

2015.10  
Vol.58  
第58卷 第03号

放射線科学  
放射線科学

放射線科学 第五十八卷 第三号  
2015年10月2日発行 <編集・発行> 国立研究開発法人 放射線医学総合研究所

National Institute of Radiological Sciences

〒263-8555 千葉市船橋区穴川4-9-1 電話043(206)3026 Fax 043(206)4062

# 放射線科学

Radiological Sciences

## 特集

- 発達期被ばくを考える
- 福島復興支援本部  
—福島の復興・再生に向けて



<http://www.nirs.go.jp/>

ISSN 0441-2540

特集 1

## 発達期被ばくを考える

放射線防護研究センター発達期被ばく影響研究プログラム／島田 義也

有吉 健太郎、今岡 達彦<sup>1,2</sup>、柿沼 志津子<sup>1,2</sup>、  
尚 奕、砂押 正章、高畠 賢、武田 志乃、  
臺野 和広、鶴岡 千鶴、西村 まゆみ、  
ブライス ベンジャミン、細木 彩夏、  
森岡 孝満<sup>2</sup>、山田 裕<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 発達期被ばく影響研究プログラム

<sup>2</sup> 福島復興支援本部長期低線量被ばく影響プロジェクト

特集 2

## 福島復興支援本部 —福島の復興・再生に向けて

福島復興支援本部／石田 敦郎

青野 辰雄、赤羽 恵一、新江 秀樹、今岡 達彦、大町 康<sup>1</sup>、奥田 保男、柿沼 志津子、  
カバシ ノーベルト、川口 勇生、金 ウンジュ、久保田 善久、栗原 治、サファー サラタ クマール、  
島田 義也、尚 奕、菅谷 公彦、高萩 真彦、賞雅 朝子、鶴岡 千鶴、土居 主尚、長谷川 慎、  
福田 美保、府馬 正一、細木 彩夏、丸山 耕一、森岡 孝満、矢島 千秋、山崎 隼輔、  
山田 裕、吉田 聰、吉永 信治、米内 俊祐、渡辺 嘉人

<sup>1</sup> 緊急被ばく医療研究センター被ばく線量評価研究プログラム

短報

### 温室～新たな出発～

放射線防護研究センター廃棄物技術開発研究チーム／石井 伸昌

短報

### 放医研発—放射線先端生命科学を次世代へ： 親子が紡ぐアウトリーチ活動

重粒子医科学センター一次世代重粒子治療研究プログラム／小池 学、湯徳 靖友  
放射線防護研究センターリスク低減化研究プログラム／小池 亜紀

報告

### 国立大学法人動物実験施設協議会 千葉総会の開催報告

研究基盤センター研究基盤技術部生物研究推進課／小久保 年章

報告

### The 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015) 参加報告 若手研究者企画による国際交流会と国際シンポジウムについて

重粒子医科学センター一次世代重粒子治療研究プログラム／平山 亮一

2015.10  
Vol.58  
第58巻 第03号

放射線科学  
Radiological Sciences

編集委員会

委員長  
明石 真言

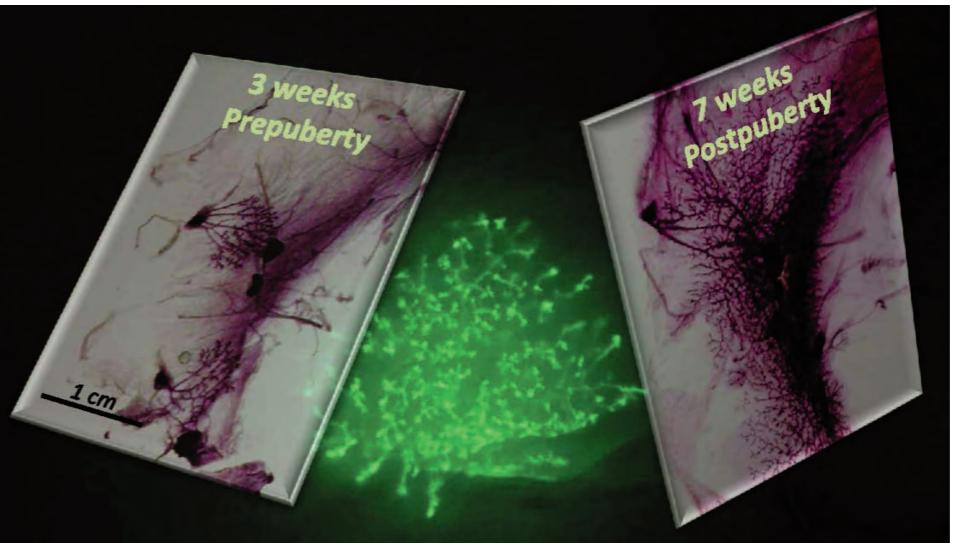
委員  
及川 将一／大町 康／勝部 孝則／兼松 伸幸  
小久保 年章／下川 卓志／數藤 由美子  
藤森 亮／府馬 正一／堀口 隆司  
山内 正剛／吉本 泰彦／脇 厚生

事務局  
企画部広報課

発行日

2015年10月2日  
国立研究開発法人 放射線医学総合研究所  
National Institute of Radiological Sciences  
〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1  
電話 043(206)3026 Fax 043(206)4062

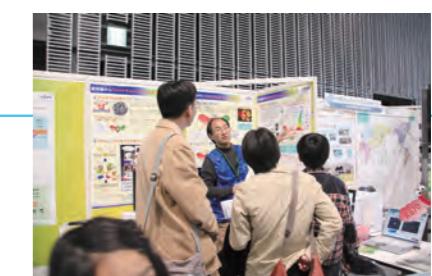
本冊子はグリーン購入法に基づく基本方針の判断の基準を満たす紙を使用しています。  
This brochure uses paper that meets the policy standards based on the Green Purchasing Law.



18



34



39

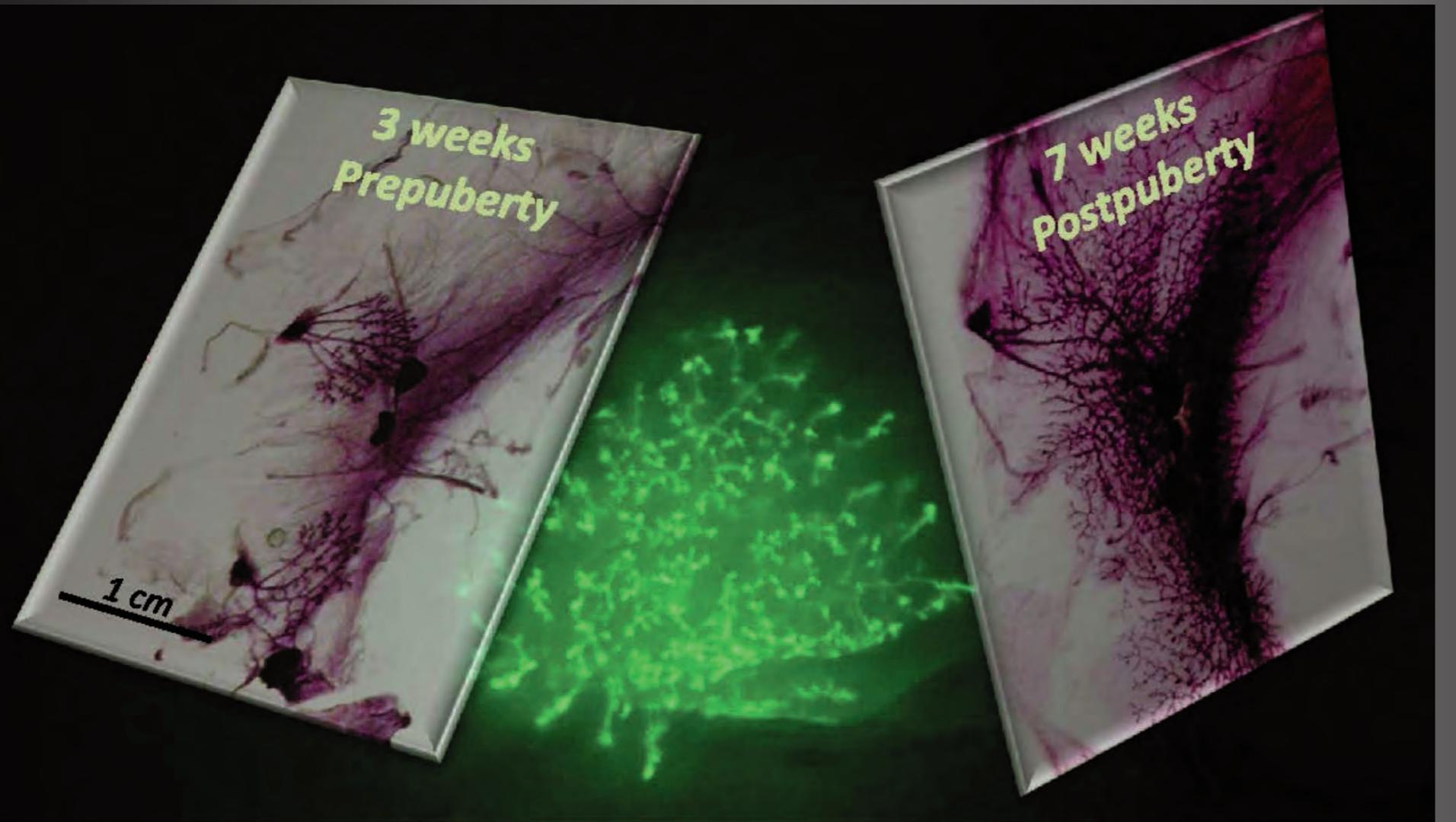


42



44

# 発達期被ばくを 考える



近年、環境化学物質が子どもの健康に与えるリスクについての関心が高くなっています。レイチェル・カーソンが“沈黙の春”を出版して以来、農薬の生態系への影響が社会的な問題となり、ヒトにおいても、内分泌攪乱物質(いわゆる環境ホルモン)が組織の発達が未熟な胎児や子どもの時期に曝露されると、生殖・内分泌系の発達や機能に影響が出るということが大きく取り上げられています。従って、大人とは異なる子ども特有の生理機能、代謝などを組み込んだ新たなリスク評価体系が必要とされています。

放射線防護においても、子どもにおける発がんリスクの評価は喫緊の課題となっています。国際的にも、世界保健機関(WHO)、国際原子力機関(IAEA)、国際放射線防護委員会(ICRP)、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)も放射線被ばくによる子どもの健康影響に関する報告書を次々とリリースしています。

経済協力開発機構(OECD)の報告によると日本はCT装置の保有台数が世界一と指摘され、子どものCT検査による発がんリスクの増加が議論されています。腫瘍部へ放射線を集中させる強度変調放射線治療や粒子線(陽子線や炭素イオン線)治療を行う際に発生する、2次ビームとしての中性子線についても、小児がん患者のサバイバーの2次がんリスクが問題となっています。しかし、粒子線や中性子線に関し、小児被ばくで利用できる報告はほとんどありません。

そこで、第3期中期計画(2011～2015年度)においては、子どもにおいての中性子線や粒子線の被ばくの影響を明らかにすることにしました。目標は、エックス線やガンマ線と比べこれらの放射線の影響がどれくらい大きいのかを示す生物学的効果比(relative biological effectiveness: RBE)を求めることです。RBEは放射線防護における放射線加重係数( $w_R$ )の基礎となる重要な数値です。現在の防護体系に使用されている $w_R$ が、子どもにおいて使用できるのかどうかは未だ結論が得られていません。従って、本プログラムの報告が世界初となります。

本特集では、まず、発がんリスクの被ばく時年齢依存性の概略と被ばく時年齢依存性を決めている生物学的要因について概説します。次に、中性子線や粒子線のRBEの値が発達期と成体期でどのように違うのかについて紹介します。また、 $\alpha$ 核種でもあり化学毒性も強いウランの体内挙動についても触れます。本研究で得られた貴重な資料やデータを広く有効に利用するために、動物アーカイブを現在構築中であり、欧米との連携を進めるためのネットワークについて説明します。本研究は、IAEAとWHOの協働センター課題の一部として進められており、小児の放射線リスク評価のための基本情報を提供することとして、今後の展開が期待されています。

放射線防護研究センター発達期被ばく影響研究プログラム  
プログラムリーダー／島田 義也

# 成体期と異なる発達期の組織の放射線応答

発達期被ばく影響研究プログラム／有吉 健太郎・柿沼 志津子・島田 義也

当プログラムでは、胎児期・子ども期における放射線被ばくによる発がんリスクや、寿命短縮などに関する情報を提供することを目的として、実験動物を用いて研究に取り組んできました。その結果、ヒトと同じように新生児期や幼若期は、放射線の被ばくによる発がんリスクが高いことが確認されました。しかし、臓器によっては、思春期(乳腺)や成体期(肺)の被ばくでリスクが高くなることもわかりました。また、胎児期は被ばくによる発がんリスクが小さく、その結果は最近の原爆被爆者の調査結果と一致します。そこで、発がんリスクがなぜ被ばく時年齢によって異なるのかを明らかにするため、組織幹細胞・前駆細胞の放射線応答に焦点を当てて研究を始めました。ここでは、その成果の一端を紹介します。

## 消化管モデルマウスの腸管クリプト細胞の放射線応答

ヒト家族性大腸腺腫症のモデルである *Apc<sup>Min/+</sup>* マウス (*Min* マウス) を用いた、消化管(小腸・大腸)腫瘍の被ばく時年齢(週齢)依存性が報告されています<sup>1)</sup>。*Min* マウスの小腸・大腸腫瘍の発生は、生後2-24日(新生児期から幼若期)の被ばくで発がんリスクが最も高く、それ以降になります。小腸・大腸の幹細胞はクリプトと呼ばれる絨毛のくぼんだ部分に存在します。成長している時の消化管では1つのクリプトが2つのクリプトに分かれながら増えています。クリプトの分裂に伴い、幹細胞も増えていきます。つまり、幼若期の小腸・大腸では、幹細胞が対称分裂の様式で増加しています。従って、この時期に被ばくによって発生した変異細胞は、指数関数的に増えることになり、それに伴いがんのリスクが増加すると考えられます。

次に、小腸・大腸のクリプトにおける細胞の放射線応答を、アポトーシス(細胞死)を指標に調べました。放射線の曝露によってDNAが傷つくと、がん抑制遺伝子である *p53* タンパクがリン酸化され細胞に蓄積し、傷ついた細胞をアポトーシスによって除去するか、あるいは細

胞増殖を停止し傷を修復して生存するかの2つの運命に分けます。成体期のクリプトでは、*p53* の蓄積に続いて、*Bax* や *Noxa* などのアポトーシスを誘導する遺伝子の転写が更新し、最終的にはDNAを切断するカスパーゼの活性化(*p53*-*Noxa*-caspase経路)によってアポトーシスが高頻度に観察されました。一方、発達期のクリプトでは、*p53* の細胞内の蓄積は成体期の場合と同様に起こりましたが、その後細胞の増殖にブレーキをかける *p21* の誘導(*p53*-*p21* 経路)が観察され、*Noxa* の誘導やそれに続くアポトーシスは見られませんでした。即ち、若齢期の小腸のクリプトの細胞は、被ばく後、細胞周期を停止させ、生存すること、即ち放射線抵抗性であることが明らかになりました<sup>2)</sup>。生き残った変異細胞が将来がんに進展する可能性が高くなると考えられます。

## 骨髓性白血病モデルマウスにおける放射線応答

マウスの放射線誘発骨髓性白血病の発生率は、系統、線量、そして被ばく時年齢(週齢)に大きく依存します。CBA や C3H、RF 系統のマウスにおいては放射線被ばくにより骨髓性白血病の過剰発生頻度が増加しますが、C57BL/6 や BALB/c 系統においては、骨髓性白血病の過剰発生頻度は非常に低いです。骨髓性白血病の発生率は、線形二次モデルで表される線量反応関係を示し、約 3Gy でピークがみられ、3Gy 以上の線量では減少に転じます。3Gy 以上の高線量被ばくでは、白血病の原因となる造血幹細胞が死滅してしまうため、発症頻度が下がるのだろうと考えられます。つまり、白血病の発症にはある程度被ばくした幹細胞が生き残ることが必要であると考えられます。

さて、骨髓性白血病は幼若期ではなく、成体期の被ばくで発生頻度が高くなります。小腸・大腸とは対照的です。骨髓中の造血幹細胞の総数は生後の年齢とともに増加しますので、これが成体被ばくのリスクが大きい理由だろうと考えられます。

次に、骨髓中の造血幹細胞の放射線応答を調べました。照射したマウスから骨髓を取り出し、造血幹・前駆細胞の生存を調べたところ、成体期マウスの細胞は幼若期のそれに比べ顕著な放射線抵抗性を示しました。興味深いことに、照射していないマウスの骨髓組織を取り出し、その後試験管内で照射した場合は生存率に年齢(週齢)の差は認められませんでした。これらの結果から、造血幹細胞の放射線応答には骨髓内の組織環境が重要であることが推察されました<sup>3)</sup>。そこで、放射線照射後の骨髓においてどのような遺伝子の発現が変化しているのか、網羅的遺伝子発現解析を行いました。その結果、サイトカイン・ケモカインと呼ばれる、細胞の増殖や機能を調節する分子の発現パターンが週齢によって大きく異なっていることがわかりました。放射線被ばく後 CSF2、FGF1、Kitl といった放射線の細胞傷害に対し防御的に働く遺伝子の発現の増加が成体期では見られたのに対し、1 週齢では観察されませんでした<sup>3)</sup>。これらの結果から、サイトカイン・ケモカインの年齢依存的な発現の違いが造血幹細胞・前駆細胞の放射線応答に大きく影響を及ぼしていることが考えられました。

## まとめと今後の解析

高い発がんリスクを示す子どもの時期の腸管クリプト細胞と成体期の造血幹細胞の放射線応答についての解析結果を紹介しました。両者に共通しているのは、発がんリスクが高い時期の細胞は高い生存率を示すとい

うことです。これは、損傷したDNAを持つ細胞が生き残る可能性が高くなり、変異DNAを持つ細胞から結果的に発がんが誘発される可能性が高くなる事を意味していると考えています。発がんリスクにおいて被ばく時年齢依存性を示す臓器には、肝臓、胸腺、腎臓、脳、乳腺があります。これらの臓器における幹細胞の放射線応答と発がんリスクの高い時期との関係を解析することにより、発がんリスクの高いことの放射線生物学的な共通性を明らかにできるものと期待し、解析を進めています。

被ばく時年齢の発がんリスク研究は、幹細胞やそれをとりまくニッチの生物学的研究でもあり、急速に増えている新たな知見を取り込みつつ研究を進めています。

## 参考文献

- Okamoto M, et al., Intestinal tumorigenesis in *Min* mice is enhanced by X-irradiation in an age-dependent manner. *J. Radiat. Res.*, 46:83-91, (2005)
- Miyoshi-Imamura T, et al., Unique characteristics of radiation-induced apoptosis in the postnatally developing small intestine and colon of mice. *Radiat. Res.*, 173:310-318, (2010)
- Ariyoshi K., et al., Age dependence of hematopoietic progenitor survival and chemokine family gene induction after gamma irradiation in bone marrow tissue in C3H/He mice. *Radiat. Res.*, 181:302-313, (2014)



## コラム WHO-NIRSシンポジウム 子どもの放射線被ばくを考える

発達期被ばく影響研究プログラム／武田 志乃

2014年12月8日-9日に国立がん研究センター 国際研究交流会館にて第2回WHO-NIRSシンポジウム「子どもの放射線被ばくを考える」が開催されました(第1回2009年)。第3期中期計画では「小児の放射線防護のための実証研究」が展開されており、その成果である炭素線と中性子線の小児期被ばくの発がんメカニズムに関する発表も行われました。このセッションではDr. Gerweckの陽子線での報告もあり、線質による違いが注目されました。他には医療における線量評価、小児被ばくの疫学研究、リスク低減、リスクコミュニケーションなどのセッションで構成され、国際的にも注目されている「小児放射線防護」を総合的にディスカッションできる貴重な場となりました(海外11名、所外内92名、放医研57名参加)。また、国立生育医療研究センター宮崎先生のCT画像診断における最適化に関する講演が、WFPI(World Federation of Pediatric Imaging)のnewsletterに紹介されました。子どもの放射線リスクに関する最新の情報共有に加え、今後の本プログラムの研究展開に向け心強いメッセージをいただきました。

# 中性子線のRBE ヒトでは得られない中性子線のRBE

発達期被ばく影響研究プログラム／柿沼 志津子・今岡 達彦・西村 まゆみ・鶴岡 千鶴・尚 奕

## なぜ中性子線の生体影響研究を開始したか

中性子線の生物影響を研究するため、低線量影響実験研究棟は建設されました。きっかけは、1999年9月に起こった東海村のウラン加工工場での臨界事故です。この事故で高線量のガンマ線と中性子線が放出され、作業員の方が被ばくしました。また周辺住民の方々も大きな不安を感じ、例えば、放射線リスクとしての発がん、お腹の中の赤ちゃんへの影響(胎児期影響)、子孫への影響(継世代影響)について心配されました。しかし、中性子線の人体への影響に関しては明らかにされていないことが多かったため、動物を用いて中性子線の影響について研究が始まりました。

放射線医学総合研究所(放医研)には、それまでサイクロトロンという施設で数MeV～20MeVの中性子線を照射できる施設がありました。しかし、中性子線の影響はエネルギーによって異なっており、細胞の実験などから臨界事故で問題となる2MeV以下の中性子線の影響は10MeV以上の中性子線の影響に比べてかなり大きいことが分かっていました。けれども、個体レベルでの2MeV以下の中性子線の生体影響に関するデータは、充分とは言えません。それは、2MeV以下の中性子線で動物を照射できる照射施設がなかったからです。そこで、低線量影響実験棟では平均2MeVの中性子線を発生するとのできる加速器を導入し、同時にSPF<sup>\*1</sup>レベルでマウスとラットの照射と飼育が可能な最新の設備の下で、動物実験を開始することになりました(図1)。

## 中性子線の新たな問題点

近年、新しい放射線治療機器の開発に伴い、中性子線の被ばくが心配されています。特に、エネルギーの高い強度変調放射線治療(IMRT)ではビーム軸上の構成物質(ターゲット、コリメーター)などと反応を起こし、中性子が発生します。また、陽子線や炭素線などの粒子線治



図1:低線量影響実験棟の生物照射室での中性子線照射

1階にある加速器で発生させた中性子線を、地下の照射室で照射します。照射室はSPF施設内にあり、動物を環境の変化が少ない条件で照射することができます

療においても中性子線が発生し、患者が被ばくします。これらは放射線のリスクが高いとされている子どものがん治療にも使用されることがあるため、中性子線被ばくによる発がんリスクの被ばく時年齢依存性を明らかにすることが重要となりました。

## 中性子線のRBEはなぜ大切か？

線質が異なる放射線において同じ効果を引き起こすために必要な吸収線量の比をRBE(Relative Biological Effectiveness, 生物学的効果比)といいます。例えば、同じ発がんリスクを与えるガンマ線(基準放射線)の線量が2Gyで、中性子線の線量は0.1Gyの場合RBEは20と

計算されます。RBEが明らかになれば、被ばくした中性子線の線量から発がんリスクを推定したり、防護の観点から治療や検査の条件を改善する基礎情報を得ることができます。ガンマ線やエックス線などの放射線については、線量と発がんリスクに関するヒトを対象とした多くの疫学調査報告がありますが、中性子線や粒子線の影響に関する疫学データは殆どありません。また、人のデータにはたばこや食事などの交絡因子<sup>\*2</sup>が含まれるため、低線量の評価をするには集団の生活習慣などの調査が必要となります。従って、中性子線や粒子線の生体影響評価は、被ばく線量を設定でき、かつ安定した環境で飼育できる動物実験の結果は大変期待されています。

## 研究内容の概要

2 MeV中性子線のRBEについては、複数の発がんモデル動物を用いて、寿命短縮といくつかの臓器の発がんリスクを指標として、被ばく時年齢依存性研究を行っています。① B6C3F1マウス(雄と雌)の寿命短縮および発がん(肝がん、TまたはBリンパ腫、肺がんなど): 寿命短縮と臓器別のリスク解析を行います。また、放射線発がんに関する遺伝子を明らかにします。② C3H/Heマウスの骨髄性白血病: 10MeVと2MeVの中性子線のRBEを求めます。③ Sprague-Dawley(SD)ラットの乳がん: 乳がんはヒトにおいても感受性の高い臓器です。2MeV中性子線のRBEを求めます。④ Wistarラット(WM/Nrs)の肺がん: 原爆被ばく者の調査では、肺がんリスクは被ばく時年齢依存性は小さいか、どちらかと言えば中高年齢の被ばくのほうがリスクが高いと報告されています。⑤ Ekerラットの腎がん: ガンマ線では、出生前後で感受性が高いことが明らかになりました。⑥ Ptch1マウスの髄芽腫: このマウスの髄芽腫発生は100mGyでも観察できます。より低線量域での中性子線のRBEを求めることが可能です。

## 研究成果と今後の解析

これまでに動物の飼育が終了し、病理解析やリスク解析を進めているところです。いずれも、ガンマ線や炭素線に比べて中性子線の方がより小さな線量で寿命短縮や発がん効果があることが明らかになってきています。結果として中性子線のRBEは10～20の範囲におさまる、被ばく時年齢によって大きく変動しないことも明らかになってきました(未発表データ)。小児における中性子線の寿命や発がんのRBEの報告は、これが世界初です。

これまでの、種々の系統のマウスやラットを使った研究から、被ばく時年齢にかかわらず中性子線の生体影響は大きいといえます。ガンマ線やエックス線、炭素線で誘発したがんの解析を進めてきましたが、これまでに解析したTリンパ腫や脳腫瘍では、放射線特有のゲノム変異があることが分かってきました<sup>1)</sup>。また、炭素線ではガンマ線より大きなゲノム欠失を作ることも明らかになってきました<sup>2)</sup>。今後、中性子線で誘発したがんのゲノム解析を行い、中性子線特有のゲノム変化を探索します。なぜ中性子線のRBEは大きい値になるかを、生物学的にまた分子生物学的に明らかにしていきたいと考えています。

## 参考文献

- Ishida Y., et al., Genomic and gene expression signatures of radiation in medulloblastomas after low-dose irradiation in Ptch1 heterozygous mice. Carcinogenesis 31, 1694-1701, (2010)
- Blyth B. J., et al., Genetic Analysis of T Cell Lymphomas in Carbon Ion-Irradiated Mice Reveals Frequent Interstitial Chromosome Deletions: Implications for Second Cancer Induction in Normal Tissues during Carbon Ion Radiotherapy. PLoS One 10(6), (2015)

\*1 SPF (specific pathogen free): 動物の飼育実験に障害になるような特定の病原菌が存在しない条件。

\*2 交絡因子: 調査対象とするばく露要因以外の原因で、それが調査対象とするばく露要因に関連する要因。

# 炭素イオン線による発がんのRBE 重粒子線治療における二次がんリスクの推定をめざして

発達期被ばく影響研究プログラム／今岡 達彦・柿沼 志津子・西村 まゆみ・細木 彩夏

## 放射線治療と二次がんリスク

診断・治療の進歩により、がん経験者の長期生存が一般的になりましたが、同時に治療の二次的影響も懸念されるようになってきました。特に、二次がん(初発がん治療後の他の種類のがん)が治癒後の長い人生に与える影響は見過ごせません。実際、小児がん経験者の約10%が30年以内に二次がんを経験していますが、その半分は放射線治療に起因するとの推定もあります<sup>1)</sup>。

重粒子線治療はこれまで、主に成人のがんを対象としていましたが、今では、小児がん治療の臨床研究を始めた施設もあります。重粒子線治療では、がん病巣へ線量を集中させることができますので、正常組織の被ばくを減らすことができ、二次がん発症リスクも低くなることが期待できます。しかし、重粒子線治療による二次がんリスクについては、まだ実際にはよくわかつていません。それを明らかにするには、治療後数年～数十年という長い観察時間が必要です。こうした背景もあり、新しい治療である重粒子線治療の二次がんリスクの推定のために、動物実験が進められています。

## 生物学的效果比(RBE)とは

炭素イオン線が人体内を通過する時に起こす電離の密度(LET、単位はkeV/ $\mu\text{m}$ )は、光子線(エックス線やガンマ線)に比べて高く(高LET)、細胞や生体への影響も大きくなります。ですから、同じ影響(効果)を得るために必要な線量は、光子線の方が炭素イオン線よりも大きくなります。その比が生物学的效果比(relative biological effectiveness、RBE)です。単純化して言えば、炭素イオン線のRBEとは、炭素イオン線が光子線の何倍強いかを表す数値です。

炭素イオン線ががん細胞を殺す効果についてはよく研究されていますが、がん(二次がんも含めて)を発生させる影響については、実はあまり研究されていません。け

れどもこれが分からないと、重粒子線治療をする時の患者さんの全身の被ばく線量から二次がんリスクを推定することができません。そのため、炭素イオン線が様々な組織に発がんを起こす効果のRBEを知る必要があります。

## 研究成果：RBEの年齢依存性を世界で初めて解明

当プログラムでは、小児における炭素イオン線の発がんに関するRBEを動物実験で求めています。実験で使う炭素イオン線は、がん治療の際に照射装置と病巣の間に位置する正常組織が被ばくするのと同程度のLET(入射面のLETが約14 keV/ $\mu\text{m}$ のプラトー領域)です。線量は、治療における正常組織の1回被ばく線量をカバーする0.2～2Gy程度です。この実験では、単回照射のRBEを求めました。

実験にはまずB6C3F1マウスを用いました。このマウスは化学物質の毒性評価によく使われ、放射線の発がん性を比較するのに良いからです。このマウスでは放射線で主に胸腺リンパ腫(血液がんの一種)や、肝がん、肺がん等が発生します。一方、一般的な小児がん放射線治療後の二次がんの約半分は乳がんですが、このマウスはあ



図1：ラットの照射実験

厳密に衛生管理された動物を照射するため、密閉容器に濾過滅菌した空気をポンプで送り込んでいます

まり乳がんになりません。そこで乳がん実験によく使われるSprague-Dawley(SD)ラットを用いた実験も行いました(図1)。

照射したラットを90週齢になるまで飼育し、炭素イオン線による乳がん発生のRBEを求めるとき、新生児期(1週齢)の被ばくで0.2、思春期前(3週齢)で1.3、思春期後(7週齢)で2.8という数値が得られました<sup>2)</sup>。重粒子線の発がんのRBEが年齢によって変化することを報告したのは、これが世界初です。これを見ると、乳がんを発生させる効果が高い思春期後に重粒子線治療をすると、光子線の治療の約2.8倍のリスクがあるように思うかもしれません。しかし、重粒子線はがん細胞を殺す作用が光子線より強いため、病巣に当てる線量が約3分の1と少なくて済み、病巣に線量が集中することから、正常組織に当たる線量はそれよりさらに少ないのです。ですから、この数値は、リスクが光子線の治療より高いとは考えにくいことを意味しています。

## その他の炭素イオン線発がん実験

上記の結果を含め、これまでに報告されている炭素イオン線の動物発がん実験の概要を表1に示しました。今後、いろいろな組織への影響による死亡を総合した指標である寿命短縮や、乳腺以外の組織の発がん、分割照射の場合について求めたRBE等を明らかにし、この表を充実させていく予定です。RBEが年齢によって異なるメカニズムも探っていきます。

表1：動物を用いた炭素イオン線の発がん実験とその概要

| 実験モデル     | 週齢      | 線量(Gy)               | 線質                    | 主な結果(数値はRBE)                              | 文献 |
|-----------|---------|----------------------|-----------------------|---|----|
| B6C3F1マウス | 6       | 0.4                  | 6cm SOBP <sup>a</sup> | ND <sup>b</sup> (0.5Gyと5Gyのエックス線の影響の中間程度) | 3) |
| B6C3F1マウス | 4～7     | 1.6～8.0 <sup>c</sup> | 6cm SOBP              | 1.2(胸腺リンパ腫)、1.4(寿命短縮)                     | 4) |
| C3Hマウス    | 12～18   | 5～65                 | 6cm SOBP              | 2.2(軟組織腫瘍)(単回照射・分割照射の両方)                  | 5) |
| SDラット     | 7       | 0.05～2.0             | 6cm SOBP              | 2(乳がん)(1Gyの場合)                            | 6) |
| B6C3F1マウス | 6       | 0.4                  | プラトー領域                | ND(雌で卵巣腫瘍増加。雄では有意な発がんなし)                  | 7) |
| Ekerラット   | 胎齢19日   | 1～3                  | プラトー領域                | 1.1(腎がん)                                  | 8) |
| SDラット     | 1, 3, 7 | 0.2～2.0              | プラトー領域                | 0.2, 1.3, 2.8(乳がん)(年齢に依存)                 | 2) |

<sup>a</sup> SOBP: 病巣に当てるものと同質の炭素イオン線。<sup>b</sup> ND: RBEを算出していない。<sup>c</sup> 1回0.4～2.0 Gyを1週間隔で4回照射。

## 参考文献

- Friedman *et al.* Subsequent neoplasms in 5-year survivors of childhood cancer: the Childhood Cancer Survivor Study. *J Natl Cancer Inst* 102: 1083-1095, (2010)
- Imaoka, Nishimura, Daino, *et al.*, Influence of age on the relative biological effectiveness of carbon ion radiation for induction of rat mammary carcinoma., *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 85: 1134-1140, (2013)
- Watanabe *et al.* Comparison of tumorigenesis between accelerated heavy ion and X-ray in B6C3F1 mice. *J Radiat Res* 39: 93-100, (1998)
- Kakinuma *et al.* Effect of carbon ions on life span shortening and tumorigenesis in mice. *Biol Sci Space* 18: 190, (2004)
- Ando *et al.* Tumor induction in mice locally irradiated with carbon ions: a retrospective analysis. *J Radiat Res* 46: 185-190, (2005)
- Imaoka *et al.* High relative biologic effectiveness of carbon ion radiation on induction of rat mammary carcinoma and its lack of H-ras and Tp53 mutations. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 69: 194-203, (2007)
- Watanabe *et al.* Induction of ovarian tumors by heavy ion irradiation in B6C3F1 mice. *Oncol Rep* 5: 1377-1380, (1998)
- Nakadai *et al.* HZE radiation effects for hereditary renal carcinomas. *Biol Sci Space* 18: 177-178, (2004)

# 発達期被ばくにより誘発された腫瘍の分子生物学的特徴

発達期被ばく影響研究プログラム／臺野 和広・砂押 正章・高畠 賢・ブライス ベンジャミン・鶴岡 千鶴

一度に大量の放射線被ばくをした場合、白血病の発生率が増加すること、特に小児期の被ばくによるリスクが高いことが分かっています。近年では、小児期でのX線コンピューター断層撮影(CT)による診断、及び放射線治療後的小児がん過剰リスクに関する論文が発表されています。また、乳腺は思春期に分泌される女性ホルモンの作用で発達を始める組織ですが、ヒトを対象とした疫学調査から、放射線発がん感受性の最も高い組織の一つであることが分かっています。新たな知見として、発達期の放射線被ばくで誘発されるがんは、成体期の被ばくで誘発されるものとは異なる遺伝子異常をもつことが分かってきました。本稿では、マウスのT細胞リンパ腫<sup>\*1</sup>とラットの乳がんに見られる分子生物学的特徴について紹介します。

## マウスT細胞リンパ腫のゲノム異常

我々が解析したマウスT細胞リンパ腫は、新生児期(1週齢)、幼若期(4週齢)、若齢成体期(8週齢)のB6C3F1系統の雌マウスに1.2GyのX線を1週間おきに4回(総線量4.8Gy)全身照射することにより誘発しました。そして、誘発されたT細胞リンパ腫において、4、11、19番染

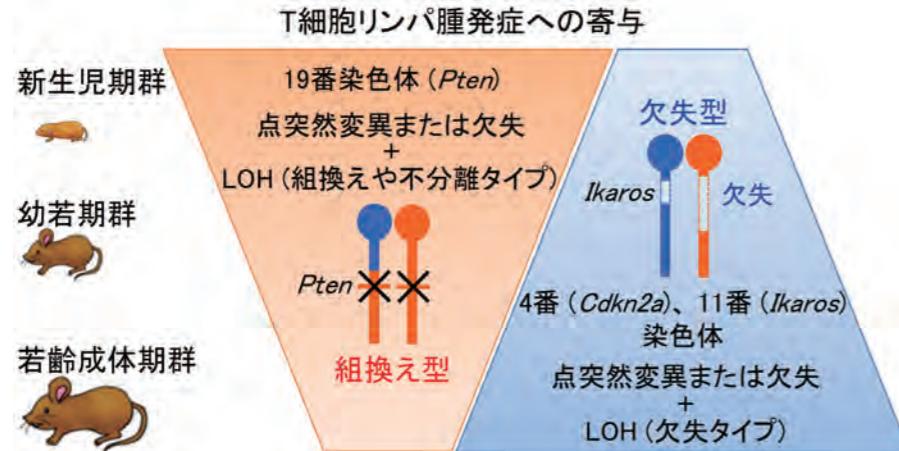


図1: 被ばく時の年齢が異なるマウスに誘発されたT細胞リンパ腫に観察されるゲノム変異パターン  
新生児期、幼若期、若齢成体期からの放射線被ばくにより誘発されたT細胞リンパ腫におけるゲノム異常を模式的に示しています(文献1をもとに作成)。

## ラット乳がんの遺伝子発現パターン

本研究では、思春期を迎える前(3週齢)と迎えた後(7週齢)にγ線(2Gy)を全身照射したSprague-Dawley系統の雌ラットに発症した乳がん(腺がん<sup>\*3</sup>)の解析を行いました<sup>2)</sup>。その結果、思春期後の被ばくにより発症した乳がんは、卵巣ホルモン(エストロゲン等)に依存性を示すがんである一方で、思春期前の被ばくにより発症した乳がんは、卵巣ホルモンに依存しないタイプのがんであることや、卵巣ホルモンとは異なる増殖因子を必要とし

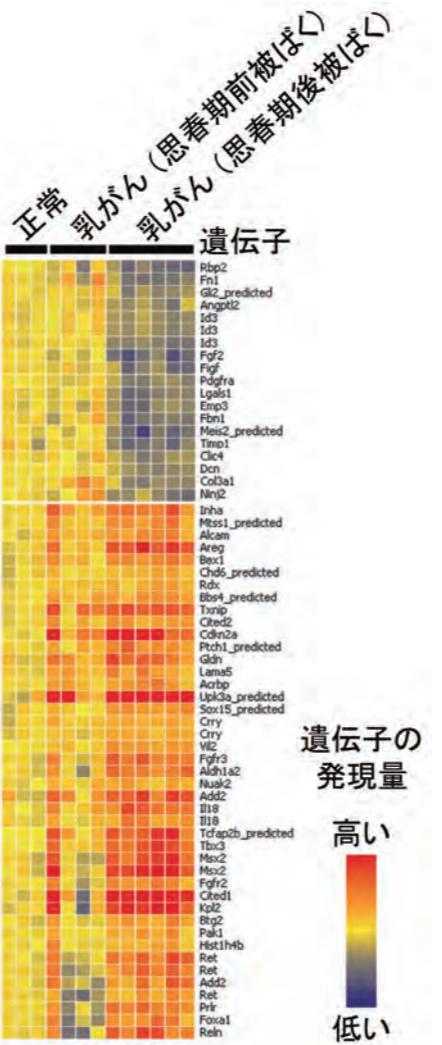


図2: 思春期前後の放射線被ばくにより誘発されたラット乳がんに観察される遺伝子発現パターン  
正常組織、思春期を迎える前の放射線被ばくによって発症した乳がん、思春期を迎えた後の放射線被ばくによって発症した乳がんにおける乳腺の発生に関係する遺伝子群の発現量の違いを色分けして示しています(文献2より改変)。

ていることが分かりました。また、思春期前の被ばくにより発症した乳がんとは異なり、思春期後の被ばくにより発症した乳がんでは、乳腺の発生に関係するいくつかの遺伝子に、その発現量が高いものと低いものがあることが分かりました(図2)。これらの結果は、思春期の前後という被ばく時期の違いにより分子生物学的に異なるタイプの乳がんが発症することを示しています。

## 今後の展望

当プログラムの研究を通して、本稿で紹介した腫瘍の分子生物学的特徴以外にも、放射線で誘発されたT細胞リンパ腫の遺伝子発現パターンや、乳がん細胞におけるDNAメチル化パターンにも被ばく時の年齢による違いがあることが分かってきていますが、その全体像が明らかになったわけではありません。発達期の放射線被ばくにより誘発された腫瘍の分子生物学的特徴を明らかにすることは、小児期における発がんリスクを科学的に説明する上で重要なだけでなく、発がんの原因となる遺伝子やがん細胞の増殖に作用する食品成分や薬を用いたがんの予防法や治療法等の開発にも繋がります。今後、次世代シーケンサーを始めとするより網羅的かつ高精度な最先端の解析手法を用いて、これまでの解析では見つけることが出来なかった特徴や発がんメカニズムを明らかにすることで、小児期の放射線被ばくによる発がんのリスク推定やがん予防等の応用展開の広がりが期待されます。

## 参考文献

- Sunaoshi, et al., The effect of age at exposure on the inactivating mechanisms and relative contributions of key tumor suppressor genes in radiation-induced mouse T-cell lymphomas, *Mutat Res.*, 779 : 58-67 (2015)
- Imaoka, et al., Pre- and Postpubertal Irradiation Induces Mammary Cancers With Distinct Expression of Hormone Receptors, ErbB Ligands, and Developmental Genes in Rats, *Mol Carcinog.*, 50 : 539-552 (2011)

\*1 マウスT細胞リンパ腫：胸腺において発症する血液細胞の腫瘍で、ヒトT細胞性リンパ性白血病のモデルとして用いられています。また胸腺は、T細胞の分化、成熟など、免疫系に関与する器官で、新生児期から発達し、成体期になると退縮を始めます。

\*2 LOH：Loss of heterozygosityの略語。ヘテロ接合性の消失とも呼ばれ、がん抑制遺伝子の不活性化を引き起こす機構の1つ。

\*3 腺がん：腺組織を構成している細胞から発生する悪性腫瘍。

## 発達期におけるウランの挙動・影響

発達期被ばく影響研究プログラム／武田 志乃

原子力発電の燃料として知られるウランは地殻成分として環境に広く分布しており、食物等を介し微量ながら日々摂取している核種の一つです。通常、環境に存在するウラン濃度は低いため健康上問題とはなりませんが、高濃度のウランを含む地下水を飲用した場合には腎障害を引き起こすことが報告されています<sup>1)</sup>。中でも、幼児で重症化することから、小児期における内部被ばく影響は、今後長期化する廃炉作業に鑑み社会的に高い関心が向かれています。これまで当プログラムで取り組んできた発達期におけるウランの挙動・影響について紹介します。

### 部位選択的ウラン侵襲と腎臓組織影響

ウランの毒性作用機序は十分には解明されていませんが、 $\alpha$ 線核種としての放射線毒性と重金属としての化学毒性を併せ持つとされ、飲水等から体内に取り込まれたウランはウラニルイオン( $\text{UO}_2^{2+}$ )として生体成分と相互作用すること(化学毒性)で主に毒性を生じると考えられています。このような体内に移行した可溶性ウランの毒性の強さを検討するため、年齢の異なるラットに酢酸ウランを1回皮下投与し、腎臓のウラン挙動や感受性(細胞死誘発・組織損傷)を比較しました(表1)。今回の投与量の範囲では、いずれの年齢も用量依存的に腎臓中ウラン濃度は増加しました。マイクロビームを用いた先端分析技術により、ウランは腎臓近位尿細管の中でも下流部(S3セグメント)に選択的に蓄積し、組織損傷が生じること<sup>2,3)</sup>、S3尿細管上皮には平均腎臓ウラン濃度の50倍以上のレベルのウラン濃集部が散在すること<sup>4)</sup>等がわかつてきました。S3尿細管は新生期から幼齢期にかけて急

激に新生し、成体の腎臓構造と同様となります。そのため、腎臓のウラン濃度はS3尿細管の量に依存し、低用量の場合は腎臓ウラン濃度に準じた感受性となりました。しかしながら、高用量では幼齢期で致死性が増大するなど、発達期腎臓に特有の感受性を呈しました。

### 遅い腎臓ウラン排泄とウラン濃集部の残存

このように、ウラン急性腎otoxicityは低用量であれば発達期は成体期よりも毒性が低いと考えられます。しかしながら、発達期では腎臓のウラン排泄が遅く、また急性腎otoxicity回復期においても成体期と同等のレベルのウラン濃集部が残存することから、将来的な晚発影響が懸念されます。例えば、発達期腎臓の組織構造は成体の構造とは大きく異なることから、短い飛程のウラン $\alpha$ 線(約30μm)の局所線量付与を受ける細胞が発達期と成体期で異なり、発達期被ばく特有の晚発影響を呈することも考えられます。現在腎がんモデルラットで検討を行っており、腫瘍病変の頻度や組織形態の年齢による違いを明らかにし、局所線量影響に関するエビデンスを積み上げていきたいと思います。

### 参考文献

- Magdo *et al.*, Grand Rounds: Nephrotoxicity in a prepubertal child exposed to uranium from contaminated well water, Environ Health Perspect 115, 1237-1241, (2007)
- Homma-Takeda *et al.*, Elemental imaging in kidney of adult rats exposed to uranium acetate. Nucl Instr Meth Phys Res B 267, 2167-2170, (2013)
- Homma-Takeda *et al.*, Uranium dynamics and developmental sensitivity in rat kidney, J Appl Toxicol 279, 627-631, (2013)
- Homma-Takeda *et al.*, Cellular localization of uranium in the renal proximal tubules during acute renal uranium toxicity, J Appl Toxicol (in press)

表1：ウラン急性腎otoxicity年齢比較<sup>3)</sup>

| 項目                                 | 年齢比較            |
|------------------------------------|-----------------|
| 平均腎臓ウラン濃度                          | 成体期 > 幼齢期 > 新生期 |
| 感受性 低用量(0.1-0.5 mg/kg body weight) | 成体期 > 幼齢期 > 新生期 |
| 高容量(1-2 mg/kg body weight)         | 幼齢期 > 成体期 > 新生期 |
| 腎臓からのウラン排泄                         | 成体期 > 幼齢期 > 新生期 |
| ウラン濃集部の局在量                         | 成体期 = 幼齢期 = 新生期 |

## UNSCEAR 2013年報告書第II巻 「子供の放射線被ばくによる影響」の要点

福島復興支援本部長期低線量被ばく影響プロジェクト／山田 裕  
発達期被ばく影響研究プログラム／島田 義也

表1: 小児期被ばくによる発生率の成人に対する比較

| がんの部位・種類  | 発生率の増加 | 同程度    | 発生率の低下 | 証拠の確かさ                |
|---|--------|--------|--------|-----------------------|
| 乳房  | ○      |        |        | 強                     |
| 脳   | ○      |        |        | 強                     |
| 甲状腺   | ○      |        |        | 強                     |
| 白血病(慢性リンパ球性除く)  | ○      |        |        | 強                     |
| 皮膚(メラノーマ除く)   | ○      |        |        | 中                     |
| 胃(死亡率)  | ○(ERR) | ○(EAR) |        | 中                     |
| 大腸  | ○(EAR) | ○(ERR) |        | 弱                     |
| 膀胱  |        | ○      |        | 中                     |
| 肝臓  |        | ○      |        | 弱                     |
| 肺   |        |        | ○      | 中                     |
| 食道、子宮、卵巣、腎臓、副甲状腺<br>非ホジキンリンパ腫、骨髄腫、直腸、小腸、膀胱、子宮頸部<br>前立腺、ホジキンリンパ腫 |        |        |        | 放射線誘発リスクが低く、証拠は不確かである |

ERR: 過剰相対リスク EAR: 過剰絶対リスク

(UNSCEAR2013を基に改変)

子どもに対する放射線影響に関する最近の研究について、UNSCEARが報告書にまとめました。動物実験から疫学まで広範な研究成果が詳細に記述され、子どもの放射線被ばく研究に関わる者にとってこれまでの研究の解釈や今後の研究課題の設定に参考となる重要な情報が含まれています。

- 1) 被ばく線量が同じであれば、一般的に子どもは成人より高い発がんリスクを持つことになります。子どもの時に被ばくした集団のがんの生涯リスク推定値は、全年齢において被ばくした集団より2~3倍高くなると推定されています(すべての種類のがんのリスクを合算した生涯リスク予測モデルに基づいて計算)。
- 2) 放射線による子どものがん発生率は成人よりもばらつきが大きく、がんの種類、年齢及び性別に依存します。UNSCEARがレビューした23種類のがんにおいて、子どもにおける放射線高感受性の証拠が強いのは、乳房、甲状腺及び脳のがん、そして白血病(慢性リンパ性を除く)です。また証拠は中程度ですが、膀胱のがんは、子どもの放射線感受性は成人と同程度と見積られています。一方、肺がんは子どもは成人よりも感受性が低いことが示されています。また、リスクの指標によって結果が異なる部位もあります(表1、UNSCEAR2013第II巻表13より改変)。
- 3) 高線量被ばくで生じる影響(いわゆる確定的影響)については、子ども期の被ばくが成人期の被ばくより多くのリスクを引き起こすいくつかの実例が認められています(例えば、認知障害、白内障及び甲状腺結節のリスク)。
- 4) 放射線被ばくの子孫への遺伝性影響に関して、幼少期の原爆被爆者や子ども期のがんに対して放射線治療

を受けた患者の子孫を調べた研究では、現在のところ明確に認められていないと結論されています。

- 5) 外部被ばくの場合、子どもは身体のサイズが小さいため組織による遮蔽効果が低く、同じ被ばく状況であっても組織・臓器の吸収線量は大人に比べて大きくなります。また内部被ばくの場合、物質代謝や生理学的な要因が大人と子どもで異なるため、年齢によって組織・臓器の吸収線量に差異が生じることがあります(例えば、ヨウ素は子どもの甲状腺に蓄積されやすく、放射性ヨウ素の摂取量が同じでも甲状腺の吸収線量は子どもで高い)。
- 6) 報告書では将来に向けた重要な研究分野として、子どもに関する潜在的なリスクの可能性がある(a)高自然放射線量地域における被ばく、(b)インターベンショナル透視を含む医療手技による高線量被ばく、そして(c)がんの放射線治療被ばくによる影響評価があげられています。放射線被ばくの影響、メカニズム及びリスクに関して、子どもと成人での差異の詳細と全貌を明らかにし、子どもにおける放射線防護をより適切なものに改善して行くために、さらなる研究の継続が必要であると述べられています。

する情報を収集し、とりまとめる任務を負う。人間と環境に及ぼす影響を評価した結果を国連総会に毎年報告し、4~5年の間隔で、詳細な科学的内容の附属書を伴う包括的報告書を提出、公刊している。

参考資料 1) <http://www.unscear.org>

### ミニコラム UNSCEAR(アンスケア)とは?

UNSCEAR(原子放射線の影響に関する国連科学委員会)<sup>1)</sup>は、国連総会直属の委員会である。全ての線源(自然及び人工)に由来する電離放射線と放射性物質のレベルに関

# 放射線影響研究資源アーカイブの構築に向けての取り組み

<sup>1</sup> 発達期被ばく影響研究プログラム・<sup>2</sup> 福島復興支援本部長期低線量被ばく影響プロジェクト／森岡 孝満<sup>1,2</sup>・山田 裕<sup>2</sup>・プライス ベンジャミン<sup>1</sup>・今岡 達彦<sup>1,2</sup>・柿沼 志津子<sup>1,2</sup>

大規模な動物を用いた放射線被ばく影響研究は、旧ソ連、米国、ヨーロッパおよび日本において第二次世界大戦から冷戦期にかけて数多く行われ、膨大な動物実験資料(動物試料と実験データ)が蓄積されてきました。これらの動物実験資料は、低線量被ばく影響の解明を握る貴重な資料と考えられて来ましたが、保管・管理の維持に掛かる予算面の問題により、既に多くが失われています。現在では、同様な大規模動物実験は、倫理面(動物愛護の観点)や資金面により再現することは極めて困難な状況にあります。旧ソ連、米国およびヨーロッパの研究者らは、欧州連合(EU)、米国エネルギー省などの支援を得て、このような遺失の危機的状況にある貴重な動物実験資料の保存を開始しています<sup>1,2)</sup>。現在、放医研においても膨大な動物実験資料が蓄積されています。発達期被ばく影響研究プログラムと長期低線量被ばく影響プロジェクトは、このような貴重な動物実験資料を保存すべく、研究基盤センター情報基盤部との共同により放射線影響研究資源アーカイブ(J-SHARE, Japan-StoreHouse of Animal Radiobiology Experiments)の構築を開始しています。

## J-SHAREにアーカイブ化予定の動物実験資料

2004年度から放射線防護研究センター発達期被ばく影響研究プログラムは、大規模な動物実験を用いて小児期の放射線被ばく影響研究を開始し、膨大な動物実験資料を蓄積しています。加えて、東日本大震災後に設置された福島復興支援本部長期低線量被ばく影響プロジェクトでは、国民の関心事となった低線量率被ばく影響研究を開始し、動物実験資料を蓄積しつつあります。現在、

| 表1 :J-SHAREにアーカイブ化予定の動物実験資料       |      |         |        |                               |
|-----------------------------------|------|---------|--------|-------------------------------|
| 動物種                               | 線種   | 照射条件    | 動物数(匹) | 照射時年齢(E:胎生日齢、W:週齢)            |
| B6C3F1マウス<br>雌雄<br>寿命実験           | ガンマ線 | 単回      | 2300   | E3, E13, E17, 1W, 3W, 7W, 15W |
|                                   | ガンマ線 | 分割      | 1460   | 1W, 7W, 15W                   |
|                                   | ガンマ線 | 低線量率連続* | 1400   | 1W, 7W, 15W                   |
|                                   | 炭素線  | 単回      | 1800   | E3, E13, E17, 1W, 3W, 7W, 15W |
|                                   | 炭素線  | 分割      | 960    | 1W, 7W                        |
|                                   | 中性子線 | 単回      | 2300   | E3, E13, E17, 1W, 3W, 7W, 15W |
|                                   |      |         | 合計     | 10220                         |
| Sprague Dawley ラット<br>雌<br>乳腺腫瘍実験 | ガンマ線 | 単回      | 600    | E3, E13, E17, 1W, 3W, 7W, 15W |
|                                   | ガンマ線 | 低線量率連続  | 500    | 3W, 7W                        |
|                                   | 炭素線  | 単回      | 600    | E3, E13, E17, 1W, 3W, 7W, 15W |
|                                   | 中性子線 | 単回      | 500    | 3W, 7W                        |
|                                   |      |         | 合計     | 2200                          |
| Wistar ラット<br>雌<br>肺腫瘍実験          | X線   | 単回      | 757    | 1W, 5W, 15W                   |
|                                   | 中性子線 | 単回      | 480    | 5W, 15W                       |
|                                   | 中性子線 | 分割      | 192    | 5W, 15W                       |
|                                   |      |         |        | 合計 1428                       |

全実験群において非照射の動物を含む。

\*長期低線量被ばく影響プロジェクトによる研究

J-SHAREには、被ばく時年齢別(胎生期、小児期および成体期)、線種別(ガンマ線、炭素線、中性子線)、および被ばく条件別(単回、分割および低線量率連続)による寿命への影響評価研究と、乳がん、肺がんの発がんリスク評価研究で得られたマウスやラットの動物実験資料のアーカイブ化が進められています(表1)。加えて、遺伝的にがんに罹患しやすい動物モデルを用いた放射線影響研究、放射線と化学発がん物質との複合曝露影響研究およびカロリー制限などによる放射線誘発がんの予防研究の動物実験資料も含まれています。

## 動物実験病理情報支援システムによるデータ管理

J-SHAREには、2014年度に発達期被ばく影響研究プログラムは、大規模な動物実験を用いて小児期の放射線被ばく影響研究を開始し、膨大な動物実験資料を蓄積しています。加えて、東日本大震災後に設置された福島復興支援本部長期低線量被ばく影響プロジェクトでは、国民の関心事となった低線量率被ばく影響研究を開始し、動物実験資料を蓄積しつつあります。現在、

のデータは、放医研内の端末のコンピュータより放射線の線種別、被ばく線量別、動物種、病理診断別などの条件により検索可能です。これまでに、J-SHAREに保存されている凍結試料と病理組織画像を利用して得られた研究成果をいくつか発表しています<sup>3-7)</sup>。

## J-SHAREの将来展望

発達期被ばく影響研究プログラムは、茨城大学、長崎大学、首都大学東京、長崎大学、弘前大学、琉球大学などの所外研究機関とJ-SHAREを利用した共同研究を進めています。今後、J-SHAREを米国のJANUS(<http://janus.northwestern.edu/janus2/index.php>)アーカイブや欧州のSTORE(<http://www.rbstore.eu/>)のアーカイブと連携して国内外の研究機関へ公開し、世界の研究者との共同研究を通して放射線影響研究の成果の最大化に向けた有用なツールを目指し構築を進めていきたいと考えています(図1)。

なお、本特集の動物実験については、放医研の動物実験委員会で審査され、理事長の承認を得た動物計画書に基づいて実施しました。

## 参考文献

- Abbott A., Radiation risks: Raiders of the lost archive., Nature 485: 162-163, (2012)
- Editorial, The low-level nuclear threat., Nature 482: 5, (2012)
- Kakinuma S, et al., Combined exposure to X-irradiation followed by N-ethyl-N-nitrosourea treatment alters the frequency and spectrum of Ikaros point mutations in murine T-cell lymphoma., Mutat Res 737 (1-2) : 43-50, (2012)
- Iwata K, et al., Co-operative effects of thoracic X-ray irradiation and N-nitrosobis (2-hydroxypropyl) amine administration on lung tumorigenesis in neonatal, juvenile and adult Wistar rats., Toxicol Appl Pharmacol 267 (3) : 266-275, (2013)
- Shang Y, et al., Cancer prevention by adult-onset calorie restriction after infant exposure to ionizing radiation in B6C3F1 mice., Int J Cancer 135 (5) : 1038-1047, (2014)
- Morioka T, et al., Ionizing radiation, inflammation, and their interactions in colon carcinogenesis in Mlh1-deficient mice., Cancer Sci 106 (3) : 217-226, (2015)
- Blyth B, et al., Genetic Analysis of T Cell Lymphomas in Carbon Ion-Irradiated Mice Reveals Frequent Interstitial Chromosome Deletions: Implications for Second Cancer Induction in Normal Tissues During Carbon Ion Radiotherapy., PLoS One, 10 (6) : e0130666, (2015)

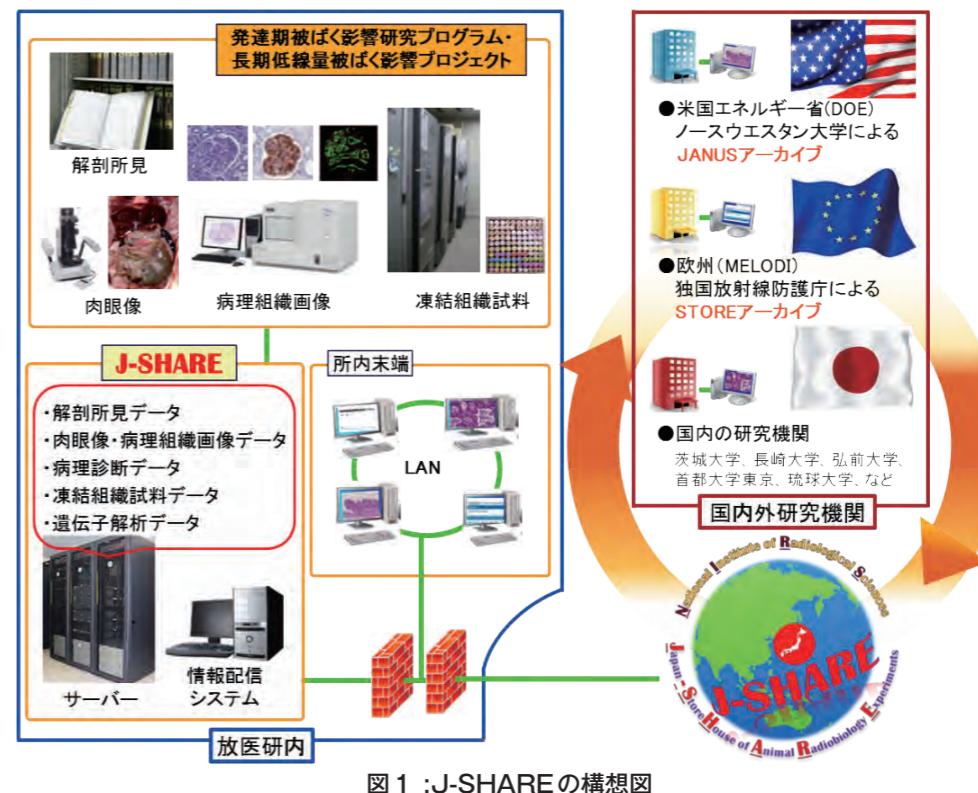


図1 :J-SHAREの構想図

## 特集2

## 福島復興支援本部 －福島の復興・再生に向けて

2011年3月11日 東日本大震災発生から17時間後 - 放射線医学総合研究所(放医研)は、東京電力福島第一原子力発電所(東電福島第一原発)事故の初期対応にあたるため、オフサイトセンター(双葉郡大熊町)に緊急被ばく医療支援チームREMATを派遣し、住民や緊急作業員の汚染検査、除染や爆発による汚染傷病者の処置を行いました。時を同じくして、事故対応の最前線基地・Jヴィレッジ(双葉郡楢葉町)には、放射線防護や計測の専門家を派遣し、原子炉の緊急冷却作業に当たる消防士、警察官、自衛隊員等の放射線防護や負傷者の除染指導にあたりました。千葉市の本所でも、汚染患者の受け入れや原発作業員の汚染検査、一般市民からの健康影響に関する電話相談、放射線影響に関する資料の公開など、専門機関として研究所一丸となって対応しました。

放医研ではこの4年間、政府の「東日本大震災からの復興の基本方針(2011年7月)」に基づき、被災地の一刻も早い復旧・復興に貢献するという観点で、調査・研究に取り組んできました。本稿では大きく、原発事故に起因する放射線が復旧作業員や住民の健康に与える影響、福島県の住民を取り巻く環境に与える影響についての調査・研究内容とその結果や得られたデータに基づく知見を中心に、福島の復興・再生に資する取り組みを紹介します。

今後福島県においては、住民の帰還の促進、廃炉・汚染水対策、中間貯蔵施設の整備等における取り組みが加速されていくでしょう。放医研は専門性を發揮して、住民や除染・廃炉等の作業に携わる方々の安全確保や健康維持につなげるべく、調査・研究を続行し、科学的な知見を提供していきます。

福島復興支援本部 副本部長／石田 敦郎



### 健康影響調査 プロジェクト

福島県立医科大学実施の県民健康調査における外部被ばく線量推計  
福島第一原発事故に関わる作業員等の健康調査  
放射線と健康に関する情報を記載したニュースレターの発行  
県民の初期内部被ばく線量推計に関する研究

### 環境動態・影響 プロジェクト

環境生物への影響に関する調査・研究(捕獲・採取した生物の影響評価、線量評価、実験室内での照射・飼育観察)  
放射性核種の挙動と住民への影響に関する調査・研究

### 研修事業

#### (人材育成センターで実施)

原発事故を契機とした、放射線被ばくによる健康影響への関心の高まりを受け、被ばく医療関連研修の充実、自治体職員や教員等を対象とした講習、福島県内をはじめとする学生向けの研修など、新たなプログラムの開発を進めています。また、2013年4月からは人材育成センターとして組織を独立し、新しい研修施設を開設して取り組んでいます

### 長期低線量被ばく影響 プロジェクト

低線量率放射線の連続被ばくによる主に小児への生体影響の解明とリスクの低減研究

### WBC性能維持支援事業

ホールボディーカウンタ(WBC)による内部被ばく検査の信頼性を確保するために、自治体等からの委託により、自治体や医療機関等が保有するWBCの校正やWBC測定に係る研修などを実施。実施件数は福島県内を中心約40か所

### 一般電話相談対応事業

国民の皆様の不安や疑問に応えるための、放射線と被ばくによる健康影響に関する電話相談対応を実施。対応件数は原発事故発生以来、延べ約19,000件

# 復旧作業員等の被ばくと健康にかかわる調査

健康影響調査プロジェクト／吉永 信治・土居 主尚・川口 勇生

東電福島第一原発における事故の発生から4年以上経過し、すでに数万人以上の人々が緊急作業や復旧作業など様々な対応活動に従事してきました。本稿ではこれらの復旧作業員等の被ばく線量や健康影響について、国際機関の報告書を簡単に紹介した上で、健康影響調査プロジェクトで実施している調査の概要を説明します。

## 緊急作業員等の放射線被ばく

東電福島第一原発事故に対しては、同原発の敷地内で緊急作業に従事した東電と協力企業の作業員約2万人の被ばく線量について、東電がその集計結果を定期的に報告しているほか、世界保健機関(WHO)や原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)などの国際機関が評価を行っています<sup>1,2)</sup>。それらによると、東電と協力企業の緊急作業員が2011年12月16日までに受けた実効線量の平均は約12mSv(ミリシーベルト)となっています。この数値は、1986年に旧ソビエト連邦で起きたチェルノブイリ事故の緊急作業者における線量(平均約120mSv)と比べて約10分の1程度と低いのですが、福島県の一般住民が事故後4か月間に生活環境中で追加的に受けたと推定されている線量(平均約0.8mSv)と比べれば高くなっています。

一方、東電と協力企業以外の作業員については、概して被ばくの実態が明らかにされていませんが、UNSCEARは日本政府から提供されたデータに基づき、UNSCEAR 2013年報告書に結果を取りまとめました。その報告書によると、消防士(敷地内作業者249人)、自衛隊員(敷地内作業者147人、敷地外作業者8,458人)、警察官(敷地内作業者13人)においては、外部被ばくの実効線量10mSv未満の作業員が大部分で、100mSvを上回る作業員はいませんでした。また、内部被ばくが推定された作業員については、3.8mSvと推定された1人を除けばその線量は全員1mSv未満でした。これらの事実は、被ばくの管理が厳格に行われていたことを反映しています。

## 放医研の健康調査

1986年に旧ソビエト連邦で発生したチェルノブイリ原子力発電所事故に対応した緊急作業員等については、がんや非がん疾患など様々な疾患が増加していることが報告されています<sup>3)</sup>。一方、東電福島第一原発事故の緊急作業員等が受けた放射線量は、チェルノブイリ事故の復旧作業員等が受けた放射線量に比べてかなり低いものの、特定の作業員においては甲状腺がんや白血病等の健康リスクが将来的に増加する可能性が指摘されています<sup>1)</sup>。

このような背景のもと、放医研では、文部科学省の管轄で実施する国家的な事業として、警察、消防、自衛隊などに属する復旧作業員等を対象に、作業中に受けた放射線被ばくとその後の健康状態を長期的に追跡調査する事業を開始しました。図1に事業の全体像を示します。調査の主な目的は、低線量放射線の健康影響を評価することに加え、得られた情報をこれらの復旧作業員等の健康管理に役立てることです。

2011年度以降、事故の初動活動にあたった関係機関に協力を要請し、一部の機関と調査実施のための協定を締結するとともに、「健康影響調査のためのデータベースシステム」で述べますように、長期の追跡調査に備えたデータベースの開発を行ってきました。また、ベースライン調査として、生活習慣や既往歴などに関する質問票を用いた調査を実施しました。今後は、調査協力者の方の健康状態の変遷を質問票などを用いて長期的に調べていく予定です。

調査を実施するためにはご本人からの協力が不可欠であり、調査に協力してくださる人々に向けたサービスとして、放射線や健康にかかわる情報を掲載したニュースレターの発行や、電話による健康相談窓口の開設を行ってきました。また、今後は講演会等の実施により、調査に対する理解と協力をさらに高めていきたいと考えています。

これまでに得られた情報から判断する限り、東電福島第一原発事故に対する復旧作業員等において、作業に伴

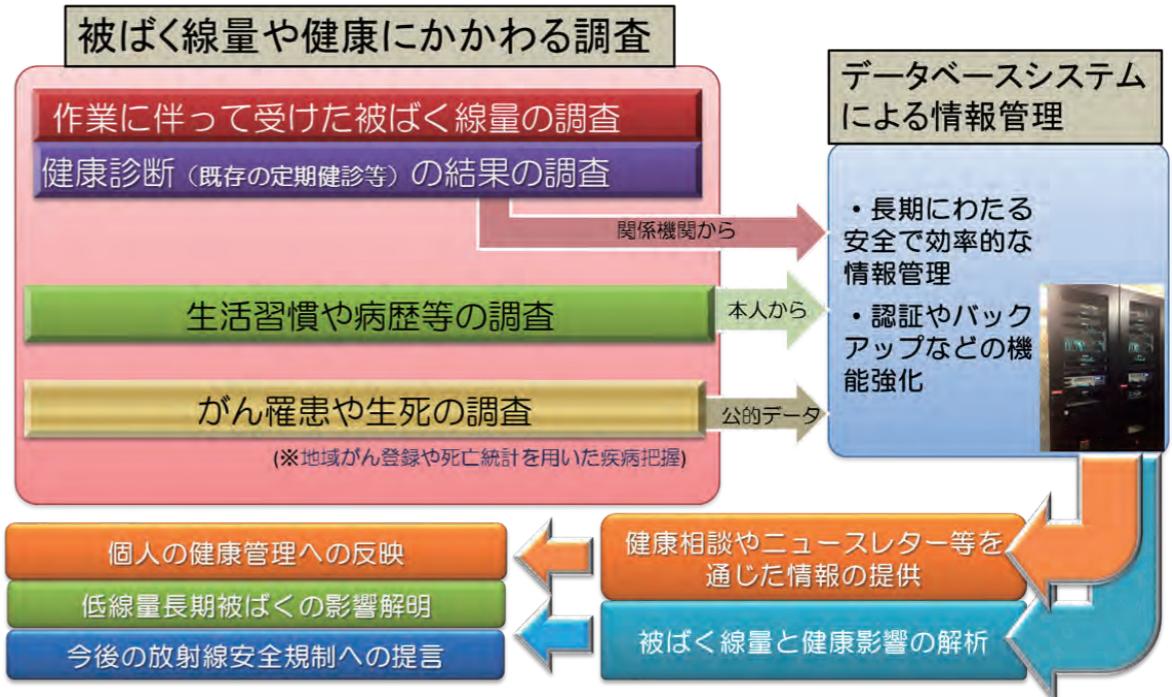


図1:調査の概要  
被ばく線量や健康に関して収集した情報を解析し、低線量放射線の健康影響評価や健康管理に役立てていきます

う放射線被ばくを原因とした何らかの健康影響が現れるることは考えにくいと思われます。一方で、追跡調査を継続し、得られた情報を分析・評価することにより、健康リスクが将来的に過度に増加していないことを確認することは重要であると考えています。私どもはこのような役割を果たすべく、調査を継続し、得られた知見を社会に発信することにより、復旧作業等に従事した方々やそのご家族の安心につなげていきたいと考えています。

## 参考文献

- 1) World Health Organization. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation. Geneva (2013)
- 2) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation, UNSCEAR 2013 Report Vol. I, Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami, United Nations, New York, (2013)
- 3) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2008 Report Vol. II, Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accidents, United Nations, New York, (2011)

# 健康影響調査のためのデータベースシステム

健康影響調査プロジェクト／長谷川 慎・奥田 保男

健康影響調査プロジェクトでは、事故直後に東電福島第一原発およびその周辺で様々な作業に従事された警察官などの復旧作業員の方々の健康影響調査を行うため、毎年の健康診断の結果を収集、また、4~5年毎に既往歴や生活習慣等の調査を行っています。これらの健康診断結果や調査結果を基に統計学的な解析を行い、健康への影響の調査を進めています。このためには、収集した健康診断結果や調査結果についてもアクセス可能で、かつ、解析しやすい形式で保管することにより利用しやすくしたり、調査期間中に渡って情報の完全性を保ち、永続的に利用できるように保管したりする必要があります。また、個人の健康に関する情報を扱うため、高い機密性を確保する必要があります。

健康影響調査プロジェクトでは、復旧作業員等の被ばくと健康に関する調査を支えるためのデータベースシステムを整備しました。本稿ではこれらの概要について説明します。

## 効率的で堅牢なインフラシステム

情報の完全性と機密性を保ちつつ利用しやすいデータベースシステムを運用していくためには、それを動かすための堅牢なインフラシステムが欠かせません。

本システムでは、効率的かつ冗長性のある計算資源の利用のために仮想化基盤技術を用いて、一台のサーバで複数のサービスを効率よく提供しています。また、この技術を用いることで、複数のサーバ間でサービスを移動できるため、一台のサーバに障害が起きたとしても、他のサーバにサービスを自動的に移動することで継続的なサービスの提供を行うことが可能です。

大規模災害等によって放医研内に設置されている本システムに障害が発生し、万が一情報が失われた場合にも完全に復旧できるよう、遠隔地のデータセンターと連携し、情報のバックアップを定期的に行っています。

また、本システムにアクセスするためには専用の接続

ソフトウェアを用いて暗号化した通信経路で接続する必要があります。本システムに暗号化通信を利用するためには“ワンタイムパスワード”(図1)で認証を行う必要があります。不正侵入によるリスクを大幅に軽減しています。さらに、サービス間でユーザの認証情報を交換し、最初にシステムに接続する際、一度の認証作業をすることで、システム内の複数のサービスを利用できるシングルサイソンを実現しています。これにより、利用が許可されている複数のサービスをその都度再認証する必要がなく、ユーザは快適に利用することができます。

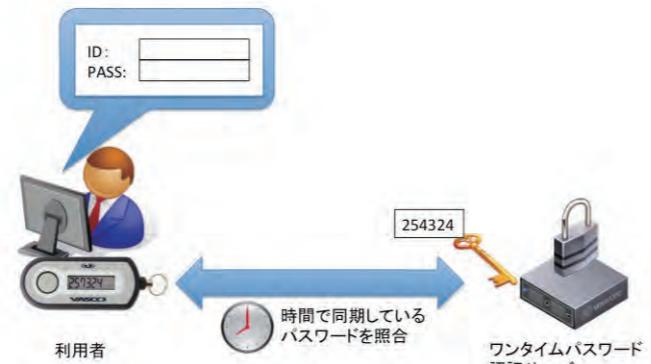


図1:ワンタイムパスワード

利用者一人一人に配布されるトークンのボタンを押すと時刻で同期した1度だけ有効な使い捨てのパスワードが生成され、これを使って認証を行う方法。使い捨てパスワードのため漏洩したとしてもそれを使ってログインすることはできないのでセキュリティが高い方式と言われている。

## データベースシステム

本調査の対象となる作業員の方は様々な機関に所属しており、健康診断結果の様式はそれぞれの機関によって異なります。記入されている検査項目の順番が違うこともありますし、同じ検査項目でも表現形式が違うこともあります。例えば、誕生日などの日付の表現には<20150401>、<2015.04.01>、<2015/04/01>、<平成27年4月1日>、<H27.4.1>などがあります。同様に、男性の場合は<男>、<男性>、<M>、<Male>な

ど記述は様々です。人間はこれらは同じものとして認識できますが、システム的には異なるものとして認識されてしまいます。また、単位によって値が違うこともあります(例:<1mSv>と<1000μSv>)。これらの情報を統一的に解析するために、情報の形式などを標準化してデータベースに保存する必要があります。

健康診断結果や調査票を入力画面(図2)から一件一件手入力することは大変な手間となるので、CSVファイルに情報をまとめ、一度に読み込んでデータベースに入力することができるようになっています。また、データベースシステム上で情報を閲覧(図3)するだけでなく、データを利用する研究者が統計解析ソフトで利用しやすいようにCSVファイルで抽出することもできます。その場合、全件を一括で抽出するだけでなく、期間や対象者などを選択して抽出することも可能です。

通常、一度データベースを構築してしまうと最初に決

めた項目から項目数や項目順、項目内容を後から変更するのは非常に困難なことですが、本データベースシステムではマスタ管理によって調査項目などを柔軟に変更することができるようになっています。これは長期にわたって調査を続けていく中で、健診制度や健診機関の変更によって調査項目などが変わることに柔軟に対応できることを意味し重要です。

今回は、復旧作業員の健康影響調査を支えるデータベースシステムの概要について説明しました。今後このデータベースシステムに復旧作業員の方々の健康情報が蓄積され解析に利用されますが、収集される情報は非常に高い機密性が要求されます。運用には十分に注意し、今後も安心してより有意義な調査が行えるように、社会的な情勢を踏まえたセキュリティ対策を行うなど技術的な革新を進めていきます。

図2:健康診断結果入力画面

図3:健康診断結果検索画面

# 人を取り巻く環境の放射線影響

環境動態・影響プロジェクト／久保田 善久・府馬 正一・渡辺 嘉人・丸山 耕一

現在、福島県の居住が制限された地域に生息する生物に東電福島第一原発事故の影響が認められるかどうかというテーマに取り組んでいます。事故発生から現在までに十数回、人の立ち入りが制限されている帰還困難区域に入り調査を行ってきました。調査対象は、動物では野ネズミ、サンショウウオ、メダカ、植物ではスギ、マツ、モミです。一般的にゲノムが大きい生物ほど放射線に感受性であることから、ゲノムが大きいことを基準に放射線感受性生物としてこれらの生物を選んでいます。以下、それぞれの生物で実施している研究を紹介します。

## 野ネズミ

福島の森林に広く生息するヒメネズミとアカネズミを捕獲し、脾臓のリンパ球を用いた染色体異常試験により原発事故の影響を調べています。野ネズミの捕獲は、一般財団法人自然環境研究センターの協力の下、シャーマントラップと呼ばれる罠により行っていますが、捕獲に成功するのはトラップ10個につき1個くらいで、研究に必要な数を捕獲するには大きな労力が必要です。放射線量の非常に高い地域で捕獲したヒメネズミでは、不安定型染色体異常である2動原体染色体異常(図1)が有意に高く、遺伝的影響やガンの発生が増加する可能性が示唆されました。

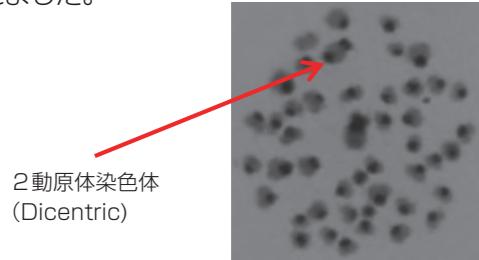


図1: C-band法によるヒメネズミリンパ球の2動原体染色体異常試験

## サンショウウオ

トウホクサンショウウオ(図2)については、2011年4



図2: トウホクサンショウウオ  
卵と幼生は小川や水たまりに生息し、成体は森林の林床に生息しています。

月より、帰還困難区域とされている福島県阿武隈高地北部と線量が低い中通り地方と会津地方で調査を行ってきました。トウホクサンショウウオとその生息地の陸土や底泥などの放射能濃度を測定し、環境生物の線量評価に現在最もよく用いられているERICA Tool<sup>1)</sup>を使って線量率を計算したところ、最高値は、阿武隈高地北部に生息する胚、幼生、成体で、それぞれ24、15、50  $\mu$ Gy/hと推定されました<sup>2)</sup>。実験室での $\gamma$ 線連続照射実験において、490  $\mu$ Gy/h以下ではトウホクサンショウウオの成長や生存に影響がなかったので<sup>3)</sup>、帰還困難区域であっても、そのような影響が生じる可能性は低いと考えられます。しかし、国連科学委員会(UNSCEAR)などの国際機関や各国機関などは、両生類やそれを含む分類群・生態系を防護するためのベンチマーク線量率として4~400  $\mu$ Gy/hを提唱しているので、より鋭敏な指標による放射線影響の有無について現地調査を進める必要があると考えています。

## 針葉樹

日本の固有種であるモミなどの針葉樹が一般的に放射線高感受性であることは、米国や日本における野外放射線照射施設での樹木に対する放射線照射実験などから知られており、放射線の環境生物影響評価には好適と考え

られます。そこで、東電福島第一原発近くの帰還困難区域内に自生するモミ個体群を調査したところ、東電福島第一原発から離れた地域の対照個体群と比べて形態変化の発生頻度の顕著な増加が認められ、空間線量率に依存してその頻度が高くなっていることがわかりました<sup>4)</sup>。

この形態変化では、木の主幹欠損に起因した二股様の分枝が特徴的に認められました(図3)。主幹欠損は放射線以外の環境要因や食害などでも発生しうるため、必ずしも放射線に特異的な現象ではありませんが、今回の結果は、放射線が福島第一原発近くの地域におけるモミの形態変化の一因となっていることを示唆しています。

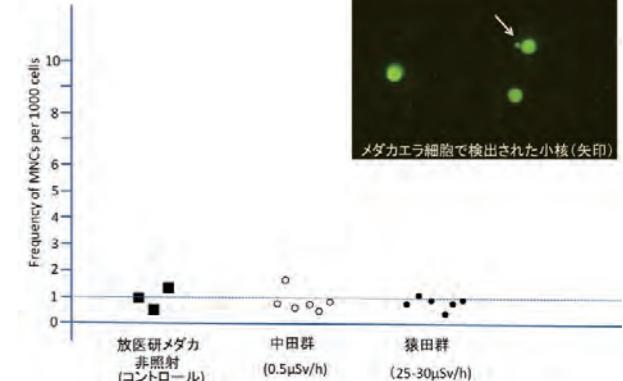
今後、モミが受けた放射線被ばく線量を正確に見積もりことや、実験施設内でモミに対して人為的な放射線照射を行って同様の形態変化が発生するかを調査し、放射線被ばくとの因果関係を明確にすることが必要です。



図3: モミの形態変化。矢印は主幹の欠損位置を示す  
A: 正常 B: 変化(側枝が水平に拡がる)

## メダカ

メダカの実験動物としての歴史は古く、遺伝学、発生学、行動生理学、環境学など多くの分野で利用されてきており、放射線生物学においても多くのデータが蓄積されています。福島第一原発事故以後、原発周辺の放射線量は事故前の数百倍にも達している所もあり、環境生物への影響が気になるところです。メダカはレッドデータブックにも掲載されている希少種(絶滅危惧2種)ですが、これまでに帰還困難区域内の線量の異なる2か所で野生集団を見つけ、定期的に捕獲し放射線影響を調べています。中田群と名付けたメダカは、原発から北北西約4キロに位置する水田用水路に生息するメダカで、その空間線量は約0.5  $\mu$ Sv/h(低線量域)、一方、猿田群と名付けたメダカは原発から西北西約7.5Kmの人工溜池に



生息するメダカで、そこの空間線量は25-30  $\mu$ Sv/hでした(高線量域)。

小核試験法は、異常染色体の出現頻度を指標とした毒性評価の一種で、放射線の影響評価手法としても利用されています。放医研で繁殖しているメダカ(コントロール)、中田群(低線量域)、猿田群(高線量域)の3種でエラ細胞における小核の出現頻度を比較しましたが、これまでのところ大きな違いは検出されていません(図4)。

東電福島第一原発事故から4年以上が経過し、研究対象に選択した生物でどのような放射線の影響が見られるのかようやく結果が出始めたところです。今後も調査・研究を継続し、放射線影響の継時的变化や、今後の中長期的影響について調査研究を発展させていきたいと考えています。

## 参考文献

- Brown JE, et al., The ERICA Tool, J Environ Radioact., 1371-1383 (2008)
- Fuma S, Watanabe Y, Kubota Y, et al., Dose rate estimation of the Tohoku hynobiid salamander, *Hynobius lichenatus*, in Fukushima, J Environ Radioact., 143, 123-134 (2015)
- Fuma S, Kubota Y, Watanabe Y, et al., Effects of chronic  $\gamma$ -irradiation on growth and survival of the Tohoku hynobiid salamander, *Hynobius lichenatus*, J Environ Radioact., 135, 84-92 (2014)
- Watanabe Y, Kubota Y, Maruyama K, Fuma S, et al., Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant., Scientific Reports., 5:13232., doi: 10.1038/srep13232., (2015)

# 環境中の放射性核種の移行と住民の線量評価

環境動態・影響プロジェクト／青野 辰雄・サフー サラタ クマール・高萩 真彦・カバシ ノーベルト・矢島 千秋・新江 秀樹・賞雅 朝子・福田 美保

東電福島第一原発事故により放出された放射性物質は、時間の経過と共に環境の中を移動します。そこで、福島県放射線医学研究開発事業補助金「放射性物質環境動態調査事業」では、事故後の経過に伴う放射性物質の生態系での移行を考慮した長期的な調査をもとに、福島の住民が周辺環境から受ける被ばく線量を解析するとともに、将来にわたり住民が受ける被ばく線量の評価を行うことを目的に3つのテーマを軸として調査研究を実施しています。

## 極微量放射性核種の高精度迅速分析法の確立

表面電離型質量分析計(TIMS)は、リチウム(質量数2)から超ウラン元素(質量数240以上)までの元素の同位体分析が行えます。このTAMSを用いて、環境中の微量の放射性物質のストロンチウム90(<sup>90</sup>Sr)、ウラン(U)および、プルトニウム(Pu)などについて、従来の分析装置よりも高精度かつ迅速に定量することを目指しています。TAMSによる分析では、試料から放射性元素を精製し、酸化物等の安定した化合物としてフィラメント上に塗布します。フィラメントを加熱して、イオン化した元素を8kVの電場で加速し、磁場により質量数で振り分け、同位体の測定を行います。

環境試料中の<sup>90</sup>Srの高精度分析を行うためにはTIMSの精確性と再現性が重要になります。そこでこれらについて検討を行いました。9000回の測定(約45日間)を行い、使用した標準溶液の<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Srの推奨値 0.710248 ± 0.000200に対して得られた結果は 0.710246 ± 0.000012であり、分析条件が妥当であることが明らかになりました。これまでのICP-QMSや液体シンチレーションカウンターなどの測定では、Srの必要量は1 μg程度であり、環境試料の総量としては1 g以上が必要でした<sup>1)</sup>。しかしTIMSは非常に高感度であることから、5 ng以上のSrが含まれる環境試料であれば、精度良く測定が可能であることが明らかになりました。福島県土壤試料中のSr濃度はおよそ100 μg-Sr/gです。したがつ



図1:導入した表面電離型質量分析計(TIMS)

て、操作過程途中の損失を50%と推定しても、土壤試料100 μgでTIMSにより高精度なSr同位体の測定結果を得ることができます。今後は、環境試料中の<sup>90</sup>Sr、UおよびPuの同位体を分析し、本原発事故の環境への影響を評価したいと考えています。

## 住民周辺環境における放射性核種の移行調査

住民が周辺環境から受ける被ばく線量の評価や予測に必要な情報を得るために、福島の環境における放射性核種の移行経路と移行量およびその時間変化などについて調査を行っています。福島県全域の約7割は森林であり、そこに沈着した放射性セシウム(Cs)の動きは、環境中のCsの挙動を解明する上で、重要な位置を占めます。一方で森林を利用した農産業は数多くあり、またキノコや山菜にはCsを蓄積しやすいものがあることも知られています。定期的に林産物の採取を行い、放射性Cs濃度の経年変化だけでなく、安定元素濃度との変動を比較し、森林内での将来の放射性物質濃度や分布の予測を進めています。またキノコがCsを蓄積する仕組みを解明するために、室内培養実験を実施しています。これまでに、Csの吸収がアンモニウムイオンの共存に影響されることや、培地から菌糸、菌糸から子実体へのCsの移行がキノコの種類によって大きく異なることなどを明らかにしました<sup>2)</sup>。

一方、海産生物中の放射性Cs濃度は、生物の種類によって減少する速度に大きな違いがあります。福島県水産試験場や東京海洋大学等と連携して、海洋生物だけではなく、海水や堆積物中の放射性Cs、<sup>90</sup>Srや<sup>239+240</sup>Puについても調査を行っています。これまでに、本事故由来の

<sup>90</sup>Srや<sup>239+240</sup>Puを含む海産生物や堆積物は検出されていません<sup>3)</sup>。

また、福島県農業総合センター畜産研究所との連携により、牛を取り巻く生態系での放射性核種の影響を解明するために調査を実施しています。妊娠牛の母胎から胎児への放射性核種の移行を評価するために、出産直後の子牛と胎児付属組織を採取し放射能測定を行ってきました。その結果、胎盤組織を経由して、放射性 Csが胎児(子牛)へと移行する動態が明らかになりました。試験研究では、実環境を想定し、暫定許容されている低レベルの汚染牧草を摂取条件にしたことから、その成果は畜産現場へ直接反映することができると期待しています。子牛世代への健康影響ですが、現在までのところ、放射性Csへの曝露履歴と相関する事象は確認されていません。

## 住民が将来にわたって受ける線量の評価

住民が生活や環境から受ける被ばく線量の評価手法の開発を目指し、現地線量実測調査と食品摂取による内部被ばく管理ツールの構築を進めています。

### 1. 線量実測調査

外部被ばく線量をモデル計算により推計する場合、住民が生活する場所の空間線量率(周辺線量当量率)や生活行動パターンなどを考慮して計算を行います。空間線量率に用いるモニタリングデータ及び適用する生活パターンの選択が、推計の精度や個人の被ばく実態を考慮した評価に与える影響については十分に明らかになっていません。また、モデル計算の検証のためには、計算値と個人線量計測定値との比較検討が必要になります。そこで、住民等を調査対象者(被験者)とする現地線量実測調査を行いました。2種類の電子式個人線量計を着用してもらい、線量測定を行いました。また測定期間中、行動記録票も作成して頂きました。一方、被験者の住居、職場など日常生活において長く滞在する場所の空間線量率を測定しました。図2に、ある一日における個人線量計測定値、空間線量率測定値を生活パターンとともに示しました。個人線量計Bについては、1時間積算線量(緑)と1分間データを10倍した値(紫色)をプロットしました。個人線量計の測定値と空間線量率測定値の増減がよく一致しています。今後、継続して調査を実施し、モデル計算値との比較等について議論を進めます。

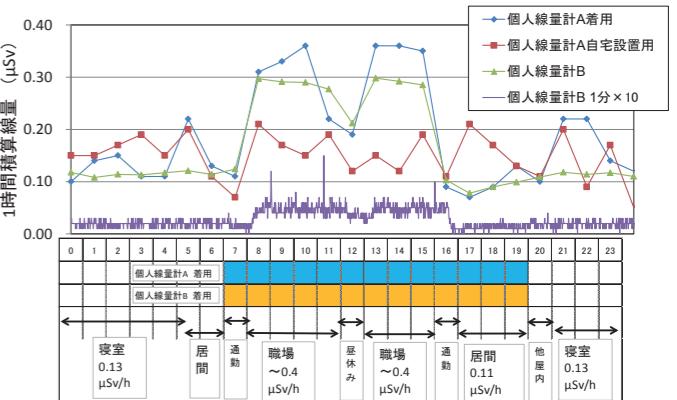


図2:被験者のある一日における個人線量計測定値、空間線量率測定値の結果

### 2. 食品摂取による内部被ばく管理ツール

開発中の内部被ばく管理ツールは、 Chernobyl 原子力発電所事故後に内部被ばくアセスメントのために欧州で用いられたツール(CORPORE)を日本の状況に合わせて改良したもので、構築したデータ収集装置に蓄積した食品検査情報を用いて、食事から摂取した放射能量を推計し、食事の履歴から摂取した放射能量及び排出の様子をグラフで表示することができます。また、料理単位で摂取食材を扱えるデータベースを構築しました。将来的にはパソコンやスマートフォンから利用できるWebアプリケーションとして住民の皆さんに提供することを目指しています。これから福島でも自家栽培や自生した植物等を採取し、食べる機会が増えると思われます。その食品を食べるか否かを自分で判断できるようになることは、食の不安の軽減につながると考えています。引き続き実用化に向け、開発に取り組んでいます。

これらの調査研究は継続する必要があります。つまり微量濃度の放射性物質の分析法が開発され、環境中での放射性物質の挙動の解明が進むものと考えられます。また、これらの知見をもとに、被ばく線量に関する評価に繋げ、成果が福島に還元できるよう努めています。

### 参考文献

- N. Kavasi, et al., J Radioanal Nucl Chem, 303, 2565-2570, (2015)
- Q. H. B. Thuy, S. Yoshida, A. Suzuki., Radioisotopes, 62, 125 - 133, (2013)
- T. Aono, et al., Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident, S. Takahashi (ed.), 115 - 123, (2014)

# 住民帰還に向けた福島県内における外部被ばく線量の諸特性に関する調査

環境動態・影響プロジェクト／矢島 千秋・吉田 聰(現企画部)  
健康影響調査プロジェクト／栗原 治・赤羽 恵一・金 ウンジュ  
緊急被ばく医療研究センター被ばく線量評価研究プログラム／大町 康

東電福島第一原発事故に係る避難指示区域の見直しが2013年8月に完了し、2014年度から避難指示の解除が始まりました。住民の帰還に際し、帰還後に想定される個人線量のレベルを事前に十分に把握しておくことが重要です。放医研では、内閣府原子力被災者生活支援チームからの依頼に基づき、2013年8月から国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)と共同で、「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査」を実施しました<sup>1)</sup>。この調査は、福島県田村市、川内村、飯舘村内の避難指示解除準備区域、居住制限区域、居住区域内(当時)の生活環境における様々な場所において個人線量計による個人線量測定と空間線量率(周辺線量当量率)測定を行うものです。個人線量と空間線量との関係を実測と照射室実験により明らかにするとともに、代表的な職業に応じた生活パターンに対する個人線量レベルの推定を試みることを主たる目的としました。本稿では、その調査の概要とともに、放医研が主に担当した生活パターンを考慮した個人線量の推計について紹介します。

## 調査の概要

### 1. 調査地域

田村市都路町(居住・避難指示解除準備区域)  
川内村(居住・避難指示解除準備・居住制限区域)  
飯舘村(居住制限区域)

### 2. 測定場所

調査区域内の代表的な生活場所 28点  
(民家、公民館、学校、山林、農地など)

### 3. 現地調査

2013年8月に予備調査、同年9月に本調査を実施しました。個人線量は、調査員が現地調査中に電子式個人線量計を胸部に着用して測定を行いました(図1)。一部の場所では人体の体幹部を模擬したスラブフ



図1:現地調査の様子  
現地調査中、調査員が個人線量計を胸に着用し個人線量を測定しました

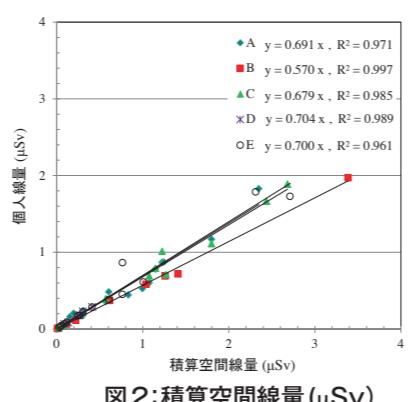


図2:積算空間線量(μSv)

## 個人線量レベルの推計

田村市都路町、川内村、飯舘村に帰還した場合のモデルケースを複数想定し、年間追加被ばく線量を以下の条件・仮定に基づき推計しました。

- 1.自宅と職場は現地調査を行った建物・場所から選定し、屋内・屋外空間線量率は現地調査の実測値を用います
- 2.通勤時の自動車内の空間線量率は、車内で得られた実測値または屋外空間線量率を車両の遮へい効果により補正した数値を用います
- 3.職業は農業、林業、事務職員(学校職員)、自宅滞在者(高齢者など)を想定し、各職業の生活パターンは、日本人の平均的データ<sup>3)</sup>を基に導出します(図3)
- 4.個人線量=0.7×積算空間線量 の関係を仮定します
- 5.自然放射線寄与(BG)=0.04 μSv/h と仮定します

| 職業           | 滞在時間(h) |      |      |      |
|--------------|---------|------|------|------|
|              | 自宅*     | 屋外作業 | 屋内作業 | 通勤*  |
| 農業<br>林業     | 17.54   | 6.28 | 0    | 0.19 |
| 事務職員<br>学校職員 | 15.37   | 0.49 | 7.29 | 0.85 |
| 自宅滞在者        | 22.93   | 1.07 | 0    | 0    |

\*これら2つは実際の通勤(走行)時間によって変化すると考えます

図3:生活パターン(滞在時間割)

図4は、ある学校職員が(今後避難解除が見込まれる)居住制限区域内に立地する自宅から、居住区域にある職場(学校)まで自家用車で通勤するケースを想定しています。

以下は各地域における職業別の年間追加被ばく線量(2013年9月から1年間)の推計値です。

・田村市都路町 0.6 mSv/y(事務職員)～2.3 mSv/y(林業)

・川内村 1.1 mSv/y(学校職員)～5.5 mSv/y(林業)

・飯舘村 3.8 mSv/y(学校職員)～17.0 mSv/y(林業)

いずれの地域においても、職業別の生活パターンで見ると林業が高く、学校職員または事務職員が低い線量となることが分かりました。

これは当然の結果のように思われますが、理由としては、山林の空間線量率は除染の有無に関わらず周囲に比べて高めであること、学校職員等では職場に鉄筋コンクリート造りの建屋を実際に即して想定したために、その遮へい効果により勤務中の空間線量率が低かったことが挙げら



図4:推計方法の概念図  
自宅が居住制限区域、職場が20km圏外(居住区域)にあり自動車で通勤するケースです

れます。このように年間追加被ばく線量には屋外の滞在時間が大きく影響するため、今回の推計結果に基づき更なる線量低減が必要となる場合は、例えば休憩中は屋内で過ごすといった簡単な対策が有効だと考えられます。

本調査では、従前まで行われてきた航空機モニタリングによる測定結果と一律の生活パターン(屋内滞在時間16時間、屋外滞在時間8時間)を用いる線量推計に比べて、住民の実際の居住環境や生活習慣を踏まえたきめ細やかな線量推計法を提案しました。既に、本調査の課題として残されていた児童の個人線量の特性に係る調査も行っており、その結果も公表しています<sup>4)</sup>。これら一連の調査を通して、少しでも帰還される住民の方々のお役に立つ情報を提供できていたならば幸いです。

## 参考文献

- 1) 東京電力(株) 福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査、放医研、原子力機構、NIRS-M-270 (2014) URL: [http://www.nirs.go.jp/information/event/report/2014/04\\_18/houkokusho.pdf](http://www.nirs.go.jp/information/event/report/2014/04_18/houkokusho.pdf)
- 2) Kobayashi S., et al., Radioactive contamination mapping of northeastern and eastern Japan by a car-borne survey system, Radi-Probe., J. Environ. Radioact. 139: 281-293, (2015)
- 3) NHK 放送文化研究所(編), データブック国民生活時間調査 2010年, NHK 出版 (2011)
- 4) 「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査」の追加調査—児童に対する個人線量の推計手法等に関する検討—、放医研、原子力機構、NIRS-M-276 (2015) URL: [http://www.nirs.go.jp/information/event/report/2015/03\\_16/houkokusho5.pdf](http://www.nirs.go.jp/information/event/report/2015/03_16/houkokusho5.pdf)

# 福島第一原発事故による初期内部被ばくに関する調査 大気拡散シミュレーションによる内部被ばく線量推計の取り組み

健康影響調査プロジェクト住民線量評価チーム／金 ウンジュ・栗原 治・米内 俊祐・赤羽 恵一

東電福島第一原発事故による住民の方々への健康管理に資するため、放医研では住民の方々が受けた外部被ばく線量を計算するシステムを開発し<sup>1)</sup>、福島県立医科大学からの依頼により、これまでに約50万人の推計を行つてきました。他方、内部被ばくに関しては、福島県や県内自治体等がホールボディカウンタ(WBC)による内部被ばく検査を既に約25万人の方々について行い(2015年4月末時点)、ほぼ全員が預託実効線量で1mSv未満と評価されています<sup>2)</sup>。ただし、同検査は事故発生から数か月後に開始されたこともあり、事故初期に環境中に存在していた放射性ヨウ素-131(I-131)などの短半減期核種を検出できなかったことから、これらの核種による内部被ばく線量を別途推計する必要があります。しかしながら、そのための情報が極めて限られており、初期内部被ばくの実態を解明するための調査が今も続けられています。

放医研においても、国からの委託を受けて、初期内部被ばくによる線量推計手法の検討を進めています。本稿では、その一つである大気拡散シミュレーションを用いる方法について紹介します。

## 大気拡散シミュレーションを用いる内部被ばく線量推計の経緯

前述したように<sup>131</sup>Iを初めとする短半減期核種を対象とした内部被ばく検査のデータが不足していたために、国内の専門家の間でも当初から大気拡散シミュレーションを用いる方法が検討されてきました。しかしながら、今回の事故では放射性核種の放出源情報がプラント側で取得することができませんでした。そのため、数少ない事故直後の環境モニタリングデータを可能な限り再現するように逆推定された放出パターンに基づき、大気拡散シミュレーションを行わざるを得ない現状であり、推計に用いる場合の精度の検証が課題でした。2012年度に公表した放医研の初期内部被ばく線量(特に甲状腺等価線量)の推計では、限られた人の実測データ(国が事故直後に実施した小児甲状腺被ばくスクリーニング検査<sup>3)</sup>や福

島県の委託を受けて国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)が実施したWBCによる内部被ばく検査<sup>4)</sup>等)を主に活用して行いました。また、大気拡散シミュレーションによる推計は、これらのデータが十分に得られなかった地域の住民の方々に限定して補足的に行いました<sup>5)</sup>。しかしながら、大気拡散シミュレーションは、再現される放射性ブルームの挙動から、吸入摂取による内部被ばく線量評価によって重要となる放射性核種の摂取時期や摂取量に対する有益な情報を与えるため、放医研では引き続き大気拡散シミュレーションの可能性を探ってきました。なお、2014年4月に公表されたUNSCEARレポート<sup>6)</sup>では、住民の方々の被ばく線量の推計に、大気拡散シミュレーションの結果を主に用いています。

## 内部被ばく線量推定システムの開発と検証

大気拡散シミュレーションを用いる内部被ばく線量の計算の原理は極めてシンプルです。すなわち、大気拡散シミュレーションから得られる<sup>131</sup>I等の放射性核種の地表高の大気中濃度マップから、評価対象者の滞在場所に近い場所の濃度データを抽出し、これに年齢に応じた呼吸量と摂取量から内部被ばく線量に換算する係数(線量

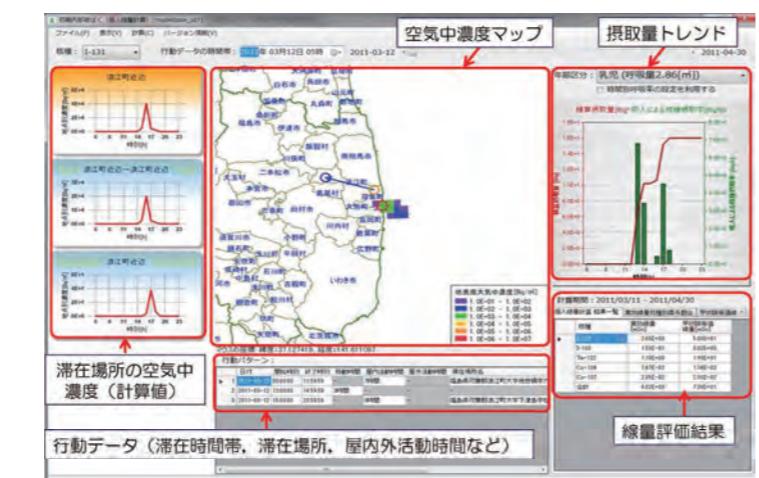


図1: 内部被ばく線量評価システム

係数)を乗じるだけです。ただし、避難中の個人の行動は千差万別であり、さらに外部被ばくと同様に屋内滞在時に見込まれる防護係数も考慮する必要があります。これらは個人の行動情報から得られるものですが、こうしたきめ細やかな推計が行えるように、図1に示すような内部被ばく線量推計システム(仮称)の開発を進めています。同システムに組み込む大気中濃度マップには、原子力機構が開発したWSPEEDI-IIの出力値<sup>7)</sup>を用いています。

図2には、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査で得られた測定値に基づく甲状腺線量(ヒストグラム)と大気拡散シミュレーションから算出した甲状腺線量(点線で示したバンド)を比較した結果を示します<sup>8)</sup>。ただし、後者については、検査が行われた各市町村の役場周囲約10 km四方を甲状腺線量の範囲として求めており、屋内滞在時間や自主避難などの個人の個別の行動情報は未だ考慮できていません。したがって、同図に示されるように大気拡散シミュレーションから算出した甲状腺線量が実際の甲状腺線量と比べて過大傾向にあるのは当然であり、逆の見方をすれば、大気拡散シミュレーションによる推計に個人の行動情報を適切に反映できれば精度が向上する可能性があります。その他、代表的とされる警戒区域等からの18の避難シナリオの内部被ばく線量の試算を行い、限られたケースではあるものの、大気拡散シミュレーションが人の実測データに基づく線量を数倍程度過大に推定することを確認しています。

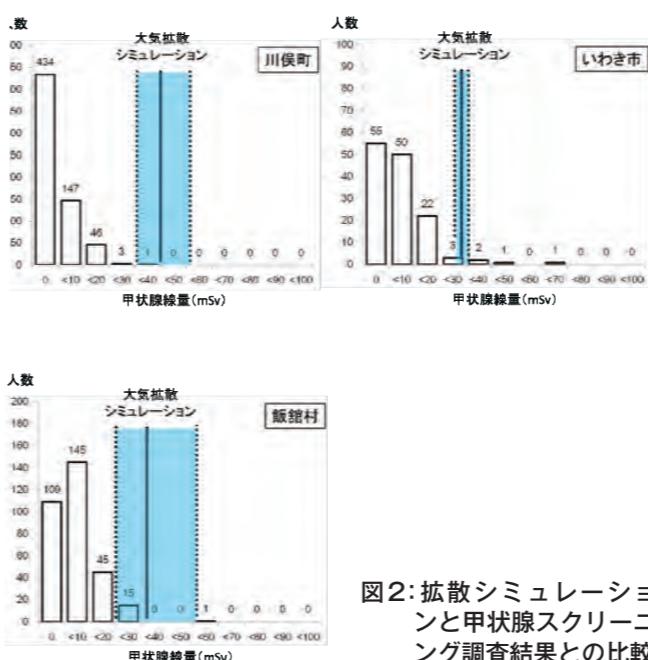


図2: 拡散シミュレーションと甲状腺スクリーニング調査結果との比較

## 今後に向けて

大気拡散シミュレーションによる内部被ばく線量の推計は、さらに多くの検証が必要です。そのため、放医研では福島県立医科大学の協力を得て、実測データと行動データの両方を有し、さらに本人の同意が得られた方々について、前述したシステムにより内部被ばく線量を計算し、実測データから評価した内部被ばく線量との比較検証作業を進めています。用いる行動データは、福島県民の方々の外部被ばく線量推計にも使われているもので、避難中の滞在場所、滞在した家屋の種類、移動したかどうか等の情報が時系列で与えられています。これまでに400名程度のデータ提供を受けており、線量の比較的高い方々の行動にどのような特徴があるか、逆に線量の低い方々は自主的な防護対策が講じられたのか等の観点からも解析を行っています。

今後の予定として、最新版の大気中濃度マップの内部被ばく線量推計システムへの組み込みや、防護係数の最適値の探索、さらには拡散シミュレーションによる摂取シナリオの精緻化等を行い、初期内部被ばく線量の推計精度の向上を行って行きたいと考えています。

## 参考文献

- 1) K. Akahene et al., Sci Rep. 3, 1670. doi: 10.1038/srep01670 (2012)
- 2) 福島県 HP. <http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/21045b/wbc-kensa-kekka.html>
- 3) E. Kim et al., NIRS-M-252, 56-66 (2012). [http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs\\_m\\_252.pdf](http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_252.pdf)
- 4) T. Momose et al., ibid, 67-81. (2012)
- 5) 栗原ら. 東京電力福島第一原子力発電所事故における福島県住民の初期内部被ばく線量推計. Proc. of the 14 th Workshop on Environmental Radioactivity. KEK, Tsukuba, Japan. KEK proceedings 2013-7, 7-16 (2013)
- 6) UNSCEAR. UNSCEAR2013年報告書第1巻国連総会報告書科学的附属書A(日本語版) (2014)
- 7) Terada et al., J. Environ. Radioact., 112, 141-154 (2012)
- 8) 栗原治, 被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーション－東京電力福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量再構築, 日本原子力学会誌, 55 (12), 34-38 (2013)

# 長期被ばくの影響とその低減化に関する研究

長期低線量被ばく影響プロジェクト／山田 裕・尚 奕・細木 彩夏・山崎 隼輔・今岡 達彦・鶴岡 千鶴・柿沼 志津子・菅谷 公彦・森岡 孝満・島田 義也

国連科学委員会報告書(UNSCEAR 2013 Report)「2011年東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響」<sup>1)</sup>によると、福島県の避難者および避難区域以外の集団の最初の1年間における平均実効線量は、不確かさはあるものの、成人で約1~10ミリシーベルト(自然源によるバックグラウンド線量に追加して)の範囲にあり、子どもでは約2倍高くなると推定されています。現行のリスクモデルにおいては、この程度の低線量被ばくによるがんの罹患リスクは、日本人の生涯にわたる自然発生によるがんリスクと比べて、小さすぎて検出できないと示唆されています。

しかしながら、このような低線量の放射線が存在する地域に長期にわたって生活すると考えられることから、特に小児における低線量率放射線による長期連続被ばくの影響とその低減方策について関心が向けられています。現在、放射線防護上では、低線量・低線量率(低線量連続)被ばくの影響は高線量・単回被ばくの影響に比べておよそ半分(低減係数が2)になるということ、連続被ばくの線量は総てを足し合わせた蓄積線量にするということに基づいて評価がされています。しかし近年、国際放射線防護委員会(ICRP)などにおいて、低減係数をより低い値に見直す方向で検討が行われています。

そこで本プロジェクトでは、(1)小児の場合、低減係数はどれくらいになるのか、(2)連続被ばくの影響がどのような機序により蓄積するのか、(3)被ばくによる健康影響をどのように低減できるのかを明らかにするために動物実験を行っています。

## 低線量率放射線による小児への影響評価

本研究では、小児期B6C3F1雌雄マウスに対し低線量率放射線を長期間照射し、寿命短縮と、造血系および固形がんの発生を解析しています。これまで、低線量率照射では発がん効果が低くなり、高線量率照射群に比べ寿命が延長することを示唆するデータが得られています。

最終的には、小児期における低線量率放射線による寿命短縮と各臓器に誘発されるがんを指標とした低減係数を求めます。また、小児において放射線感受性の高い脳腫瘍のモデルマウス(Ptch1<sup>+/-</sup>マウス)の小児期低線量率照射実験において、低線量率照射群では腫瘍発生率は非照射群と変わらないにもかかわらず、被ばくによって生じるタイプのゲノム変異が腫瘍細胞でみられることを確認しました。さらに、放射線による発がんリスクが比較的高い乳がんの動物モデルであるSDラットを用いて、小児期と成人期における線量率効果の相違を明らかにする実験も進めています。

## 組織幹細胞における影響の蓄積性評価

本研究では、放射線防護上重要な細胞種である組織幹細胞の放射線影響の蓄積性を、皮膚と乳腺の幹細胞に着目して解析しています。マウス皮膚の毛隆起には、毛を形成するケラチノサイトおよび色素を形成するメラノサイトの幹細胞が存在しています。放射線照射の結果、線量に依存して毛包の数の減少や色素形成異常の増加が観察され、幹細胞への放射線影響の評価系として利用できることがわかりました<sup>2)</sup>。さらに第1毛周期の休止期における放射線照射の影響(毛包密度の減少)が、照射後一

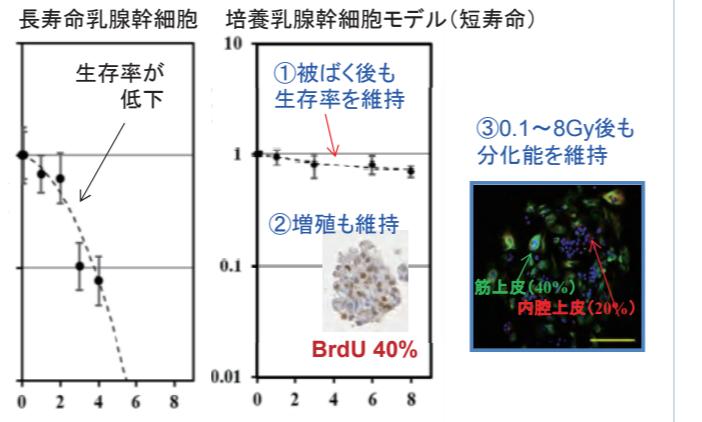


図1：乳腺幹細胞への放射線影響

回目の毛周期だけではなく、二回目の毛周期にも現れることから、放射線影響が持続することを明らかにしました。

また、乳腺幹細胞の研究では、照射を受けた幹細胞の動態、すなわち細胞死・自己複製・分化がどのように変化し、それが最終的な発がんリスクにどのような影響を及ぼすのかを調べています。培養乳腺幹細胞モデルを用いた放射線影響の評価法を確立し、このモデルの幹細胞は従来から知られている長寿命幹細胞に比べて放射線被ばく後もよく生存すること、また、増殖性・分化能も維持することを明らかにしました。これより放射線影響の蓄積性は低いことを示唆するデータを得ることができました(図1)。

## 放射線誘発がん予防に関する研究

この研究は、子どもの被ばくにより誘発するがんの予防に有用な成分や方策を実験動物を用いて検証し、その作用機序を解明することを目的としています。動物実験より、必須栄養素の摂取量を保ちながら、食餌のカロリーを制限すると腫瘍の発生が低下し、寿命が延長することが知られています。そこで、放射線が誘発するがんに對しても、カロリー制限が有効なのかどうかを検証しました。B6C3F1雄マウスに1週齢で照射し、7週齢からカロリー制限(65kcal)を開始すると、カロリー制限をしない群(95kcal)に対して平均寿命が20%延長することがわかりました。また、このとき発生するがんを種類別に調べたところ、肺がんの発生が特に抑制されていること

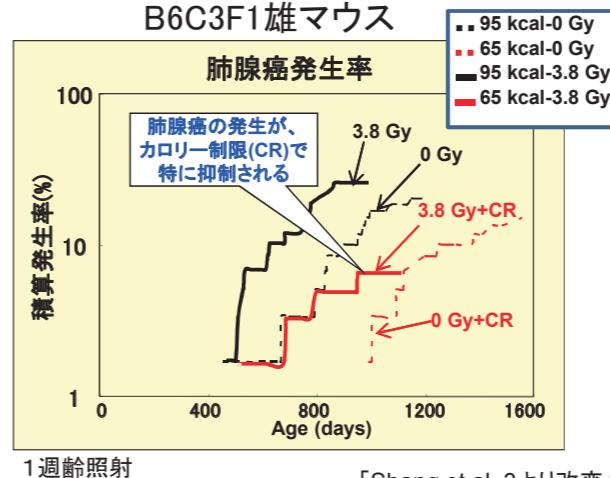


図2：カロリー制限によるリスクの低減

がわかりました(図2)<sup>3)</sup>。また、より穏やかなカロリー制限として6か月齢から75kcalにする実験群を設定し、現在、飼育観察を継続しています。

放射線照射により高頻度に消化管腫瘍が発生するモデルマウス(C3B6F1 Apc<sup>Min/+</sup>マウス)を用いて、食品に含まれている抗酸化物質やカロリー制限により腫瘍の誘発が抑制されるか否かを実証する研究も行いました。2週齢のマウスに放射線を照射し、赤ブドウ等に多く含まれている抗酸化物質の一つであるレスベラトロールを4~25週齢まで投与したところ、腫瘍の誘発が抑制されることが明らかになりました。またカロリー制限を行うことも、消化管腫瘍の抑制に有効であることがわかりました。これらの抑制効果の作用機序には、アデノシンリーン酸(AMP)活性化プロテインキナーゼの活性化によるがん細胞増殖抑制作用が関与することが示唆されていますが、詳しい作用機序の解明にはさらなる研究が必要です。

疫学研究において低線量/低線量率被ばくの過剰リスクを統計的に検出するためには、莫大な集団サイズが要求され実際に実施することは困難です。低線量放射線による健康リスクの精確な推定のためには、疫学研究および動物実験を含む生物学研究を統合し、細胞・分子レベルでの作用機序の解明を進めていくことが重要です。そして新たな科学的知見が得られた都度、放射線による健康影響に不安を覚える住民の方々に対して、それらを分かりやすい形でリスクコミュニケーションに活用することにより、福島復興のための安全・安心対策に取り組んで行きたいと考えています。

なお、本特集の動物実験については、放医研の動物実験委員会で審査され、理事長の承認を得た動物計画書に基づいて実施しました。

## 参考文献

- 1) UNSCEAR 2013 Report: "Sources, effects and risks of ionizing radiation" Volume I, (2015)
- 2) Sugaya K. and Hirobe T., Exposure to gamma-rays at the telogen phase of the hair cycle inhibits hair follicle regeneration at the anagen phase in mice. Int J Rad Biol 90: 127-132, (2014)
- 3) Shang Y, Kakinuma S, Yamauchi K, Morioka T, Kokubo T, Tani S, Takabatake T, Kataoka Y, Shimada S: Cancer prevention by adult-onset calorie restriction after infant exposure to ionizing radiation in B6C3F1 male mice. Int J Cancer 135: 1038-1047 (2014)

# 温室～新たな出発～

放射線防護研究センター廃棄物技術開発研究チーム／石井 伸昌

JR稻毛駅東口を出て道路沿いを南東へ向かい緩やかな坂を登り切ると、放射線医学総合研究所(放医研)の正門が見えています。正門のケヤキ並木が、来所者を迎えてくれます。この並木を奥へと進むと、左手に年代を感じさせる平屋が見えています。これが温室です。見た目通り、この温室は放医研の中でも歴史が古い建物の一つです。2014年、長い期間この温室が担ってきた役割は、新たに建設された環境放射線影響研究棟(環境棟)の人工気象室(気象室)に引き継がれました。さらに、植物栽培において放射性同位元素(RI)を用いた試験ができるよう、同棟の放射線管理区域内に屋内型人工気象装置(屋内気象装置)が設置されました。これら気象室や気象装置は、主に放射性核種の環境挙動や、植物を中心とした環境生物に対する放射線の影響を調査することを目的として設置されました。本短報では温室の歴史を簡単に振り返りながら、気象室および屋内気象装置に関する今後の期待を述べたいと思います。

## 1. 温室の概要

1958年11月、千葉市にある放医研の敷地内において温室が着工されました。これは本部棟や第一研究棟の着工から6か月後のことでした。研究の中心である研究棟と同年に着工されたことから、当時、温室が非常に重要な建物であると認識されていたことが伺えます。この年に着工された建物は、他にも講堂、X線棟、それに今では取り壊され無くなってしまった第一ガンマ線棟などがありました。

竣工当時は草木もほとんどなく、水生舎、実験動物研究棟、静電加速器棟など、現在温室の周囲にある建物もなく、写真で見る限り閑散とした場所にポツンと建っていました。今では多くの木や草に囲まれており、スズメやハトはもちろんのこと、ムクドリ、ツグミ、セキレイ、シジュウカラ、メジロなど、様々な鳥がやって来る自然豊かな場所となっています(図1)。最近では温室南側に

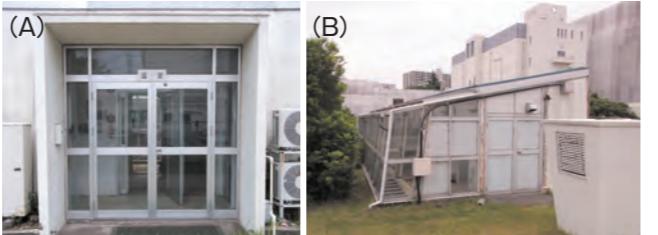


図1:(A)正面から見た温室と(B)側面から見た温室

あるスギがすいぶん大きくなり、雄花も観察されるようになりました。花粉症の方はあまり近寄りたくない場所かもしれません。

温室には実験室が3部屋と実験準備室が1部屋、そしてユニット温室が6室ありました。3室ある実験室のうち1室は地下にあり、閉鎖される間際まで環境生物に対する放射線の影響研究が行われていました。温室に地下室があったことは、あまり知られていないのではないでしょうか。各実験室の床面積は約19.5 m<sup>2</sup>と、研究施設の一般的な実験室の約半分の面積です。地下の実験室を除けば、準備室を含め全てユニット温室と直結しており、作業をスムーズに行うことができる非常に使いやすい施設でした。準備室には流しが設置されており、接続されている水道管の埋設が浅いためか、夏に蛇口をひねるとしばらく火傷しそうなくらい熱い水が出てきたことを思い出します。ユニット温室の床面積は7.3 m<sup>2</sup>で、前面の透明パネルには開閉式の窓が取り付けられていました。温室自体老朽化しており、空調の調子が悪いこともよくあったのですが、そのような時この窓が非常に役立ちました。

温室は、今でこそRIが扱える管理区域ではありませんが、使用が開始された当初はRI施設として登録されました。そして、主に炭素-14(<sup>14</sup>C)とトリチウム(<sup>3</sup>H)の植物による取り込みに関する研究が行われていました。<sup>14</sup>Cや<sup>3</sup>Hは宇宙線と大気の反応により生成される天然の放射性核種ですが、過去に行われた大気圏内核実験や原子力施設も発生源です。炭素や水素は生物にとって必須元素であるため、環境中の<sup>14</sup>Cや<sup>3</sup>Hは農作物に取り込まれ、そしてこれを摂取すれば内部被ばくの原因となりま



図2:近年温室で栽培した(A)イネや(B)コマツナ  
老朽化のため隙間が多く大きく育つまで害虫駆除や、雨漏り対策に追われる日々でした。

す。そのため<sup>14</sup>Cや<sup>3</sup>Hは安全評価における重要核種と考えられています。

放医研には温室のほかにも植物育成場や圃場(ほじょう・作物を栽培する田畠)があり、様々な植物が栽培されていました。温室や植物育成場では、水稻、麦、ミズワラビ、ムラサキツユクサ、大豆、イモ類、葉菜類、根菜類、ラン科植物、ケヤキ、マツ、コケなどが栽培されていました(図2)。年により栽培される植物や鉢数は異なりますが、1979年には250鉢程度栽培されていたと記録されています<sup>1)</sup>。圃場では主に桑やシロバナヤマジソが栽培されていました。これらの植物は放医研で飼育していたカイコの餌や、放射能調査のために試料として利用されました。1960年代、2,000m<sup>2</sup>あった圃場<sup>2)</sup>は、その後場所を何度も移動しつつ300m<sup>2</sup>程度に減少されますが、それでも年間423kgのシロバナヤマジソが収穫されており<sup>3)</sup>、当時、大規模な栽培が行われていたことがわかります。圃場は今では無くなり、どこにあったのかさえよく分かりません。

## 2. 温室で行われた研究

1959年7月1日の放医研開所式以降55年間、この温室で様々な試験、研究が行われてきました。温室の使用が開始された当時、国連科学委員会による“Preliminary Report on Radiocarbon From Nuclear Tests”を基に、テーマが拡散しがちな<sup>14</sup>Cと<sup>3</sup>Hの研究をどのように集約するかについて討議され、その結果(1)測定の基礎研究、(2)分布調査研究、(3)生物学的研究の3つの課題に分類され、それぞれの担当部署が決定されました<sup>4)</sup>。そして、分布調査研究のために植物による<sup>14</sup>C取り込み試験が計画され、1962年に<sup>14</sup>Cトレーサ実験が可能な植物栽培フードが温室に設置されました。かなり大掛かりな装

置だったらしく、昭和36年度年報に設計の詳細が記載されています<sup>5)</sup>。植物による<sup>14</sup>Cの取り込みは、現在も重要な課題の一つです。原子力発電所の運転や廃炉に伴い放射性廃棄物が発生します。これら廃棄物の中には<sup>14</sup>Cも含まれており、安全評価において影響を十分に考慮する必要があるとされています。1960年代は核実験による大気経路の取り込みが課題でしたが、現在は地層処分に関連した地中からの移行および生物圈における挙動が注目されています。<sup>14</sup>Cの影響実験では、<sup>14</sup>Cを取り込んだ桑の葉でカイコを飼育したところ、F1卵(F1はfirst filial generationの略記で、桑の葉を食べて育ったカイコの卵の意味)の突然変異率が増加したという興味深い結果も得られています<sup>6)</sup>。

1970年には、植物による<sup>3</sup>Hの取り込みおよび分布に関する試験が開始されました。そして3年後、「環境放射線による被曝推定に関する調査研究」の一部として実施され、1974年には温室にトリチウム用簡易人工気象装置、さらに1977年には自動水耕装置が設置されました。これらの装置を駆使して、植物への取り込みと挙動に関するデータが蓄積されました。成果の詳細は、特別研究最終報告書<sup>7)</sup>で述べられています。

近年では、福島原子力発電所事故からの復興に関する成果が温室で得られています。浄水場では水道水を作る過程で浄水発生土(浄水土)が発生します。事故以前はグランド用土や園芸用土として有効利用されていたのですが、事故によりこの浄水土が放射性セシウムで汚染され、東北関東エリアの浄水場の敷地内に保管され続けました。どの程度の汚染であれば再利用可能かを明らかにするために、温室においてこの特殊な土から葉菜類への放射性セシウムの移行係数(土壤から植物へ放射性セシウムが移行する割合)が求められました<sup>8)</sup>。その他、植物への移行を抑制する方法<sup>9)</sup>、浄水土を利用するメリット、栽培作業中の追加外部被ばく、収穫した葉菜類を食べたときの預託実効線量なども検討されました。この一連の試験を行っている間に、厚生労働省から、「浄水場から搬出する浄水土の放射性セシウム濃度が400 Bq/kg以下であれば浄水土を園芸用土として有効利用可能」との考え方方が示されました。温室で得られた結果からも、この濃度であれば栽培した葉菜類の放射性セシウム濃度が食品中の放射性物質の基準値(100 Bq/kg)を超えないことが支持されました。

### 3. 人工気象室の概要

2014年、温室の機能は放医研正門近くから環境棟の4階に移転しました。放医研敷地内から環境棟を見ると、屋上にポツンとガラス張りの建物が建っていることに気づきます。一見サンルームのように見えるためか、「あの建物は何?」と噂されているのを、建設当時よく聞きました。今でも不思議に思われている方は多いのではないかでしょうか。天井と壁面三方がガラスで囲まれたこの部屋こそ機能移転した新温室で、気象室と呼ばれています(図3)。気象室の中に立つと見晴らしは良いのですが、逆に放医研敷地内外からこちらを見られているように感じます。ちょうど動物園の動物になったような感じです。土作りなどの作業は気象室の外で行うのですが、4階は風が強く苦労することがあります。また、4階には環境棟の排気設備が集約されており、音の大きさに閉口させられます。大声を出さなければ会話もできません。下から見上げるとどのかな雰囲気漂う気象室ですが、このようにいろいろ苦労もあります。しかし、欠点ばかりではありません。環境棟の正面に向かいには幹周約3mもある桜の木があり、春には気象室がある4階から満開の桜を見下ろすことができます。下から見上げることはあっても、上から見下すことは珍しいのではないでしょうか。近くでカラスの熱い視線を感じることもあります。作業の合間に心地よい風を感じることもできます。夏には遠くの花火が見えるかもしれません。このように、ビルの4階とはいえ意外と自然や四季を感じることができます。

温室機能の移転に際し、気象室は2室で構成されることが計画され、1室は植物の遺伝子組換え実験ができる施設と考えられていました。さらに、2室あれば気象条件を変えた比較実験も可能となります。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は「地球全体にわたって気候が変化している」と評価報告書の中で述べていますが、この気候の変化は農作物の生産に重大な影響を与える可能性が



図3:ある晴れた日の人工気象室  
(A)室内ではイネを栽培しています。(B)第一研究棟から見下ろした人工気象室。

あり、さらには農作物への放射性核種の移行にも影響すると言われます。放射性核種で汚染された農作物の経口摂取は、内部被ばくの重要な経路の一つなので、農耕地における放射性核種の挙動に対する気候変動の影響研究は、今後重要な研究課題となることが予想されます。残念ながら諸般の事情により気象室は1室となりましたが、将来対応として気象室の隣にもう一室設置できる空きスペースが確保されており、そこは新温室が建てられる耐荷重仕様となっています。現在は、その空きスペースでメダカが飼育されています。

気象室の床面積は約10.5 m<sup>2</sup>と、温室と比較すると1/4程度に縮小されました。設備は充実しています。気象室内の気温や湿度はもちろんのこと、炭酸ガス濃度も制御可能であり、これらのパラメータをリアルタイムでモニターすると共に、数日分であればデータの記録も可能です。炭酸ガス濃度の制御は、温室には無かった機能です。記録したデータはパソコンに移し、栽培環境の貴重なメタデータとして利用できます(図4)。炭酸ガス濃度変化を見れば、植物の光合成や呼吸パターンだけではなく、気象室内で人が作業した痕跡も見えてきます。これら3つのパラメータは、一つのプログラムに24パターン記録することができ、プログラムも5つまで保存することができます。この機能により、温室内の気象をきめ細かく設定することができます。風速と光合成量には密接な関係があるので、効率よく光合成できるよう適度な速度の風が、絶えず気象室内を循環しています。手動ではありますが、風速の調整も可能です。

また、気象室は環境棟の縁から約1.5 mの場所に、そして床面から高さ約1メートルの土台の上に建てられています。気象室自体RC構造(鉄筋コンクリート)の重量感ある建物なので、土台もしっかりとしています。もちろん、これらの建物は下梁でしっかりと支えられています。気象室の設置位置ですが、単に建てるスペースがあった

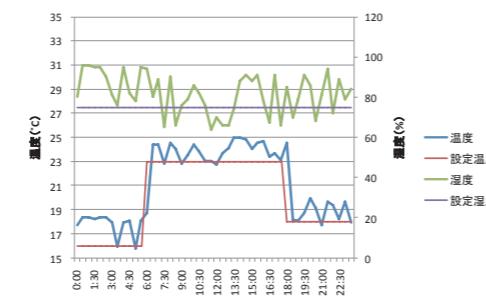


図4:ある日の気象室内の温度と湿度の変化

から建てられた訳ではなく、検討に検討を重ねた結果、この位置と高さとなりました。この位置決めの決め手となったのは、太陽の軌道でした。温室内環境をうまく制御すれば、時期をずらして植物を栽培することが可能となります。つまり、年に複数回栽培することができます。気象室内には照明が備え付けられていないために、光は太陽光に依存しています。そのため、栽培時期をずらした場合、日照が問題となります。そこで、冬期においても水稻が栽培できる日照を確保できるよう、気象室の位置、向き、そして高さが検討され、その結果、現在の位置となりました。土台の下は空洞になっているのですが、この空洞には思わぬ使い道がありました。様々なものを格納するのに非常に便利な空間になっています。例えば、苗の収納です。本年度は温室外でも大きな容器を用いて水稻を栽培しているのですが、植えたばかりの苗は強風で倒れ、雨が降ると容器内で水没してしまいます。このような状況の時は容器を台車に載せて気象室の下に一時に避難します。この場所はわずかに光も届くため、休日が雨予報の時は特に重宝しています。

気象室に実験室は付随していませんが、環境棟4階建屋内に植物栽培準備室が備わっており、栽培した植物は主にこの部屋で処理をします。顕微鏡、インキュベータ、乾燥機、電子天秤、保冷庫といった基本的な機器が整備されています。

### 4. 屋内型人工気象装置の概要

環境棟はRIを用いた試験ができるよう放射線管理区域が設けられており、この区域内で植物栽培が行えるように、屋内気象装置が2機設置されています(図5)。2機合わせ、幅約3m、奥行き約2mの大きさで、この機器が設置されている環境棟3階V-307室の約1/3の床面積を占めています。この面積には温度や湿度の制御機器も含まれているので、実際に植物を栽培できる有効床面積は1機あたり1.5 m<sup>2</sup>程度となります。この面積でも一般的によく利用される内径16cmのワグネルポットが24個余裕を持って入るので、シロイヌナズナ、イネ、ミヤコグサ、そしてタバコなどのモデル植物の栽培スペースと



図5:屋内型人工気象装置

しては十分です。

このような気象装置でイネを栽培する場合、装置の天井高は3mを超えることがよくあります。これはイネから光源までの距離を一定に保つための措置です。環境棟の天井高は2.7mのため、装置の高さを低くする工夫がなされました。具体的には水平点灯タイプの照明に交換することでこの問題を解決しました。これにより気象装置内は1.8mの高さを保つつつ、50,000 luxの照度を確保することができました。この値は太陽光に近い照度です。

最大照度で運転をしているとき、装置内は直視することができないほど明るくなっています。これは単に照明のみの明るさではなく、装置内の表面材の効果でもあります。装置内で使用されている表面材は植物工場で使用される高反射率鋼板で覆われてあり、特に光合成で利用される450nmから660nmの波長の光を90%程度反射するとされています。この仕様により、栽培における照明効率がよりよくなっていることが期待できます。

屋内気象装置には気象室と同様に温度、湿度、炭酸ガス濃度が制御できます。制御の範囲ですが、温度は15~35°C、湿度は60~80%、そして炭酸ガスは大気濃度から3,000 ppmまで可能です。装置内の容積が小さいために、比較的短時間で設定した値に到達します。そして、装置の開口部はインフィット型(熱の損失を二重に防止する構造)の防熱扉となっており、設定した条件を安定して保つことができます。風についても光合成に適切な風が、この装置を運転中絶えず装置内を循環しています。さらに照度も制御できるため、気象室以上にきめ細やかな気象条件の設定が可能です。これらの機能が2機の気象装置に備わっているので、気象効果の比較実験も可能です。

この気象装置はRIを利用することを前提に設置された機器なので、気密性が高くなっています。例えば、放射性ヨウ素や放射性炭素など、ガス化する放射性核種を使用した場合でも、気象装置内から室内へガスが漏洩することはほとんどありません。空気は装置内で循環しており、必要に応じて専用のエアダクトから排気されます。たとえ気密性が高くとも、生長の確認、データ収集、給水作業などにおいて扉を開く必要があり、そのときにガス化したRIが室内に漏洩するのではないかと心配される方がおられるかもしれません。しかしながら、扉には観察窓が取り付けられており、観察のたびに扉を開けることなく、植物の生長などを観察することができます。ただし、こ

の観察窓は装置内部を見下ろせるように扉の少し高い場所にあるため、場合によっては脚立に上って観察する必要があり、転倒などには十分注意が必要です。また、この装置の扉の横には直径3 cmの穴が開いています。通常この穴はキャップでふさがれているのですが、必要に応じて装置内の空気の回収や、装置内に設置する機器類の電源確保、あるいは給水のために使用したりすることができます。装置内には内部コンセントと給水栓が各1か所ずつ設置されています。これらも利用すれば、実験開始から終了までの期間、極力扉を開けずにすむかもしれません。RI実験期間中に扉を開ける回数を減らすことは、実験実施者の被ばくを抑制する工夫の一つです。

## 5. 今後の期待

環境棟は、「東電福島第一原発周辺住民における長期被ばくの影響とその低減化に関する研究」等を実施するための研究施設であり、東日本大震災からの復興の基本方針に示されている「放射線の健康への影響に関する把握・評価を実施する」施設として建設されました。少なくとも10年間はこれに関する成果を得ることが求められます。この棟にある気象室および屋内気象装置も、この目的のために使用されることが期待されます。

国際放射線防護委員会(ICRP)は2007年勧告において、人の防護に止まらず環境の放射線防護の理念を示しました。そして、ヒト以外の生物種について線量と影響の関係を評価するための枠組みが必要と述べています。屋内気象装置を利用すれば低線量の放射線に対する植物の影響(反応)について調査することが可能と思われます。外部被ばくによる影響だけでなく土壤-植物系における放射性核種の移行や濃縮も大切な課題です。東北・関東エリア土壤では未だに原子力発電所の事故により放出されたセシウム-137(<sup>137</sup>Cs)が検出されることがあります。これらが日本の農耕地でどのように動いているのか等、明らかにすべき課題は山積しています。放射性核種の挙動はその土地の風土にも影響されると考えられます。欧米のデータだけでなく我が国の土壤や植物を用いて、我が国の気象条件の下でデータを得ることが重要です。気象室や屋内気象装置は、このようなデータを得るために大いに活用できると思います。

現在、気象室ではイネの栽培が行われています(図6)。

気持ちが良いのか、屋外で栽培しているイネよりもずいぶん大きく生長しています。収穫後の水田で刈り株や根などの有機物残渣をよく見かけますが、これらは耕起時に土壤にすき込まれます。すき込まれた有機物残渣は微生物により分解され新たに作付けされたイネの栄養源となります。放射性セシウム(<sup>137</sup>Cs + <sup>134</sup>Cs)で汚染された土壤で栽培されたイネは経根吸収により放射性セシウムを取り込み、そして取り込まれた放射性セシウムはイネ全体に分布します。そのため有機物残渣にも放射性セシウムが残り、これが新たに作付けされるイネにとって汚染源となる可能性があります。では、有機物残渣からどの程度放射性セシウムがイネに移行するのでしょうか。微生物の活動は温度に依存するのですが、有機物残渣からイネへの放射性セシウム移行も温度に依存するのでしょうか。2017年頃には気象室や屋内気象装置を利用した試験により、このような疑問に対する回答が得られる予定です。

最後に、放医研では国内外の研究機関・大学産業界との連携や人材交流を図っており、共同研究を行うことで気象室および屋内気象装置を使用することができます。この短報を読み、一人でも多くのユーザが増え、そして復興に資するデータが得られることを願っています。

## 参考文献

- 放射線医学総合研究所、昭和54年度年報、(1980)
- 放射線医学総合研究所、昭和39年度年報、(1965)
- 放射線医学総合研究所、昭和58年度年報、(1984)
- 放射線医学総合研究所、昭和35年度年報、(1961)
- 放射線医学総合研究所、昭和36年度年報、(1962)
- 放射線医学総合研究所、昭和44年度年報、(1970)
- 新井清彦他、トリチウムの植物-動物系における動向、渡辺博信編、特別研究「環境放射線による被曝線量の推定に関する調査研究」最終報告書、81-91、(1978)
- 石井伸昌、他、浄水発生土に含まれる <sup>137</sup>Cs のコマツナによる経根吸収、Radioisotopes 62: 447-453, (2013)
- Ishii N. et al, Effect of sludge particle size on uptake of Cs-137 by two leaf vegetables. Journal of Residual Sciences & Technology 12: 61-65, (2015)



図6:イネを栽培している土壤の温度を測定

## 放医研 - 放射線先端生命科学を次世代へ: 親子が紡ぐアウトリーチ活動

重粒子医学センター次世代重粒子治療研究プログラム／小池 学・湯徳 靖友  
放射線防護研究センターリスク低減化研究プログラム／小池 亜紀

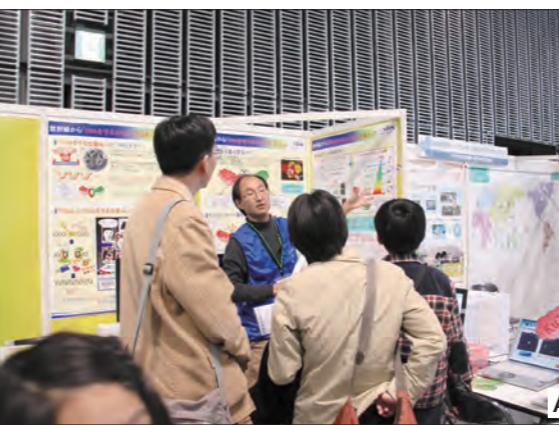
放射線医学総合研究所(放医研)は創立以来、研究者による研究成果を発信し続けています。アウトリーチ活動とは、社会に向けて研究の内容や成果をわかりやすく伝える活動のことです。研究者からの一方向性の発信よりも、双方向のコミュニケーションができる活動が重視されています。最近ではアウトリーチ活動を義務づけている競争的資金もあります。

放医研はサイエンスアゴラ(科学技術振興機構(JST)主催)や千葉市科学フェスタ(千葉市主催)などの科学イベントへの出展に積極的です。科学イベントへの出展では人生の先輩から子どもまで、目的や科学リテラシーが異なる方々が対象となることが多いので、学会や学年単位の教育の時とは違う工夫が必要になると思います。

私たちは、広報課や研究推進課と連携して、先述の科学

イベントに出展をしています(図1)。千葉市科学フェスタ2013ではメインイベントの科学体験ブースで「放射線からDNAを守る仕組み」を見てみよう!! -見えないものを感じてみよう!!紫外線検出ストラップを作つて体験!-を開催し、1日で200人以上の方に体験して頂きました。千葉市科学フェスタ2014ではサイエンスカフェ「病気を防ぐ「放射線からDNAを守る」からだの仕組み」を、サイエンスアゴラ2014ではオリジナルの動画等を活用した活動を行いました(図1)。また小中学生を対象に、こどもサイエンス教室「放射線からDNAを守るからだの仕組み」を開催し好評を得ました(図1C)。

本稿では、私たちの科学イベントでの経験や関心が高かった、DNA修復たんぱく質Kuをキャラクターに用了いた自作の科学教材について紹介をしたいと思います。



A: サイエンスアゴラ2014にて解説 B: Kuのキャラクターが案内するシミュレーション等のオリジナル動画集。参加者が自由に操作できるよう工夫をしてあります C: サイエンスアゴラ2014にて「こどもサイエンス教室」 D: Kuのキャラクターを使った缶バッヂ

## アウトリーチ活動の際のテーマと工夫

### DNA修復たんぱく質Kuの機能と立体構造に基づく オリジナルキャラクターの活用

人間は人類誕生以来これまでずっと、放射線を浴びながら暮らしています。細胞の中にある生命の設計図DNAは放射線を浴びると傷つくことがあります。一方、生命が誕生して以来、放射線から自分の遺伝情報を守るよう進化した生き物が現存する地球上の生き物です。最近、病気を防ぐための「放射線からDNAを守る仕組み」が明らかにされてきました。興味深いことに、(1) 傷のほとんどは「KuなどのDNA修復たんぱく質」がすぐに発見して治します。また、(2) 人間と同様に「DNAを守る仕組み」が、マウス、イヌ、カエル、昆虫、メダカ、植物などの身近な生き物にもあります。細胞の中では放射線が当たった時に何が起きているのでしょうか？

先に述べましたが、放射線はDNAを傷つけることがあります。DNAの二本鎖切断損傷(DSB)は、放射線により生じる様々なタイプのDNAの傷の中で最も深刻な傷です。一方、人間の細胞はその傷を主に非相同末端結合(NHEJ)によって修復します(図2)。Ku70とKu80という2つのたんぱく質からなるKuが損傷DNAを素早く発見し結合すると修復が開始します(図2)。実際に、遺伝子変換技術で可視化したKuを発現する細胞の中を高感度顕微鏡で覗いてみると、Kuが損傷部位に素早く集まる様子を観察できます(図3)。Kuをもっていない細胞は放射線に高い感受性を示します。従って、Kuの機能を人工的に抑制したがん細胞はより低い線量の放射線で殺すことができます。一方、放射線に感受性が高いなどの症状が現れるNHEJ遺伝子に変異がある先天性の病気が、人間だけでなくマウス、イヌ、馬もあります。

こういった内容を伝えるために、たんぱく質の立体構造と機能に基づいた「Kuのキャラクター」を作り(図4)、対話型の説明(図5A)や自作の科学アニメに使用しています(図1B、図5B)。また、イベント後の家庭や学校でも話題にして頂けるよう紫外線で光る「Kuの缶バッヂ」等を準備しています(図1D)。大学院生対象レベルにも関わらず、これら自作教材を使用した解説は、JSTのサイエンスチャンネルから配信された「生きている細

胞内のKuが損傷直後の切れたDNAに一瞬で集まる様子を捉えた数秒間のライブセルイメージング」と並んで、わかりやすいと大変好評でした。

## 親子が紡ぐアウトリーチ活動へのいざない

「大きくなったら研究者になりたいです」。今年の春、とある保育所の卒業式で子ども達が将来の夢を披露しました。「研究者」は我が子の夢、「プロ野球選手」と並ぶ人気でした。科学実験を行うイベント型アウトリーチ活動に参加して「子どもは研究者の卵」と再認識しました。「What's new?」、子どもは「未知のこと」や「不思議なこと」が大好きです。自由時間をつくると、試行錯誤を繰り返すうちに実験道具を使ったエポックメイキングな遊びをはじめる子が出てきます。すると他の子も真似をはじめます。そうなると様々なスキルや感性を持つ保護者の方々と放射線生命科学についてゆっくり話す時間ができます。同時に、専門家とは異なる視点からの鋭い質問や疑問にも触れることができます。しばらくすると、目をキラキラさせながら「不思議！」、「なんでそうなるの？」、必要な環境条件が揃うと子ども達は孵化はじめます。そして、その体験を笑顔でお父さんやお母さんに伝えはじめます。好奇心をくすぐられる体験であれば、家庭では兄弟姉妹、学校では友達に自分の体験を語り続けるでしょう。放射線科学に関心の高い親子が増えれば、研究者になる夢を育み夢を叶える子ども達や研究活動に理解を示す科学リテラシーの高い人が増えると予想されます。

小さなアウトリーチ活動でも各地で親子達が関心を持って紡いでいけば、やがて放医研の研究成果も次世代の手によってさらに大きく育まれていくことになると思います。それには長期的な視野が重要です。放医研のオリジナルの研究成果を正確に、かつ、わかりやすくアウトリーチするためには、研究者と研究支援部門が連携し、多くの方々に研究について理解していただける場の設定や、伝え方の工夫をすることが重要であると思います。同時に、イベント参加型のアウトリーチ活動では参加者と一緒に科学を楽しむことが大切だと感じています。放医研の研究内容や成果をさらに多くの方々に知って頂くために、そして、将来の研究者と理解者を育むために、皆さんもイベント参加型のアウトリーチ活動をはじめてみませんか！

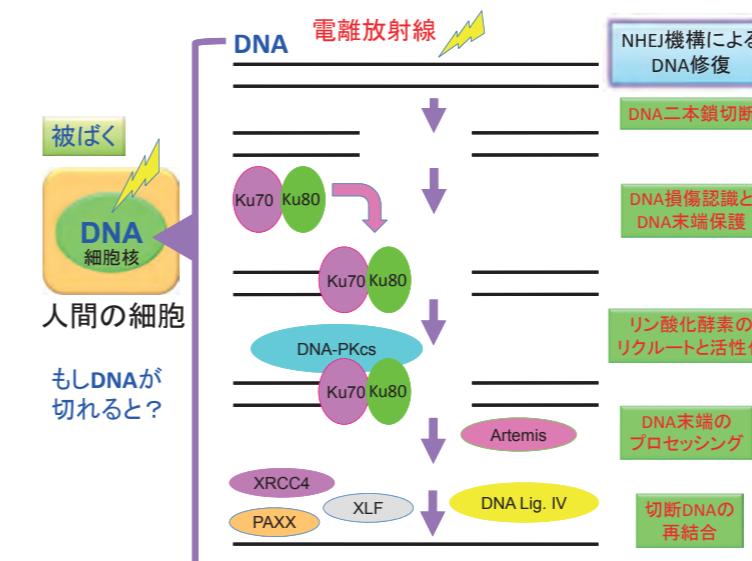


図2: DNA修復機構

ヒトの細胞の中でDNAを修復する機構の一つを図に表しました。DNAに刻まれた遺伝情報を守るDNA修復機構は、放射線から「からだを守る仕組み」の中で最も大切な機構の一つです

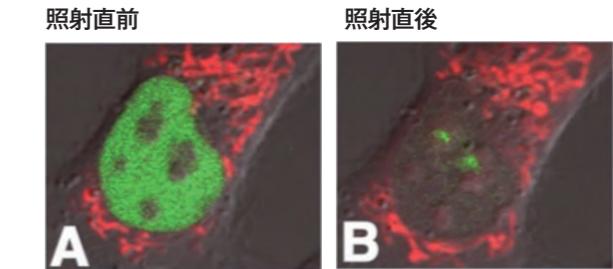


図3: DNA損傷部位へのヒトのKu80の集積—ライブセルイメージング

ヒトのKuたんぱく質が傷ついたDNAを治しに集まる様子をライブセルイメージング法で捉えた様子 A: DNAが傷つく直前の細胞の様子 B: 細胞核内の2か所をマイクロレーザーで狙い撃ちました。照射直後からKuたんぱく質が損傷したDNAを治しに集まつた様子です



図4: Kuのキャラクター

Kuの立体構造と機能を参考にして作りました。Kuの動きを、め、くち、つばさに例えています。  
め: 損傷したDNAを素早く見つけだす働きをイメージしています。  
くち: Ku70とKu80の2つのたんぱく質が複合体を形成するとできる、損傷したDNAに結合するためのリング様の構造を示しています。  
つばさ: 損傷したDNAに素早く集まる性質を示しています。つばさのでこぼこはKuと一緒に修復にあたるたんぱく質が特異的に結合するKuの構造をイメージしています。

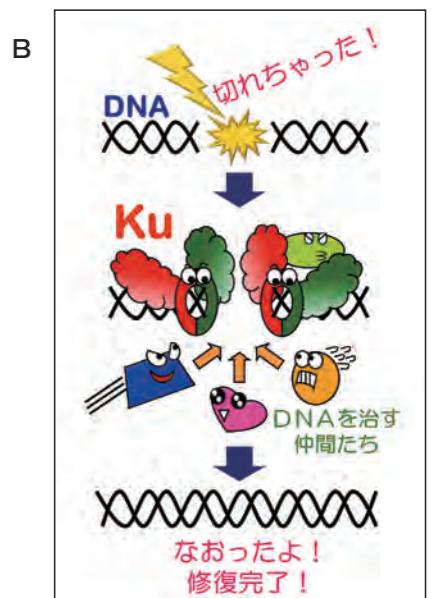


図5: KuのキャラクターとDNAの立体モデル

このモデルとアニメを使うと、私たちのからだを構成する細胞の中で働いているDNAを守る仕組みがわかりやすく説明できます。大人からも子どもからも、質問やコメントが最も多い時間になります

A: KuのキャラクターとDNAの立体モデル

B: Kuのキャラクターを使って紹介したDNA修復機構



# 国立大学法人動物実験施設協議会 千葉総会の開催報告

研究基盤センター研究基盤技術部生物研究推進課／小久保 年章

2015年5月14、15日に第41回国立大学法人動物実験施設協議会(国動協)総会を放医研が主催し、千葉市内で開催しました。その報告と動物実験の規制を巡る動向について紹介します。

## 国動協の取り組みと放医研の関わり

国動協は、「大学の動物実験改善についての報告」(文部省学術奨励審議会)を受けて1967年に設立されました。国動協会員としては、国立大学法人並びに大学共同利用機関法人の付属動物実験施設のみならず、文部科学省(文科省)が所管する法人を含む機関の付属動物実験施設や動物実験に関する機関内の共同利用センターなど、広く会員として受け入れており、2015年6月時点で68施設が加盟しています。国動協の活動には、実験動物の飼育管理や遺伝学的・微生物学的統御、科学的かつ倫理面に配慮した適正な動物実験実施のためのガイドライン等の作成と普及、関係行政機関や実験動物関連団体への要望や提言を行いつつ、動物実験の精度と水準の向上、また実験動物の飼養保管と動物実験の適正化を進め、生命科学における教育、研究の推進、会員への情報提供などがあります。

放医研では所内で実施される適正な動物実験の推進や動物実験に関する情報収集の観点から、2002年の第28回国動協総会(信州大学主催)よりオブザーバーとして参加を始めました。2007年の第33回国動協総会(旭川医科大学主催)で会員として承認され、国動協活動に積極的に参加しています。

## 国動協千葉総会

国動協総会が千葉で開催されるのは千葉大学が主催した1991年第17回以来です。実は2011年に放医研主催で総会を計画していましたが、3月11日の東日本大震災に伴い所全体でその対応にあたるため、急遽、主催を取

りやめることになりました。その時に、金沢大学の浅野教授(当時)が総会まで2か月たらずの中、主催を快く引き受けてくださったことは感謝に堪えません。このような経緯もあり、2015年総会で放医研が主催を改めて引き受ける機会を得て無事に開催できたことは、関係者の一人としてこれ以上の喜びはありません。

千葉総会には文科省の担当官4名、厚生労働省(厚労省)の担当官1名、その他来賓3名、全会員施設66施設より233名、オブザーバー7施設15名の計256名の参加がありました。放医研が国動協に加盟した2007年の総会参加者は57施設175名でしたので、当時に比べると動物実験に関する諸処の問題に対応するために、国動協への参加が必要と考える機関が増えているのが分かります。

総会では、実験動物施設の相互検証の実施状況を含め様々な委員会活動報告、国動協への入会審査などが行われました(図1,2)。なお、文科省の関係機関以外の動物実



図1:第41回国動協総会会場の玄関前風景



図2:第41回国動協総会の様子



図3:施設長・教員・事務職員懇談会の様子

験施設を会員に加えるか否かについてが今後の課題となりました。

総会前には、施設長・教員・事務職員懇談会と技術職員懇談会が行われました。それぞれ「実験動物と動物実験の規制について 問題点と解決への道を探る」と「施設運営業務・飼育管理業務における工夫について」をテーマに、動物実験施設における適正な管理の推進に資する講演と活発なディスカッションが行われました(図3)。また、サテライトミーティングでは放医研の多彩な活動の一端を参加者に知らせる機会として、重粒子線がん治療に関する講演(鎌田重粒子医学センター長)、東京電力福島第一原子力発電所事故対応に関する講演(明石研究担当理事)を行いました。

## 動物実験の規制を巡る動向

動物実験に関する主な規制の推移を表1に示しましたが、動物実験の実施体制が構築されたのは2005年から2006年にかけてです。2005年に改正された「動物の愛護及び管理に関する法律」で、はじめて3R(代替法の活用、使用動物数の削減、苦痛の軽減)が明文化されました。2006年には環境省から「実験動物の飼養及び保管並びに苦痛の軽減に関する基準」の告示、文科省、厚労省、農林水産省からそれぞれ動物実験基本指針の告示、日本学術会議から「動物実験の適正な実施に向けたガイドライン」

が次々と出され、動物実験における規制の枠組みが構築されました。この規制の枠組みを基本として日本における動物実験は各動物実験施設による機関管理(自主管理)により、適正に行うことになりました。この機関管理については、法令遵守と動物実験の透明性確保の観点から、各機関で実施した動物実験に関する自己点検評価に対して、外部機関等による検証の実施を求めています。外部検証の取り組みとしては、いくつか対応している団体等がありますが、文科省の関連機関を主な対象としているものとして、国動協と公私立大学実験動物施設協議会(公私動協)合同の「動物実験に関する相互検証プログラム」があります。このプログラムは2009年にスタートし、5年間で国動協加盟施設44機関が検証を受けています。2015年からは第2期検証プログラムとして、飼養保管基準への適合性についても評価し、外部有識者を検証委員に加えるなど、これまで以上に検証プロセスの透明性と公正性を確保して再スタートしました。

放医研は2009年に国動協・公私動協の相互検証プログラムによる外部検証を受けていますが、近い将来に2回目の外部検証を受け、動物実験の透明性確保により一層、努めていきたいと思います。

表1:動物実験に関する主な規制の推移

|       |  |
|-------|--|
| 1973年 | 動物の保護及び管理に関する法律  |
| 1980年 | 実験動物の飼養及び保管等に関する基準   |
| 1987年 | 大学等における実験動物について  |
| 1999年 | 動物の愛護及び管理に関する法律(動物愛護管理法)の改正  |
| 2005年 | 動物愛護管理法改正  |
| 2006年 | 実験動物の飼養及び保管並びに苦痛の軽減に関する基準(飼養保管基準)<br>研究機関等における動物実験等実施に関する基本指針(文科省) |
|       | 動物実験の適正な実施に向けたガイドライン(日本学術会議)                                       |
| 2012年 | 動物愛護管理法改正  |
| 2013年 | 飼養保管基準改正   |

## The 15th International Congress of Radiation Research (ICRR 2015) 参加報告 若手研究者企画による国際交流会と 国際シンポジウムについて

重粒子医学センター次世代重粒子治療研究プログラム実験治療研究チーム／平山 亮一

ICRR 2015が1979年の第6回ICRR東京大会から36年ぶりに、国立京都国際会館で開催(5月25日～29日)されました。今回は9つのテーマ別に会議が行われ、中山伸弥先生(京都大学iPS細胞研究所所長)と有馬朗人先生(元東京大学総長)の講演で幕が開きました。中山先生からは、フォルクスワーゲン(VW)車のスライドとともに、若手研究者へVision & Hard Work(VW)という素晴らしいメッセージが贈られました。さらに5日間のプログラムには7つのAward Lectureと2つのSpecial lectureも含まれ、ポスターセッションと18のLuncheon Seminarも開催されました。この5日間で53か国から過去最多の2,016名が参加(約半数が海外から)し、盛大に行われました。本印象記では、著者も携わった若手研究者による2つの企画から、内容を簡単にご紹介します。

### 若手研究者による若手国際交流会の開催

若手研究者である大塚健介先生(電力中央研究所)、加藤晃弘先生(京都大学)、横田裕一郎先生(日本原子力研究開発機構)ならびに著者によって若手国際交流会が大会3日に開かれました。この会の目的は放射線生物、物理、化学、臨床の各分野における国内外の若手ネットワークを構築する(横のつながりを作る)こと、国内外の各方面の著名な教授/研究者と直接議論できる場を提供する(縦のつながりを作る)こと、さらに日本文化を学び伝えることとしました。32か国から若手研究者(34歳以下)が集まり、各専門分野から14名のエキスパートをお招きして、定員200名満員の中、活発な交流が行われました。また、京都大学運動部・サークルのご協力のもと、空手道の「演舞」と能の「猩々」が披露されました。交流会終了後にはPenelope A. Jeggo先生(University of Sussex)から次回マンチェスター大会でも、交流会を行いたいとご提案があり、参加した多くの若手研究者からも賛辞を頂戴しました。4年後にもこのような研究交流の場が設けられることを願います。



様々な分野から集まった交流会スタッフ一同

### 若手研究者による Symposium 開催

大会4日目には、若手企画Symposiumが開催されました。2年ほど前から構想を練り始め、前田宗利先生(若狭湾エネルギー研究センター)、横田裕一郎先生ならびに著者を中心に開催直前まで打ち合わせを行ってきました。Symposiumタイトルは「Re-evaluation of Biological Targets of Radiation-induced Cell Killing」。『放射線の生物標的は何か?』という古くて新しい論点に着目し、国内外の若手研究者らが持ち寄る最新の研究成果を交えて議論するスタイルにしました。細胞致死の標的は必ずしもDNAや染色体だけではなく、細胞膜や細胞質に存在する細胞内小器官も細胞致死においては十分標的になりうることが、細胞シグナル研究や新しいマイクロビーム照射技術によって明らかになりつつあること、さらにシミュレーション科学を含めた多くの放射線科学の側面からのアプローチが本質を明らかにする上で欠かせないことが明らかになったと考えています。

最後に、若手企画を開催するにあたり平岡真寛大会長(京都大学)、ICRR事務局の先生方ならびに各分野の先生方に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

これらの企画は日本放射線影響学会、若手放射線生物学研究会ならびに武田科学振興財団の援助や助成を得て実施されました。