちが明確な答えを出せない現状では、国際放射線防護委員会（ICRP）はじめ放射線被ばくによるリスクから人々を守る立場にある組織などは、被ばく線量を「合理的に達成可能な限り低く（As Low As Reasonably Achievable）」するべきという姿勢を堅持し続ける他ない。しかしその結果として、もしかしたら、何の影響も起こり得ない低い放射線量まで下がったのに人々は帰還せず、さらに故郷が荒廃していく、といった悲劇的な状況に陥っているのかもしれない。

現在、長期低線量被ばくに関する遺伝的影響の有無については、筆者が関係する研究グループが、従来の概念にとらわれない新たな数理モデル「WAMモデル」を提案している（図6）<sup>6)</sup>。これについては過去のRIニュースでも紹介した<sup>5,7)</sup>。WAMモデルを用いれば、従来型のモデルや概念では不可能であった将来予測も可能である。もしこのモデルが正しいのであれば、現在の富岡町の帰還可能な区域と同等の線量下でマウスを飼育したと仮定した場合、そのマウスの子に遺伝的な変異が発生することは有り得ないという予測となる。しかしこれはあくまでもひとつの理論による推測に過ぎない。確証を得るためには生物への照射実験を行うなど、十分な検証が必要である。そのためには共に研究を行ってくださる協力者の存在が欠かせない。昨年度、このモデルを広く知っていただくところから始めようと思い、ウェブ上でマウスへの照射実験結果を予測することができるオンラインシミュレータを公開した<sup>5,6)</sup>。

今年、この数理モデルの研究に関して大きな進展があった。WAMモデルの研究グループがその発想を応用し、がんの放射線治療の成果を予測することを目的とした数理モデル「SS (SeeSaw) モデル」を発表した<sup>8)</sup>。

現在の放射線を用いたがん治療の現場では、分割照射の効果を評価する際にLQモデル（Linear-quadratic model）を用いるのが主流である。以下の式1は、*in vitro*で放射線を照射した培養細胞の照射後の細胞生存率（SF）を表すLQモデルの式

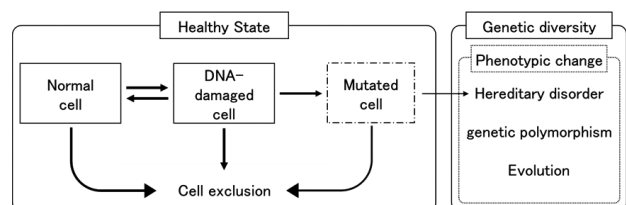


図6：WAMモデルの基本概念<sup>6)</sup>。変異細胞（Mutated cell）の発生と消失は生体内で常に起こっている。WAMモデルでは、変異細胞の発生から消失までを含めて健康な状態であると定義し、発生と消失の差引きの結果残った変異した生殖細胞が遺伝的影響の発生につながると思われる。



である。

$$SF = e^{-(\alpha D + \beta D^2)} \quad (\text{式1})$$

ここで  $\alpha$  と  $\beta$  は定数、 $D$  は吸収線量 (Gy) である。

この式をがん細胞への放射線照射にも適応できるものとし、まずは1次項  $\alpha D$  による細胞死の分と2次項  $\beta D^2$  による細胞死の分が等しくなる線量 ( $\alpha D = \beta D^2$ )、すなわち  $\alpha/\beta$  値 (比) を、豊富な臨床データから求める。そして、分割照射で治療を行うような場合は、次の式2で定義される EQD<sub>2</sub> (Equivalent Dose in 2-Gy fractions) などの指標を用い照射スケジュールを組み立てて行く。

$$EQD_2 = D \frac{d + (\alpha/\beta)}{2 + (\alpha/\beta)} \quad (\text{式2})$$

ここで  $D$  は総線量、 $d$  は1回の照射線量を表す。

EQD<sub>2</sub>以外にも、BED (Biologically Effective Dose)、ETD (Extrapolated Tolerance Dose) なども指標として用いられるが、何れも LQ モデルから派生したものである。ところが実際の治療現場では、これら LQ モデル由来の評価指標に共通の限界が存在することが明らかとなっている。例えば、これらの指標を1 Gy 以下の線量域で用いることは避けなければならない。一部の培養細胞への放射線照射実験などから、1 Gy 以下では LQ モデルによる想定よりも高い感受性を示すことがわかっているためだ。また、高線量域でこれらの指標を用いると生存率の過小評価となることもわかっている。つまり、分割照射の際に LQ モデルをベースとした EQD<sub>2</sub> などの評価指標を用いることができるのは限られた線量の範囲の時のみであるということになる<sup>9)</sup>。そこで、この課題を解決することを目指して、LQ モデルに捉われない新たなモデルを構築することにした。LQ モデルにはそもそも時間成分が含まれていない。これがさまざまな予測を行う際の制約となっていることは遺伝的影響 WAM モデルの研究の際にも主

張してきた。そして、がん治療の評価指標においてもこれと同様の制約にとらわれているものと考えた。

SS モデルではまず、がん細胞が増殖する項と放射線照射治療により死亡する項を設定し、これらを時間微分で表現する (式3)。

$$\frac{dN(t)}{dt} = \lambda_0 \left(1 - \frac{N(t)}{N_m}\right) N(t) \quad (\text{式3})$$

ここで、 $N(t)$  はがん細胞の数、 $\lambda_0$  はがん細胞の増殖率、 $N_m$  はある臓器・組織内における細胞の最大数 (培養細胞などの実験系の場合、 $N_m$  は培養プレートや栄養条件などの制約により規定される細胞の最大数) である。

次に、がん細胞には今まさに増殖中の active ながん細胞とあまり増殖しない inactive ながん細胞の二種類が存在すると仮定する (式4)。モデル構築の研究過程で、このようながん細胞の分類が必要であることが過去の論文等から明らかとなっていた。

$$N(t) = N^{active}(t) + N^{inactive}(t) \begin{cases} N^{active}(t) = N(t) \left(1 - \frac{N(t)}{N_m}\right) \\ N^{inactive}(t) = N(t) \left(\frac{N(t)}{N_m}\right) \end{cases} \quad (\text{式4})$$

この式4は、がん細胞の数を腫瘍体積に換算することで治療の際に照射する放射線の線量率の変化に応じて変化する腫瘍体積を表現することが可能となる (式5)。

$$V(t) = \frac{V_m V_0 e^{(\lambda - b_d)t}}{V_m + V_0 (e^{(\lambda - b_d)t} - 1)} \quad (\text{式5})$$

ここで、 $d$  は線量率、 $V(t)$  は  $t$  時間後の腫瘍の体積、 $V_m$  は腫瘍が臓器等で占めることができる最大の体積、 $V_0$  は  $t = 0$  の時の体積である。 $\lambda$  は臨床データなどから得ることができる腫瘍の生長度 (observational growth factor) である。この式5によ

る計算値は、一部の例外はあるものの、実際の治療データと非常に良く合致していた(図7)<sup>8)</sup>。

#### 4. 新たな数理モデルがいよいよ実証段階へ

遺伝的影響を予測する WAM モデルについては、マウスにおける遺伝子変異解析のプロフェッショナルや、細胞への放射線照射影響の解析の専門家といった研究者たちとタッグを組んで、モデルによる予測を実証するための共同研究プロジェクトが次年度よりスタートする予定だ。このプロジェクトではマウスに放射線を照射する実験を行う必要があるが、これについては環境研(公益財団法人環境科学技術研究所、青森県六ヶ所村)の協力が得られることとなった。環境研はマウスへの低線量率放射線照射実験に関して既に豊富な実績があり、専用の照射場を保有している。この共同研究では、まずはマウスの遺伝的影響を正確に予測するためのパラメータの精緻化が主な仕事となるが、可能であればマウスからヒトへの応用を目指したい。ヒトにも WAM モデルが適用できるのであれば、幾ばくかは原発事故被災者の皆様の不安を解消するお手伝いができるのではないかと考えている。

一方 SS モデルについては、大阪国際がんセンター(図8)の放射線腫瘍科の医師や医学物理士の皆さんと、臨床データとの比較検証研究が今年度よ

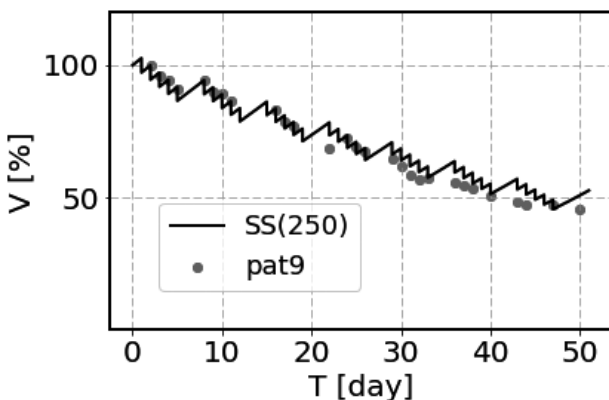


図7：非小細胞肺癌(NSCLC)の患者への分割照射治療の経過(pat9)とSSモデルによる推定値(SS(250))との比較<sup>8)</sup>。横軸は治療開始からの経過日数、縦軸は治療開始時を100%としたときの腫瘍体積。



図8：大阪国際がんセンター(公式ウェブページより)

り開始されている。これにより SS モデルの正しさが証明されれば、将来より患者にやさしい放射線治療計画を提案できるものと考えている。

そして最後に、これは実現したとしても相当先の話になるが、放射線防護や RI 規制の分野に一石を投じることができるのではないかと、筆者らは WAM モデルや SS モデルに大きな期待を寄せている。例えば、国際放射線防護委員会などの防護関係の組織は現在、低線量被ばくの場合は線量線量率効果係数 DDREF (Dose and Dose Rate Effectiveness Factor) を用いて高線量被ばく影響を補正することを提案している。しかしこの DDREF は、LQ モデルを用いているため、線量率が刻々と変化するような環境下における影響評価には全く適さない。つまり、先述のがん治療の評価指標と同じトラップに陥っている。またこの DDREF で補正される側の高線量被ばくによる影響については、LNT (Linear Non Threshold) モデルによる解釈に留まったままである。LNT では生体本来が有する修復機能などは一切考慮しない。WAM モデルや SS モデルの実証研究により、これら LQ モデルや LNT 仮説一辺倒の従来型の放射線防護の根本理念を突き崩すことになるかもしれない。そうなれば、もはや一般化してしまっている「少しの放射線でも被ばくと危ない。」という漠然とした社会不安に対しても、一定の解決案を提示できる可能性が一気に高まる。LNT への挑戦は続く。

#### 参考

- 1) 角山雄一、福島レポート2017「住民帰還が始

- まった原子力災害被災地を学生たちと歩く」、RI ニュース、No. 61、p. 9-13.
- 2) 角山雄一、福島レポート2018「大学生や中高生たちが自身の目線でとらえた原子力災害」、RI ニュース、No. 62、p. 12-20.
- 3) 令和元年度「富岡町住民意向調査報告書」、復興庁・福島県・富岡町、<https://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-4/ikoucyousa/>
- 4) 富岡町災害復興計画（第二次）後期 本編・概要版、富岡町、<http://www.tomioka-town.jp/chosei/keikaku/actionplan/2333.html>
- 5) 角山雄一、福島レポート2019「長期低線量被ばく影響における未解決領域への挑戦」、RI ニュース、No. 63、p. 8-15.
- 6) 角山雄一、尾上洋介、鈴木和代、高西康敬、佐藤丈、真鍋勇一郎、和田隆宏、土岐博、坂東昌子、「遺伝的影響予測シミュレータ「WAMSIM」～動植物への低LET放射線照射実験における遺伝的影響を予測する WAMモデルシミュレータ～」、保健物理、55巻4号、p. 207-214. (2020)
- 7) 角山雄一、福島レポート2015「情報格差が残した原発事故の傷跡」、RI ニュース、No. 59、p. 9-16.
- 8) Bando M., Tsunoyama Y., Suzuki K. and Toki H. "WAM to SeeSaw model for cancer therapy -Overcoming LQM difficulties-", International Journal of Radiation Biology, <https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1854487> (2020)
- 9) 細井義夫、「前立腺癌治療を例として考える LQ モデルと寡分割照射」、癌の臨床、第56巻第6号、p. 445-449. (2010)
- \*角山執筆した過去の RI ニュースについては、以下のサイトで閲覧可能  
<http://radi.rirc.kyoto-u.ac.jp/fukushima.html>

# 放射線で光る GM カウンター

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

「GM カウンターは放射線で発光するぞ」と放射線計測の大家（五十棲名誉教授）から聞いたことがある。それ以後、放射線教育のデモで発光を簡単に見せることが出来ないかとずっと考えていた。近年 ILAS セミナーで霧箱を作成し放射線の飛跡を観察する授業をしている。普通の霧箱では迫力がないので、大学生（新入生）を刺激するには工夫が必要で、1 m サイズのドーム型霧箱の製作に挑戦させていた。それなりに好評であったが、かれこれ3年も同じテーマで霧箱をやっているの、そろそろ飽きてきた。年度が変わるから受講生にとっては常に新しい出会い（実習テーマ）となるのであるが、実施する方は常に新しい刺激（挑戦）を望むたちで…、困ったもんだ。ドーム型霧箱の作製テーマは卒業して、放射線で光るカウンターの作製に挑戦しようと思いついた。ところが、聞き得た知識だけで物事（光るカウンター）はそんなに簡単にいくはずがない。ましてや、ぶっつけ本番で次期の ILAS セミナーでやろうとするなんて、本来無理（無謀）な話しである（と本人以外はそう思っていた）。

持てる知識・技術を総動員して、セミナー開講の数か月前から試行錯誤でいろいろ試作してみたが、うまくいかなかった。そんな様子を見かねた計測の大家が、助言（口だけでなく手も出してきた）をしてくれた。お蔭で、ようやく知識（思い）と確信（現実）が一致し、これなら出来る！と悟った（のは ILAS セミナー開始1週間前のこと）。

2020年の8月の ILAS セミナー（集中講義）で

「放射線で光る GM カウンター」の製作に成功したので、その報告をする。放射線教育のネタでお困りの方に参考となれば幸甚である。

## 2. ILAS セミナー

開講している ILAS セミナーを簡単に説明する。当センターの角山氏と二人で、前期全学共通科目2単位の授業「放射線入門」を担当している。福島の問題を念頭に、「放射線を測る」をテーマに、放射線の基礎知識と人体影響について講義し、自作した測定器で実際に放射線を測定する体験を通じて、改めて福島の問題に向き合う姿勢を持ってもらうためのセミナーである。また、近年の理科離れを憂いて、目に見えないけど存在する放射線を捕まえる装置を工夫しながら作り、これら一連の体験を通じて科学の楽しさも体感して欲しいと願ってこのセミナーを開講して4年になる。

今年度は、あいにく新型コロナの影響で、前期講義がオンラインとなった。本セミナーは実習がメインになるのでオンラインではなく対面で実施したかった。これまでは前期講義期間に毎週講義していたが、今回のセミナーは8月に集中講義として開講することができた。本来定員10名の受講登録があったが、最終的に受講生は6名であった。

二人組で3班に分けて、各班で1台の GM 計数管を設計して作製してもらった。

## 3. パンケーキ型 GM カウンター

GM 計数管は、この RI ニュースをご覧ください

いる方には説明の必要もないほど身近な放射線測定器である。ガイガーとミュラー（ドイツ、1928）が開発した電離放射線を計測するシンプルな構造の気体検出器（陰極の筐体に検出器ガスを詰め、陽極として芯線を張る構造）である。検出器ガスが放射線により電離され、イオンが雪崩状に生じ、最終的にパルス電流の流れを計測する装置である。放射線への感度の良さから、放射線施設で汚染検査用に広く用いられている検出器である。このGM管内の電離（放電：イオンの流れ）を発光として観測することができるのである（うまくやれば）。だが通常GM管は遮光して使用し、発光が見えるような構造にはなっていない。またGM計数管で発光を積極的に利用するようなことはない。計数管内の電場を安定に作るためにも金属等の筐体（陰極）で囲んでしまうので普段電離の様子を目にすることはしない。

放射線計測の大家の意見を参考にして、発光観測用にパンケーキ型のGMカウンターを作製することにした。最終的に試作に成功したのがセミナー開講の1週間前であった。受講生（新入生）にも作製できるようにカウンターの構造を工夫したため、必要な部品等の調達ができたと集中講義当日であった。

#### 4. 光るGMカウンター

作製したGM計数管の構造は、円筒形（6 cm 径 × 5 cm 高）の亚克力真空容器（ねじ式で密封）に、検出ガス導入端子、リークバルブ、高電圧導入端子を付けた。内部にアルミ箔で陰極を作り、内部の高電圧端子に陽極電極パターンを取り付けた。GM計数管の外観を写真1に示す。本来ならば、陰極、陽極の形状で電場の設計をしてカウンター作動のシミュレーションを行えば高度な実習となる。だが受講生（新入生）に求めた設計は、陽極の電極が外から覗ける事、電極の間隔を狭めるが電極間で放電が発生しないように均一な電場となる事などの解説に注意させ試行錯誤に設計・工作してもらった。



写真1 パンケーキ型 GM 計数管

GM計数管を作製する真剣な受講生の様子を写真2に示す。

理論に基づく設計ではないが、ザックリした解説にもかかわらず、受講生の柔軟な感性はいい線（設計）行っていた。具体的に各班で議論し、各班それぞれ工夫して異なる方法の陰電極のあり方を考えてくれた。最終的なカウンターのセットアップとして、写真3に検出ガス回路、高電圧のケーブルを接続したパンケーキ型のGMカウンター全体の測定時の様子を示す。はじめに容器（筐体）の中を真空に引き、次に検出ガスを充填し、高電圧をかけて作動させる。写真4に、標準線源（Cs-137）の放射線に感じて発光しているGM計数管の様子を示す（A班



写真2 パンケーキ型 GM 計数管の製作の様子

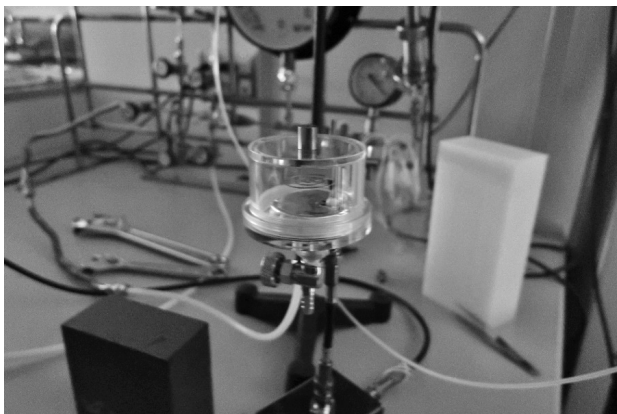


写真3 GMカウンター（ガス回路、高電圧接続）

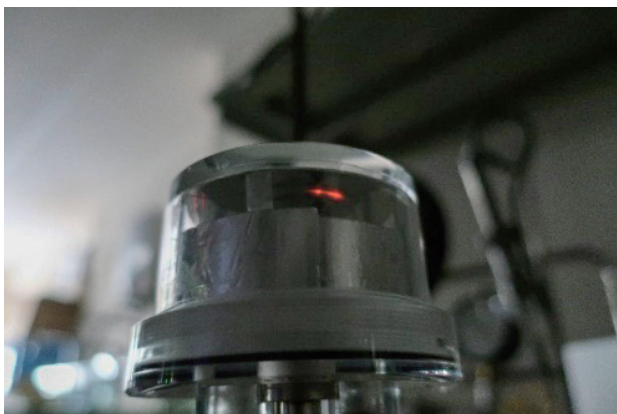


写真4 放射線で光るカウンター：電極を走る放電（発光）！

作製 GM 計数管)。写真にはうまく写ってないが、実際は放電（発光）が陽電極に沿って走っていくのが観測できた。紙面では感激の動画をお見せ出来ないのが残念である。最終的にどの班の GM 計数管も発光が観測できた。ある班だけ発光の箇所がまずかったが、その原因もちゃんと理解できたし、「光る GM カウンター」は大成功に終わった。少なくともこの発光現象の観測で、放射線が電離と深く関わっていることを体感できたはずである。写真5に、各班の成功した GM 管を持って満足な顔（マスクで満面の笑顔を見せられないのが残念だが）の受講生たちの記念写真を示す。たぶん、GM カウンターの作動で、こうやって放電（発光）が起こっているのを観測した人はそんなにいないはずである。自慢できる体験である。そう言う私も初めて発光を観測することができた、実は受講生よりも感激していたのは私かもしれない。

## 5. 最後に

受講生にはもっとカウンターの作動原理を理解させたうえで、計数管の設計をさせてあげたかった。少し消化不良な内容もあったかもしれない。ともあれ、ボール盤で穴をあけ、電極を設計し取り付け、半田ごて、アースの接続方法、検出ガスの充填と数々の初めての体験は貴重だったはずだ。検出器の内部構造を知り得た事、また放射線を自分たちの作った測定器で、視覚（発光）で感じた経験は、これからの放射線（放射能）に対する意識を変えてくれるきっかけになると信じている。

コロナ禍の中で通常の大学（講義）と全く違う状況の中で、駆け足で駆け抜けた集中講義 ILAS セミナーとなった。受講生の中には、キャンパスを初めて訪れた学生とか、この集中講義を受けるために（下宿が決めてなくて）市内の親類に身を寄せた学生もいて、改めてコロナ禍で大学の置かれている状況の異常さを痛感した。すべてひっくり返って良い経験（思い出）として話せる日が来ることを願う。

さて、どうも今回の光るカウンター作製で味を占めたようだ。来年度の ILAS セミナーでは今回のカウンターのバージョンアップをねらっている（名誉教授にそそのかされたわけではない）。もう構想は出来上がっている。自慢できる様な結果になったら報告したいと思う。



写真5 成功して満足な受講生と作製した GM 計数管（左から A、B、C 班）

A 班：中田拓希（工）、望月悠貴（工）

B 班：雀部太陽（理）、渡部祐大（工）

C 班：山岸誠宗（理）、友定実希子（工）

# RI センターにおけるコロナ対応について

放射性同位元素総合センター  
 施設長 高木 郁二  
 本館主任者 戸崎 充男  
 分館主任者 角山 雄一

新型コロナウイルス（COVID-19）はこの原稿を作成している時点で第3波が到来したともいわれており、少なくとも鎮静化した状況にはない。with コロナが続くのか、あるいは after コロナとなるのかは分からないが、共同利用施設として今後の対応を考えるうえで参考とするため、現時点でのコロナ対応を記録しておく。

今年に入ってからの政府や本学の主な対応は以下の通りである。

- 1月31日 本学：「本学の方針」（第1版）、水際対策が主
- 2月1日 政府：新型コロナウイルスを指定感染症（2類相当）に指定
- 2月27日 政府：学校の臨時休業を要請
- 2月28日 本学：時差出勤の実施（レベル1相当）
- 4月7日 政府：特措法に基づく緊急事態宣言を発出
- 4月7日 本学：テレワークの取り扱いを定め、通知
- 4月14日 本学：活動制限のガイドライン発表
- 4月17日 本学：活動制限レベル3
- 5月21日 政府：関西の緊急事態宣言を解除
- 5月22日 本学：活動制限レベル2（ボトムラインとする）
- 5月25日 政府：緊急事態宣言を解除
- 7月10日 本学：活動制限レベル2-
- 7月27日 本学：活動制限レベル2（学生の感染を受けて）

8月26日 本学：活動制限レベル2-

10月1日 本学：活動制限レベル1

ここで、「活動制限レベル」はいくつかの項目に分かれているが、当センターの共同利用に関する項目とその概要は表1の通りである。

表1 本学における活動制限レベルの概要

	研究活動	対面授業	職員勤務（推奨）
レベル1	通常	可	時差出勤
レベル2-	復帰を目指す	原則禁止	在宅勤務
レベル2	自宅作業を推奨	原則禁止	在宅勤務
レベル3	維持のみ	原則禁止	交代勤務

以上の方針や活動制限レベルのもと、当センターは表2のように対応した。ただし、活動制限レベル等の変更と対応には若干の時間のずれがある。それぞれの項目の詳細は以下の通りである。また、この紙面を借りて放射線管理部門の業務である教育訓練等の対応についても記載しておく。

表2 RI センターの対応の概要

	共同利用	教育(*)	職員勤務（実態）
レベル1	通常	オンライン	通常
レベル2-	制限有	オンライン	一部在宅
レベル2	制限有	オンライン	一部在宅
レベル3	-	-	交代勤務

\*オリエンテーション

## 1. 共同利用

3月末の時点では本学の活動制限レベルは定められていなかったが、政府が特措法を制定して緊急事態宣言を発出する準備を整えたこと、感染者が増加

し続けていることから、4月1日から共同利用を休止することにした。ただし、継続課題であって、やむを得ない理由がある利用者については、確認書にサインをいただいたうえで利用を認めた。その後、4月18日に本学の活動制限レベルが3と定められたため、同20日に共同利用を全面的に休止した。

5月22日に活動制限レベルが2に引き下げられたことを受けて、6月1日から共同利用を再開した。非密封管理区域は換気がよいが、これに加えて管理室が管理区域に立ち入る利用者の数を把握し、必要があれば制限した。また、利用者の多い実験室については、一部の利用者の実験室を移動していただいた。これらによって三密を回避するようにした。

以上の対応により4月と5月は利用がほとんどなかったため、利用料を不徴収とした。

## 2. 教育（オリエンテーション）

共同利用の休止により4月2-3日に予定していたオリエンテーションを中止した。やむを得ない理由で利用する利用者については個別にオリエンテーションを実施した。共同利用を再開するにあたって6月1日にオリエンテーションを実施したが、本学の活動制限レベルが2であったためリモート（ZOOM）で開催した。ただし、病院地区は対面でオリエンテーションを実施した。

## 3. 職員勤務

4月7日に緊急事態宣言が発出されたことと、同日に本学がテレワークの取り扱いを定めて通知した

ことから、4月16日から一部の職員は在宅勤務とし、残りの職員は交代勤務とした。5月22日に本学の活動制限レベルが2に引き下げられたことと、6月1日から共同利用を再開するため、交代勤務は5月31日までとした。

レベルによらず、汚染検査や実験動物の飼育などの業務は必要最小限の活動であると判断し、教職員が通常通り実施した。

## 4. RI 及びエックス線登録関係

### ・登録前教育訓練

オンライン講義に変更し、実習を伴う訓練は中止した。

### ・血液検査

オンライン講義のため当日の血液検査は中止し、健康管理部門と相談の上7月27-31日16:00-17:00に分館2階で実施した。

### ・登録者教育訓練

RI登録者については、環境安全保健機構のサイトでe-Learningの環境を作成した。希望する事業所は、予防規程など事業所特有の問題2問と参考となるスライド2-3枚を提出して貰った。

以上の対応にあたり、共同利用の皆様にはご理解を多大なご協力をいただいた。今後ともご支援、ご協力をお願いする次第である。



## 放射性同位元素等取扱施設安全管理担当教職員研修

放射性同位元素総合センター 教授  
川本 卓男

当放射性同位元素総合センターは、日本の主要大学のRIセンターとして、他のRIセンターやRI・放射線関連施設との連携においても中心的な役割を果たしており、毎年定期的で開催されている「国立大学アイソトープ総合センター長会議」では、会議の立ち上げ時よりずっと会議における幹事校の役割を果たしてきている。この「国立大学アイソトープ総合センター長会議」は、会員相互の緊密な連携により、放射線安全管理に関する協力および情報交換を行い、センターの機能の向上を図り、放射性同位元素等の利用における教育および研究の発展に寄与することを目的として開催され、全国の国立大学法人のRIセンター長や専任教員、担当事務員と関係省庁の担当者などが参加する。このセンター長会議の大きな事業の一つとして、全国の大学や国立研究機関等の放射線安全管理担当教職員の資質向上を図るために企画・開催されるのが、標記の「放射性同位元素等取扱施設安全管理担当教職員研修(全国研修)」である。平成29年には、センター長会議を骨格とした「放射線防護研究推進のためのRIセンターネットワーク」を、原子力規制庁の放射線対策委託費(放射線安全規制研究戦略的推進事業費)放射線防護研究ネットワーク推進事業として提案したところ採択され、その計画案に基づいて、全国研修は、「大学等に求められる放射線安全管理技術向上のための教育プログラム検討会議」と同時開催とすることになった。原子力規制庁の推進事業として3年目に当たる2019年度は、京都大学が、担当校となり、11月28日・29日の2日間にわたって、放射性同位元素総合センターにて開催された(写真)。



写真 京都大学RIセンターにて開催された全国研修(講義室での様子)

参加者は、全国の国公立大学および研究所から35名と幹事校(北大、東北大、東大、名大、京大、阪大、九大)の教職員で、参加希望者が多かったため、各機関からの重複がなるべく少なくなるように、また過去に経験のない方などを優先して参加者を決定した。2日間のプログラムは、表の通りで、大学等に求められる放射線安全管理技術向上のために、講義と実習をそれぞれ三つ実施し、プログラムの妥当性の検討も行った。

なお研修終了時に参加者にアンケート調査を行ったところ、全体的に概ね良い評価をいただいた。また、今後期待される研修テーマとして、「排気や排水の評価」、「施設点検・自主点検の実習」、「 $\alpha$ 核種の取り扱い者及び管理者に求められるスキル」、「福島の実状と風評被害対策」などの回答があった。

放射線安全管理において、教育・訓練は、非常に重要なにもかかわらず、今年度以降は、本研修・検討会議を放射線防護研究ネットワーク推進事業として継続して行うことが認可されなかったため、予

算確保が大きな課題の一つとなっている。

ター長をはじめ当センターのスタッフの方々、幹事校の方々および参加者の皆様に感謝の意を表し、筆をおきたいと思います。

## 謝辞

最後に、本研修遂行に協力いただいた高木セン

## 表 プログラム

### 2019年11月28日 (木)

時間	内容	
8:30-9:00	受付	
9:00-9:05	開会の挨拶	高木郁二 (京都大学放射性同位元素総合センター長)
9:05-9:15	本事業の主旨説明	篠原厚 (大阪大学放射線科学基盤機構長)
9:15-9:25	スケジュール説明	
9:25-10:25	特別講演	「放射線安全規制の最新動向について」 谷本昌純 (原子力規制委員会原子力規制庁) 座長：吉村崇 (大阪大学)
10:25-10:35	休憩	
10:35-11:35	講義 I	「放射線防護に用いられる量と最近の動向について」 小田啓二 (神戸大学理事・副学長) 座長：柴田理尋 (名古屋大学)
11:35-11:40	休憩	
11:40-12:30	講義 II	「放射線測定的基础」 戸崎充男 (京都大学放射性同位元素総合センター) 座長：渡部浩司 (東北大学)
12:30-13:30	昼食	
13:30-14:00	管理区域立入前教育	放射線障害予防規程
14:00-14:20	ガイダンス (実習 I)	実習 I の概要説明 戸崎充男 (京都大学放射性同位元素総合センター)
14:20-15:20	実習 I	「放射線測定器の校正について」 京大 RI センター・幹事校教職員
15:20-15:30	休憩	
15:30-15:50	ガイダンス (実習 II)	実習 II の概要説明 石塚史彦 (京都大学放射性同位元素総合センター)
15:50-17:30	実習 II	「非密封 RI の取扱に関する実習」 京大 RI センター・幹事校教職員
18:00-20:00	情報交換会 会場：楽友会館	

### 2019年11月29日 (金)

時間	内容	
8:30-9:00	受付	
9:00-9:10	ガイダンス (実習 III)	実習 III の概要説明 角山雄一 (京都大学放射性同位元素総合センター)
9:10-10:40	実習 III	「非密封 RI による汚染発生時の対応技能研修及び討論」 京大 RI センター・幹事校教職員
10:40-10:50	休憩	
10:50-12:30	実習のまとめと講評	グループ発表と講評 座長：中島裕美子 (九州大学)
12:30-13:30	昼食	
13:30-15:30	講義 III	「事故事例 RI 施設の火災について」 高木郁二 (京都大学放射性同位元素総合センター長) 座長：久下裕司 (北海道大学)
15:40-15:50	休憩	
15:50-17:00	総合討論	実習、講義内容に関するディベート 座長：秋光信佳 (東京大学)
17:00-17:15	修了証授与・閉会の挨拶	高木郁二 (京都大学放射性同位元素総合センター長)

## 『レントサーベイはじめました』

環境安全保健機構放射線管理部門は、学内に設置のエクス線装置に必要とされる漏洩放射線検査（マッピング）に利用可能なエネルギー補償型シンチレーションサーベイメータの貸出対応を開始しました。借用を希望する場合は、放射線管理部門・放射性同位元素総合センターのホームページからオンラインで申込みの受け付けをしていますのでご利用ください。

### 【そもそも】

令和元年8月に本学の放射線管理関連規程類が一斉に改定された際、放射線障害予防小委員会により「放射線の量の測定方法と判定方法に関する細則」が定められた。この細則により、マッピングに使用する測定器として、エネルギー補償型シンチレーション式サーベイメータが推奨されることとなった。

1. 放射線の量の測定は、中性子については中性子サーベイメータを、エクス線とガンマ線（以下「光子」という。）についてはエネルギー補償型シンチレーションサーベイメータ（以下「シンチレーションサーベイメータ」という。）を用いること。
2. 以下の計測器は原則として用いないこと。
  - (1) ガイガー・ミュラー計数管（GM計数管）放射線の量を正確に測定できない
  - (2) 電離箱式サーベイメータ 感度が低い
  - (3) 半導体式線量計 エネルギー補償が不十分である

細則の条項が根拠としている測定に関する考え方からも、この選択は適切であると思われる。しかし、

ガンマ線についてはこの細則の定めのとおりで有効な測定が可能であるのだが、エクス線の測定については一筋縄ではいかない事態が判明した。

### 【現実的な問題】

現在、本学に設置されている研究用のエクス線装置の多くは、Cu、Mo、Rhなどをターゲットとして発生させた特性X線の回折現象などを利用した分析装置である。装置の安全管理のため、定期的に装置外部への漏洩線量の測定が求められている。先に述べた通り、エクス線の漏洩を測定するため、エネルギー補償型シンチレーションサーベイメータを用いるべきところであるが、測定対象となるX線のエネルギーはCuで8 keV、Moで17.4 keV、Rhで20 keVと低く、本学が保有する多くのエネルギー補償型シンチレーションサーベイメータの内には、これら低エネルギーのガンマ線・エクス線の測定ができないものがあることが指摘された。

### 【市販品の設計事情】

現在、おそらく本学に最も多く納入されている型式のエネルギー補償型シンチレーションサーベイメータは、エネルギー補償の補正関数にG関数補正演算を採用した機構を有している。サーベイメータの検出器に入射する光子のエネルギーから校正基準である<sup>137</sup>Csの線量に補正を行うために用いられるG関数補正演算の換算表となる数値は、公に示されているエネルギー値では50 keVが最低値である。よって、G関数補正演算を厳密に適用できるエネルギー範囲は50 keV以上ということになり、それ以下のエネルギーについては補償の対象外であるとして、フィルターによりカットされている構造で

あるという。この50 keV フィルターは、それ以下のエネルギーの光子をほぼ完全にカットしてしまうため、エックス線装置に用いられているような、8 keV、20 keV といったエックス線は全く検出できないサーベイメータであると言える。すなわち、このサーベイメータでは、適正な漏洩線量測定ができないということが明らかとなった。

### 【市場調査】

そこで、市場にはエックス線装置の漏洩線量測定に適うシンチレーションサーベイメータは存在するのかを調査したところ、今回入手するに至ったメーカーの製品は8 keV 以上対応を謳い低エネルギーに対する感度を有する装置であるという。メーカー（代理店）に仕様を確認したところでは、G 関数補正演算に加え DWM 方式という補正演算で補完したものであるとのことで、低エネルギー側に測定レンジを振って（これを X mode としている）、低エネルギー光子をエネルギー補償しつつ測定する仕組みであるとのことである。装置の仕様書には、装置には測定対象とする光子のエネルギーに対して、X mode : 8 ~ 300keV、 $\gamma$  mode : 50 ~ 1500keV の切り替えをして測定するように記載されている。

### 【実際の使用感】

装置が納入されて、実際に使用してみた感想である。まずは、50 keV 以下のガンマ線に正しく反応するかの確認のため、 $^{129}\text{I}$  (42 keV) のチェックソースで動作確認してみた。50 keV フィルターのある既存のサーベイメータと比較しても、明らかに線量率が計測されていることがわかった。

バックグラウンド値の測定を行うと、通常の (50 keV ~ フルレンジの) シンチレーションサーベイメータの値と比べ極端に低い値を示している。これは、X mode の上限値が300 keV でカットされていることにより、自然放射線由来の高エネルギー側のガンマ線が軒並みカットされた結果であろうと推測

される。よって、目的とする低エネルギーのエックス線を効率よく検出し線量率の測定ができるのであろうということが見て取れた。

漏洩線量の測定は、X 線装置を運転中に装置の周辺における線量がバックラウンドと比べ明らかに上昇することの有無を確認する作業である。検出された漏洩線量についてはそれがどれだけの被ばく量となるかを評価するため、線量率で測定結果を示すこととなる。今回導入された装置は確かに低エネルギーエックス線を検出でき、適切に線量率に評価できる装置であるので、今後、全学で活用されて、エックス線装置の安全な管理に資することを期待している。

### 【貸出の手順】

現在、当該機種のサーベイメータを学内への貸出し用として2台準備している。借用を希望する場合は、部門/センターのホームページから、放射線装置の管理のページへ移動し、サーベイメータ~借用申込のページで手続きを行う。

表示されたカレンダー（貸出状況）を参照し、借用希望日時、返却予定日時他、所定の事項をウェブ入力フォームから入力送信していただく。借用申請が承諾されると、借用書の pdf ファイルがメール添付で送付されるので、印刷して持参していただき、これと引き換えにサーベイメータの貸出を行う。貸出場所は北部構内の放射性同位元素総合センター分館にて行う。（返却の際も同じ場所にて）。

### 【その他の情報】

センターではサーベイメータの貸出以外に、各部署が所有するサーベイメータの機能確認を行うサービスも用意している。測定の信頼度を確保するため、装置の定期的な性能評価は必須であり、センターの提供するこのサービスを活用して欲しいと期待している。

〈参考サイト〉

http://www.rirc.kyoto-u.ac.jp/rental/



**貸出用サーベイメータ管理** - supported by Radioisotope Research Center of Kyoto University -

---

**貸出用サーベイメータ管理**

貸出用サーベイメータ管理

エックス線装置の漏洩線量測定（マッピング）に使用できるエネルギー補償型シンチレーション式サーベイメータの貸出機器を用意しています。

貸出予約・予定表

＜前月 2020年 11月 次月＞						
日	月	火	水	木	金	土
1	2	3 <small>文部省の日</small>	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23 <small>数字標識の日</small>	24	25	26	27	28
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
-	0	0	0	0	0	-

借用申込フォーム

以下のフォームにてお申し込みください。

借用期間

借用希望日： 年 月 日  AM  PM  
 返却予定日： 年 月 日  AM  PM

借用機器

機器選択： 富士電機 NHC6

申込者

氏名：   
 所属：   
 職名：   
 内線：   
 E-mail：

使用場所

使用場所：   
 キャンパス：

back

---

Copyright © 2020 Radioisotope Research Center of Kyoto University. All rights reserved.

# 2019年度講習会等の実施状況

## 〔学内〕

### 2019年

- ・薬学部学生実習
  - 10月23日（水）～10月30日（水）〈於：教育訓練棟〉 〈86名〉
  
- ・工学部学生実習
  - 12月24日（火） 〈於：教育訓練棟〉 〈42名〉
  
- ・利用のためのオリエンテーション（本館）
  - 4月2日（火） 〈於：教育訓練棟〉 〈55名〉
  - 4月3日（水） 〈於：教育訓練棟〉 〈32名〉
  - 4月11日（木） 〈於：教育訓練棟〉 〈2名〉
  - 4月18日（木） 〈於：教育訓練棟〉 〈3名〉
  - 5月14日（火） 〈於：教育訓練棟〉 〈3名〉
  - 5月16日（木） 〈於：教育訓練棟〉 〈1名〉
  - 5月22日（水） 〈於：教育訓練棟〉 〈7名〉
  - 5月28日（火） 〈於：教育訓練棟〉 〈1名〉
  - 5月31日（金） 〈於：教育訓練棟〉 〈1名〉
  - 7月8日（月） 〈於：教育訓練棟〉 〈3名〉
  - 8月8日（木） 〈於：教育訓練棟〉 〈1名〉
  - 9月6日（金） 〈於：教育訓練棟〉 〈1名〉
  - 9月18日（水） 〈於：教育訓練棟〉 〈2名〉
  - 10月2日（水） 〈於：教育訓練棟〉 〈1名〉
  - 10月3日（木） 〈於：教育訓練棟〉 〈6名〉
  - 11月11日（月） 〈於：教育訓練棟〉 〈1名〉
  - 12月12日（木） 〈於：教育訓練棟〉 〈4名〉
  - 12月24日（火） 〈於：教育訓練棟〉 〈5名〉
  - 12月27日（金） 〈於：教育訓練棟〉 〈1名〉
  
- ・利用のためのオリエンテーション（分館）
  - 4月2日（火） 〈於：分館〉 〈46名〉
  - 4月3日（水） 〈於：分館〉 〈14名〉
  - 4月12日（金） 〈於：分館〉 〈3名〉
  - 7月11日（木） 〈於：分館〉 〈8名〉
  - 8月2日（金） 〈於：分館〉 〈1名〉
  - 10月17日（木） 〈於：分館〉 〈3名〉
  - 10月29日（火） 〈於：分館〉 〈1名〉

### 2020年

- ・工学部学生実習
  - 1月7日（火） 〈於：教育訓練棟〉 〈42名〉

- ・利用のためのオリエンテーション（本館）  
3月4日（水） 〈於：教育訓練棟〉 《2名》
- ・センター実験室共同利用成果発表会  
2月27日（木） 〈於：教育訓練棟〉 《21名》

## 〔学 外〕

### 2019年

---

- ・体験授業「放射線って何だろう？」  
8月1日（木）小中学生の部 〈於：教育訓練棟〉 《70名》
- ・体験授業（岡山県操山中学校）  
11月15日（金） 〈於：教育訓練棟〉 《31名》
- ・京都市消防学校特別教育（特殊災害対策課程）  
12月13日（金） 〈於：分館〉 《30名》

### 2020年

---

- ・体験授業（鴨沂高等学校）  
2月7日（金） 〈於：教育訓練棟〉 《40名》