

医学物理

Japanese Journal of Medical Physics

2021

Vol. 41

4

<http://www.jsmp.org/>

JSMP

Japan Society of Medical Physics

教育委員会企画連載中



令和 3年
第41巻 4号



日本医学物理学会機関誌

目 次

巻 頭 言

暗がりでも色を見分けるヤモリの目と医学物理研究

福士政広 179

〈連載：教育委員会企画〉

解 説

放射線業務従事者を対象としたコホート研究の総説 [第2部]

工藤伸一，井上一雅，福士政広 180

〈連載：RPT 誌特集〉

論文紹介

最近のRPT誌レビュー論文から：PHITSの医学物理計算への応用

古田琢哉，佐藤達彦 194

施設紹介

新潟大学医歯学総合病院医学物理グループ

新潟大学大学院保健学研究科医学物理士養成コースの紹介

宇都宮悟，棚邊哲史，中野永，坂井まどか，田邊俊平，滝澤健司，久島尚隆，成田啓廣，
早川岳英，笹本龍太 195

連載コラム：シカゴ通信

世界の島国

—ニュージーランド，インドネシア，タヒチ，バルカン半島諸国—

土井邦雄 201

追 悼 文

田中栄一先生のご逝去を悼む

村山秀雄 214

編集後記 219

CONTENTS

PREFATORY NOTE

Gecko Eyes That Can Be Identified in the Dark and Medical Physics Research Masahiro FUKUSHI	179
--	-----

〈Special Issue: Dosimetry Committee〉

REVIEW

Review of Cohort Studies Among Radiologists, Radiological Technologists, and Nuclear Workers Shin'ichi KUDO, Kazumasa INOUE, Masahiro FUKUSHI	180
---	-----

〈Special Issue Series: RPT〉

ARTICLE REVIEW

Medical Application of Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS Takuya FURUTA, Tatsuhiko SATO	194
--	-----

INTRODUCTION OF RESEARCH FACILITY

Introduction of Medical Physics Group at Niigata University Satoru UTSUNOMIYA, Satoshi TANABE, Hisashi NAKANO, Madoka SAKAI, Shunpei TANABE, Takeshi TAKIZAWA, Naotaka KUSHIMA, Akihiro NARITA, Takahide HAYAKAWA, Ryuta SASAMOTO	195
--	-----

COLUMN: Chicago Report

The World with Many Islands: New Zealand, Indonesia, Tahiti, Balkan Nations Kunio DOI	201
--	-----

EULOGY

In Memoriam of Dr. Eiichi Tanaka Hideo MURAYAMA	214
--	-----

EDITOR'S NOTE	219
---------------------	-----

【複写される方へ】

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3階 一般社団法人 学術著作権協会
FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。

巻頭言

暗がりでも色を見分けるヤモリの目と医学物理研究

福土政広^{1, 2}

¹東京都立大学

²つくば国際大学

最近の科学トピックスで関心を持ったのが京都大学グループの「暗がりでも色を見分けるヤモリの目の秘密を解明」である。我々ヒトは暗い所で色を見分けられない。しかし、夜行性であるヤモリは暗がりでも色を見分けられる。ヒトは錐体を3種類持ち、そのなかでそれぞれ赤R、緑G、青Bの光を感じるセンサー役のタンパク質（視物質）の一種「錐体視物質」が働いている。錐体は、ほかの多くの哺乳類が2種類、鳥や魚が4種類などと、多くの脊椎動物が複数種類を有している。このため明るい所で色を見分けられるが、暗い所では錐体が働けない。

一方、桿体は暗い所でかすかな光も感知するが色を識別できない。桿体では視物質「ロドプシン」が働いている。このように、ヒトなどの多くの哺乳類は明所で色を識別でき、暗所ではできない。

暗がりでも色を識別するヤモリの目の秘密は、面白いことに光のセンサーを巧みにチューニングし、光への反応よりも、逆に光がないときの誤反応で視物質の中にある特定の分子は光がなくても稀に体温の熱に誤反応することがあり、暗所では、わずかな光を感度よく認識しなければならないため、感度を鈍らせる誤反応は大敵、そこで脊椎動物のロドプシンでは誤反応を極力抑えている。一方、明所では目に強い光が入るぶん、感度を下げる必要があるため、むしろ錐体視物質の誤反応を多くすることが重要となる。そこで視物質を構成するアミノ酸を調べた結果、ヤモリの錐体視物質では、特定の数個のアミノ酸が置き換わっていることを突き止めたという。こうして性質を変え、ロドプシンと同様に誤反応を低く抑え、暗所の視覚に適応させていたようだ。もともと明所のためのものだった視物質を暗所に適応させた。その結果、独自の3種類の桿体を暗がりでも働かせ、暗い所で色を見分ける特技を獲得したようである。センサーである視物質を巧みにチューニングすることで、視覚を上手に適応させたことがわかったとのこと。暗がりの害虫を上手に食べてくれる“家守り”の秘密は、こんなところにあった。

では、医学物理は“放射線医療守り”の役割かな…。この研究で面白いところは「もともと明所のためのものだった視物質を暗所に適応させた」この部分で、医学物理研究の最も得意とする領域かなと考える。医療の常識の中に埋もれてしまいがちなところに物理学の光を当ててイノベーションを起こすことが医学物理研究に求められている。

さて、41巻3号から東京都立大学での福土政広研究室で学位を取得し各方面で活躍している方達の解説記事を連載する。

第1回は、東京都立大学の高畠賢准教授からの「動物モデルを用いた放射線発癌研究」で、著者らはこれまでにラット乳がんモデルを用いた、(i)思春期前後の放射線被ばくで誘発したラット乳がんにおけるDNAのメチル化の違い、(ii)思春期前後で放射線被ばくした後の妊娠・出産経験による発がんリスクの変化と分子メカニズムについての研究内容を解説する。

第2回は、放射線影響協会放射線疫学調査センターの工藤真一の「放射線業務従事者を対象としたコホート研究の総説」で、この解説では放射線科医、放射線技師および原子力作業者をコホートとした疫学研究について、被ばく線量、結果等の観点から取りまとめた。放射線技師を対象とした研究では、白血病、皮膚がん、乳がんの高いリスクが1950年頃以前に業務を開始した集団に見られたが、近年になって業務を開始した集団ではそのような傾向は見られなかった。原子力作業者を対象とした幾つかの研究では有意に高いリスクが報告されているが、リスクが見られなかったという報告もあり、その結果には一貫性がない。この原因の一つは、交絡因子の調整等の解析手法が研究間で異なることに起因する可能性も考えられるため、留意する事項について解説する。

第3回は、帝京大学中央RI教育・研究施設の三本拓也助教から、核医学診断の陽電子放射断層撮影 (Positron emission tomography: PET) は、特に腫瘍学分野の診断に利用され、¹⁸F-FDGを用いたPET/CT検査は、がんのステージングや治療効果に有用である。またPET診断は、細胞の機能を定量的に評価可能な優れた性質を示す一方で、画像再構成条件や体動・呼吸によって定量的な値が変動する課題を併せ持っていることなど、これまで取り組まれてきた腫瘍学分野におけるPET研究について解説する。

第4回は、環境科学研究所Nimelan Veerasamy研究員から、インド東部のオリッサ州内の高自然放射線地帯において、空間線量率分布とその起源となる天然放射性同位元素および希土類元素の動態や高自然放射線地帯の空間線量率分布、モナザイトを主とした土壌試料中に含有する天然放射性核種（ウラン、トリウムおよびカリウム）の濃度、放射線リスク評価のための実効線量およびハザードインデックス等に関して解説する。

最後に、ご支援を頂戴した長谷川編集委員長ならびに編集委員の皆様にご心よりお礼申し上げます。今後とも医学物理の裾野の広がることを切に期待し、私からの巻頭言の言葉とさせていただきます。

解説

〈連載：教育委員会企画〉

放射線業務従事者を対象としたコホート研究の総説 [第2部]

工藤伸一^{*1,2}, 井上一雅¹, 福士政広^{1,3}¹東京都立大学大学院 人間健康科学研究科 放射線科学域²公益財団法人放射線影響協会 放射線疫学調査センター³つくば国際大学 診療放射線学科

Review of Cohort Studies Among Radiologists, Radiological Technologists, and Nuclear Workers

Shin'ichi KUDO^{*1,2}, Kazumasa INOUE¹, Masahiro FUKUSHI^{1,3}¹ Faculty of Health Sciences, School of Radiological Science, Tokyo Metropolitan University² Institute of Radiation Epidemiology, Radiation Effects Association³ Department of Radiological Technology, Tsukuba International University

A number of epidemiological studies have been conducted to investigate the health effects of low-dose radiation. The author reviewed epidemiological studies among radiologists, radiological technologists, and nuclear workers. Because the results of many epidemiological studies on these subjects have been published, and many studies have measured radiation doses, there is little uncertainty. In the studies among radiologists and radiological technologists, high risks for leukemia, skin cancer, and breast cancer were found in populations that began work before around 1950, but not seen such a tendency for those starting work recent years. The results of the studies among nuclear workers were inconsistent with some reporting that a risk was seen, while others reported no risk. The reason for this may be due to the different analysis methods among the studies.

Keywords: radiologist, radiological technologist, nuclear worker, occupational exposure, cancer

1. はじめに

1.1 背景, 目的

高線量・高線量率放射線による組織反応, 確率的影響については原爆被爆者の研究から明らかにされており, 現在の放射線防護基準の基となる International Commission on Radiological Protection (ICRP) の勧告はこの結果に基づいている。一方, 低線量・低線量率の放射線による健康影響については各国において様々な研究がなされている。低線量・低線量率放射線を被ばくした者に対する疫学研究には, 高自然放射線地域の住民, CT スキャン受診者, 放射線業務従事者等の研究があるが, 放射線業務従事者は個人毎に線量が測定されているものが多く, これを対象とした研究は先の2つを対象とした研究に比べて不確かさが少ないと言える。またCT スキャン受診者は先に体調不良があるためにCTを受診するという因果の逆転が解析結果の解釈を困難にしており, 従事者の研究はこの点でも不確かさは少ない。

疫学のデザインは大別すると, 解析対象集団 (以下, コ

ホート) を設定して追跡を行うコホート研究と, 研究開始時に過去に遡って死亡等の事象が発生した者と比較対照とする者の死亡率等を比較するケース・コントロール研究があるが, 一般にはコホート研究の方が信頼性が高いといわれている。また, 放射線業務従事者を対象とした疫学調査には航空機乗務員を対象としたもの^{1)~3)}もあるが, 多くの調査がなされているのはRadiologist (本稿では放射線科医), Radiological technologist, Radiographer (同, 放射線技師), Nuclear worker (同, 原子力従事者) を対象としたものである。本稿ではこれらをコホートとして放射線と健康影響との関連に着目した疫学研究を概括することを目的とした。

各研究は(1)コホート, (2)観察期間, 総観察人年, (3)平均線量, (4)結果, の4項目で取りまとめた。各研究に触れる前に, 研究を理解するための用語を1.2章で説明する。その後2章では放射線科医, 放射線技師の研究を, 3章では原子力従事者の研究を国別に取り上げ, 4章で考察を述べる。2章の概要を表1に, 3章の概要を表2にもまとめたが, 同一コホートで複数の結果が発表されている場

* 連絡著者(corresponding author) 公益財団法人放射線影響協会放射線疫学調査センター [〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町1-9-16 丸石第2ビル5階]

Institute of Radiation Epidemiology, Radiation Effects Association, Maruishi dai-ni building 5F, 1-9-16 Kajicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0044, Japan

E-mail: s_kudo@rea.or.jp

合、表では最近の結果、または代表的と思われる結果を取り上げた。

1.2 用語説明

1.2.1 総観察人年

個人毎の観察開始日（例えば従事開始日）から観察終了日（例えば死亡日）までの観察期間を、コホート全ての人数について足し合わせて、人年(Person-years)として表したものの、2人を3年観察した場合と3人を2年観察した場合はいずれも6人年となり、例えば年齢が20～24歳の区分でこの両者の6人年が観察された場合、両者の年齢別死亡率は等しいと考える。コホートの年齢構成が違えば、総観察人年から算出される死亡率は異なるが、一般には総観察人年が多いほど解析結果の精度は上がり、統計量の信頼区間は狭くなる。なお、本稿では取り上げないが、原爆被爆者の研究における総観察人年は330万人年となっている⁴⁾。

1.2.2 SMR, SIR, RR, HR

これらはいずれも着目する集団の死亡率（または罹患率）を対照集団と比べた時の比である。1であれば着目する集団の死亡率（または罹患率）は対照集団と等しいことを、また、信頼区間の下限値が1を超えれば有意に高く、上限値が1未満であれば有意に低いことを示す。例えば2であれば、着目する集団の死亡率（または罹患率）が対照集団の2倍であることを意味する。

SMR (Standardized Mortality Ratio, 標準化死亡比) はコホートの死亡率を他の集団と比べる統計量として用いられる^{5), 6)}。SMRは次式の指標である。

$$\text{SMR} = \text{観察死亡数} / \text{期待死亡数}$$

ここで観察死亡数は解析対象とする死因における死亡数であり、期待死亡数はコホートの死因・年齢・暦年等のカテゴリー別死亡率が対照集団の死亡率（多くはその国の男性全体または女性全体等の統計データ）と同率であると仮定した死亡数である。従事者は従事が可能である程度に健康であり、対照集団には健康状態が思わしくない者を含むことから、コホートが従事者である場合、SMRが1を大きく下回ることがあり、これを健康労働者効果(Healthy Worker Effect)と呼ぶ。コホートと比較のための対照集団の年齢構成、追跡期間の違いによる時代効果、ベースライン死亡率は各々の調査によって異なる。このためSMRの比較の際には、そのことを念頭に置く必要がある。

SIR (Standardized Incidence Ratio, 標準化罹患比) はがん罹患数に着目した統計量で、SMRと同様に次式によって表される指標である。

$$\text{SIR} = \text{観察がん罹患数} / \text{期待がん罹患数}$$

RR (Relative Risk, 相対リスク) は着目する集団の死

亡率を対照集団と比べた時の比という点でSMR, SIRと同義であるが、SMR, SIRが対照集団の死亡率を一般国民から求めることが多いのに対し、コホート内の別の集団を対照群とする場合にその比をRRとすることが多い。しかしその使い分けは厳密ではなく、放射線科医、放射線技師を対象とした調査では、健康労働者効果を避けるために被ばく機会がほとんどない精神科医等を対照集団とし、対照集団と着目する集団の死亡率の比をSMRとしている研究もある。一方、それとは逆にSMR, SIRをRRと呼称している研究もある。本稿ではRRがSMR, SIRの意味で用いられている場合はSMR, SIRとし、表では解釈上差し支えなければ注釈を入れていない。

HR (Hazard Ratio, ハザード比) は着目する集団のハザード^(注1)を他の集団のハザードで除したRRである。

1.2.3 ERR

ERR (Excess Relative Risk, 過剰相対リスク) は放射線疫学特有の統計量であり、単位線量当たりのコホートの死亡率（または罹患率。本章では以下同様）の増加分を表すために用いられる。定義は $RR - 1$ であり、RRは線量がゼロの場合に対する単位線量（多くは1 Sv）当たりの死亡率の比を示す⁷⁾。ゼロであれば着目する集団の死亡率は線量がゼロの集団と等しいことを、信頼区間の下限値がゼロを超えれば有意に高く、上限値がゼロ未満であれば有意に低いことを示す。解析に用いられた線量が実効線量ならERR/Sv、臓器吸収線量ならERR/Gyと表される。ERR/SvまたはERR/Gyが2であれば、1シーベルトを被ばくした場合に、線量がゼロの場合と比べて死亡率が2倍上乘せられる、即ち死亡率が3倍となることを意味する。リスクが直線的に増加することを仮定した場合には（ほとんどの場合がそうである）、例えば100 mSvの死亡率はERR/Sv(Gy)を10分の1にすることで求められる。エンドポイントががん罹患の場合でも表示は同じであるため、いずれであるのかは論文から読み取る必要がある。

統計量については、放射線科医、放射線技師の研究ではSMR, SIRが主に用いられている。ERRは線量データが必要とするが、これらの研究では線量が測定、推定されていないことが多いことを反映していると思われる。線量が測定（一部は推定）されている原子力従事者の研究ではERRが主に用いられている。

解析対象死因については、放射線科医、放射線技師の研究では主に全がん、全白血病が対象とされているが、原子力従事者の研究では主に白血病を除く全がん、慢性リンパ性白血病(Chronic lymphocytic leukemia, 以下CLL)を除く白血病が対象とされている。

(注1) 単位時間当たりのイベント数（ここでは死亡とする）という点で死亡率と同義であるが、この時間 t を短くし $\Delta t \rightarrow 0$ の極限を取ったものをハザードという。別の言い方をすれば、時間 t まで生存していた者が次の瞬間に死亡する確率となる。

Table 1 Summary including SMRs and 95% confidence intervals of each epidemiological study of cancer mortality among radiologists and radiological technologists

Cohort ^a	Cohort size ^b	Observed period	Total PY ^c	Mean dose (mSv, mGy)	SMRs and 95% CIs					
					All causes	All cancers	Leukemia	Breast	Skin	Others
Japanese technologists [8]	12,195 (0)	1969–1993	272,043	Year of birth ≤1933: 470 mSv >1934: 132 mSv	Year of birth ≤1933: 0.69 (0.65, 0.74) >1934: 0.54 (0.46, 0.61)	Year of birth ≤1933: 0.81 (0.73, 0.90) >1934: 0.80 (0.63, 0.99)	Year of birth ≤1933: 1.55 (0.85, 2.60) >1934: 0.95 (0.35, 2.08)		Year of birth ≤1933: 1.58 (0.24, 5.73) >1934: 0.00 (0.00, 8.89) ^d	Lymphoma ^e Year of birth ≤1933: 1.59 (1.12, 2.20) >1934: 0.86 (0.40, 1.64) Non-cancers: 1.18
US radiologists [13]	6,510 (0)	1920–1974	573,395		1.20	1.31	1.67			
US radiologists [14]	43,763 (20)	1979–2008			Year of graduation (Male) <1940: 0.96 (0.88, 1.05) 1940–: 0.98 (0.93, 1.03) 1960–: 0.87 (0.81, 0.95) 1980+: 0.66 (0.54, 0.81)	Year of graduation (Male) <1940: 1.12 (0.94, 1.34) 1940–: 0.99 (0.90, 1.08) 1960–: 0.96 (0.84, 1.10) 1980+: 0.96 (0.62, 1.48)	Year of graduation (Male) <1940: 1.91 (0.83, 4.41) 1940–: 1.31 (0.89, 1.94) 1960–: 0.91 (0.52, 1.58) 1980+: 1.25 (0.17, 9.49)		Year of graduation (Male) <1940: 6.38 (1.75, 23.20) 1940–: 1.29 (0.78, 2.14) 1960–: 0.67 (0.37, 1.23) 1980+: 0.31 (0.04, 2.75)	Non hod-jikin lymphoma Year of graduation (Male) <1940: 2.69 (1.33, 5.45) 1940–: 1.01 (0.70, 1.55) 1960–: 0.94 (0.58, 1.55) 1980+: 0.57 (0.11, 2.86)
US technologists [15]	146,022 (73)	1926–1997	698,028 [16]	37 mGy ^f [17]		Year of first worked <1940: 1.28 (0.93, 1.69) ^g 1940–: 1.17 ^g 1950–: 1.18 ^g 1960+: 1.00 ^g (Reference)	Year of first worked <1950: 1.64 (0.42, 6.31) ^g 1950+: 1.00 ^g (Reference)	Year of first worked <1940: 2.92 (1.22, 7.00) ^{gh} 1940–: 2.44 (1.26, 4.75) ^{gh} 1950–: 1.24 (0.77, 2.00) ^g 1960+: 1.00 ^g (Reference)	Year of first worked <1940: 8.6 (1.0, 72.7) ^{gi} 1940–: 1.6 (0.5, 5.1) ^{gi} 1950–: 1.1 (0.5, 2.5) ^{gi} 1960–: 0.9 (0.5, 1.4) ^{gi} 1970+: 1.00 ^{gi} (Reference)	
US army technologists [24]	6,560 (0)	1946–1974	174,500		NS					
UK radiologists [25]	2,698 (0)	1897–1997	69,615		Year of first registration 1897–: 0.97 1921–: 0.92 1936–: 1.00 1955+: 0.68 ^j	Year of first registration 1897–: 1.75 ^j 1921–: 1.24 1936–: 1.12 1955+: 0.71			Year of first registration 1897–: 4.35 1921–: 4.55 1936–: 0.00 ^d 1955+: 0.00 ^d	
Canada [27]	67,562 (65)	1951–1987		3.78 mSv	0.53 (0.51, 0.55) ^k	0.78 (0.75, 0.82) ^{kl}				Thyroid cancer 1.74 (1.40, 2.14) ^{kl}
China x-ray workers [29]	27,011 (20)	1950–1995	694,886	Year of employed <1970: 551 mSv 1970+: 82 mSv		Year of employed <1970: 1.24 ^{hl} 1970+: 1.08 ^l	Year of employed <1970: 2.37 ^{hl} 1970+: 1.73 ^l	Year of employed <1970: 1.34 ^l 1970+: 1.33 ^l	Year of employed <1970: 4.31 ^{hl} 1970+: 2.74 ^l	
Denmark [30]	4,151 (82)	1968–1985	49,553	18.4 mSv		Year of radiation dose measurement 1–: 1.04 ^l 3–: 0.92 ^l 6+: 1.21 ^l		Year of radiation dose measurement 1–: 1.21 ^l 3–: 1.26 ^l 6+: 1.43 ^l		Prostate cancer 6.02 (1.94, 14.06) ^l

a: The number in blankets indicate the reference number. b: The number in parentheses indicate the percentage of women. c: Person years. d: The number of observed death was zero. e: Lymphatic and hematopoietic. f: Female breast dose. g: RR. h: $p < 0.05$. i: Melanoma. j: $p < 0.001$. k: 90% CI. l: SIR.

Table 2 Summary including ERRs, SMRs and 95% confidence intervals of each epidemiological study of cancer mortality among nuclear workers

Cohort ^a	Cohort size ^b	Observed period	Total PY ^c	Mean dose (mSv, mGy)	ERRs and 95% CIs				SMRs and 95% CIs
					All cancers excluding leukemia	Leukemia excluding CLL	Lung	Non-cancers	
Japan [33]	71,733 (0)	1999–2010	591,000	25.5	0.29 (−0.81, 1.57) ^d	−2.00 (−5.68, 1.68) ^{de}	0.94 (−1.24, 3.90) ^d	1.28 (−0.03, 2.79) ^d	
US NPP ^f [34]	53,698 (12)	1979–1997	698,051	25.7	0.51 (−2.01, 4.64) ^g	5.67 (−2.56, 30.4)	0.246 (−2.51, 8.44)	6.40 (2.29, 12.2)	Solid cancers: 0.65 (0.59, 0.72) Non-cancers: 0.34 (0.32, 0.36)
US pooled [35]	119,196 (20)	1944–1991	4,019,065	20.2	0.14 (−0.17, 0.48)	1.7 (−0.22, 4.7)	0.069 (−0.43, 0.66)	0.026 (−0.25, 0.32) ^h	
US million worker [43]	1,028,301 (20)								
UK [46]	167,003 (10)	1955–2011	3,684,391	25.3 ⁱ	Mortality: 0.285 (0.06, 0.53) ^d Incidence: 0.283 (0.10, 0.48) ^d	Mortality: 1.712 (0.06, 4.29) ^d Incidence: 1.782 (0.17, 4.36) ^d [47]	Mortality: 0.028 (−0.38, 0.51) ^d Incidence: 0.13 (−0.28, 0.61) ^d	Mortality: 0.251 (0.03, 0.49) ^{di} [47]	All causes: 0.83 (0.81, 0.84) All cancers: 0.84 (0.82, 0.86) [47]
France [48]	59,004 (13)	1968–2004	1,469,949	18.4	0.36 (−0.42, 1.25) ^{de}	3.52 (−0.01, 16.00) ^d	0.81 (−0.72, 2.78) ^d	0.31 (−0.71, 1.52) ^{di}	All causes: 0.60 (0.59, 0.62) Solid cancers: 0.68 (0.65, 0.71) Pleural cancer: 1.69 (1.22, 2.27) Skin melanoma: 1.40 (1.02, 1.88)
Russia [49]	25,757 (25)	1948–2015	998,048	419 ^k	0.12 (0.03, 0.21) ^l [50]	1.0 (0.5, 2.0) ^d [51]	Gamma: 0.164 (0.043, 0.300) Plutonium: 3.472 (1.534, 8.952) (Male)	0.04 (−0.00, 0.09) ^j [52]	
Canada [53]	45,316 (17)	1956–1994	613,648	21.64	1.20 (−0.73, 4.33)	9.79 (−1.49, 107)	3.13 (−0.45, 10.4)		
Germany [56]	8,972 (3)	1991–2008	130,737	29.5	0.999 (0.996, 1.001) ^m	1.004 (0.997, 1.011) ^m	0.996 (0.990, 1.002) ^m	1.001 (0.999, 1.002) ^m	All causes: 0.50 (0.45, 0.56) All cancers: 0.65 (0.51, 0.82)
Korea (Mortality) [57]	79,679 (13)	1992–2004	633,159	6.1	7.2 (−5, 21) ^{dn}	16.8 (−34, 149) ^{do}	−2.5 (−6, 38) ^d		All causes: 0.58 (0.54, 0.62) All cancers: 0.73 (0.64, 0.82)
Korea (Incidence) [58]	8,429 (0)	1992–2005	63,503	19.9	2.06 (−1.91, 9.0)		−0.58 (−9.28, 19.59) ^p		All cancers: 1.07 (0.87, 1.30) ^q Thyroid: 5.93 (2.84, 10.9) ^q
15-country [59]	407,391 (10)	1943–2000	5,192,710	19.4	0.97 (0.27, 1.80) ^d	1.93 (−0.0, 7.14) ^d	1.86 (0.49, 3.63) ^d	0.24 (−0.23, 0.78) [60]	
INWORKS [62]	308,297 (13)	1944–2005	8,221,032	20.9 ^r	0.48 (0.20, 0.79) ^d	2.96 (1.17, 5.21) ^d [63]	0.56 (0.08, 1.02) ^d [64]	0.19 (0.07, 0.30) ^d [65]	

a: The number in brackets indicate the reference number. b: The number in parentheses indicate the percentage of women. c: Person years. d: 90% CI. e: Last estimate. f: Nuclear Power Plant. g: Solid cancers. h: Cardiovascular diseases. i: 10-year-lagged dose. j: Circulatory disease. k: External lung dose. l: Solid cancers other than lung, liver, and bone. m: Hazard ratio per mSv. n: All cancers. o: All leukemia. p: No convergence of lower bound. q: SIR. r: Colon dose.

2. 放射線科医, 放射線技師

2.1 日本：放射線技師^{8), 9)}

(1) コホート

1950年以前に生まれた日本の放射線技師12,195人（全て男性）。日本では線量計の装着が義務付けられたのが1958年であるため¹⁰⁾，それ以前に従事した可能性の有無により，コホートを1933年以前に生まれた者（コホート

1：4,595人）と1934年以降に生まれた者（コホート2：7,600人）に分割した。

(2) 観察期間，総観察人年

1969～1993年，272,043人年。

(3) 平均線量

コホート1のうち職歴が入手できた3,461人の平均累積線量は470 mSvであった。コホート2については職歴が得られなかったが，21歳から60歳まで一般の病院で通常

の防護服を着用して勤務していたとの仮定に基づき 132 mSv と推定された。

(4) 結果

日本人男性を対照とした SMR はコホート 1, 2 各々で、全死亡では 0.69 (95% 信頼区間 (以下, CI): 0.65, 0.74), 0.54 (0.46, 0.61), 全がんでは 0.81 (0.73, 0.90), 0.80 (0.63, 0.99) と有意に低く、健康労働者効果の可能性が考えられた。白血病の SMR は各々 1.55 (0.85, 2.60), 0.95 (0.35, 2.08) と点推定値に違いが見られ、リンパ造血系では 1.59 (1.12, 2.20), 0.86 (0.40, 1.64) とコホート 1 の SMR は有意に高かった。皮膚がんの SMR はコホート 1 が 1.58 (0.24, 5.73) であったが、コホート 2 の観察死亡数がゼロであったため比較ができなかった。著者らはこのコホート 1, 2 の推定線量の差 (各々 472 mSv, 132 mSv) は、コホート 2 に比べてコホート 1 でリンパ造血系のがんのリスクが高いことを説明するのに十分であると考えられると述べている。

2.2 米国

2.2.1 放射線科医

2.2.1.1 Matanoski らによる研究^{11)~13)}

(1) コホート

北米放射線学会 (Radiological Society of North America) に 1920-1969 年の間に加入した放射線科医 6,510 人 (全て男性)。

(2) 観察期間、総観察人年

1920~1974 年, 573,395 人年。

(3) 平均線量

原著論文に記載なし。

(4) 結果

全人口を対照とした SMR を算出し、比較のために被ばく機会がほとんどない内科医、耳鼻科医、眼科医についても算出した。放射線科医の全死亡、全がん、白血病の SMR は 1.20, 1.31, 1.67 であり、これは内科医の 0.97, 0.98, 0.82, 耳鼻科医の 0.96, 0.97, 1.04, 眼科医の 0.83, 0.64, 0.57 に比べて有意に高かった。また、コホートを従事開始年で 1939 年以前と 1940 年以降に分けて全死亡、全がんの放射線科医の死亡率を他の専門医と比べた場合、1939 年以前では放射線科医の死亡率は他の専門医より高かったが、1940 年以降では 50 歳以前では低く、50 歳を過ぎると死亡率が上昇した。著者らは、この結果の意味するところは明らかではないとしている。

2.2.1.2 González らによる研究¹⁴⁾

(1) コホート

American Medical Association Physicians Masterfile に登録され、米国において 1902 年以降に開業した放射線科医 43,763 人を対象とした。このうち女性は 8,851 人と 20% を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1979~2008 年、観察人年は原著論文に記載なし。

(3) 平均線量

原著論文に記載なし。

(4) 結果

放射線被ばく機会がほとんどないと考えられる精神科医 64,990 人を対照群とし、SMR^(注2) を算出した。男性の全死亡の SMR は 0.94 (95%CI: 0.90, 0.97) と有意に低かったが、Medical school の卒業年別に見た場合、最近であるほど低い傾向が見られた。この傾向は全がん、白血病、皮膚がんでも見られ、1939 年以前に卒業した者の SMR は皮膚がんが 6.38 (1.75, 23.20)、非ホジキンリンパ腫で 2.69 (1.33, 5.45)、脳血管疾患で 1.49 (1.11, 2.01) と有意に高く、これらの結果は放射線被ばくによる可能性があるとしている。しかし 1960 年以降に卒業した者では全がん、皮膚がんの SMR の点推定値は 1 を下回っていた。白血病における 1939 年以前に卒業した者の SMR は 1.91 (0.83, 4.41) と点推定値はほぼ 2 であるが、有意差はなかった。女性は全死亡の SMR が 0.83 (0.70, 0.97) と有意に低かったが、部位別、疾患別の解析では有意差がなかった。

2.2.2 放射線技師^{15)~23)}

(1) コホート

米国では放射線技師の被ばく線量等が American Registry of Radiologic Technologists (ARRT) というデータベースに登録されている。このデータベースに登録された者のうち、米国のいずれかの州または地域に居住し、1926~1982 年の間に ARRT に少なくとも 2 年間の認定を受けた放射線技師の記録から特定された 146,022 名を US Radiologic Technologists (USRT) コホートとしている。このうち女性は 73% と多数を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1926~1997 年¹⁵⁾, 698,028 人年¹⁶⁾。

(3) 平均線量

観察期間を 2008 年まで延長した乳がんの解析では、1960~1997 年の線量記録を元に、観察期間における乳房線量を 37 mGy と推定した¹⁷⁾。ただしこれは上記 (1)(2) のコホート、観察期間のものとは (一部重複はあると思われるが) 異なる。

(4) 結果

全死亡 SMR は男性で 0.76 (95%CI: 0.7, 0.8), 女性で 0.76 (0.7, 0.8), 全がん SMR は男性で 0.73 (0.7, 0.8), 女性で 0.86 (0.8, 0.9) と有意に低かった¹⁵⁾。しかし罹患率で見した場合、男性の固形がん SIR は 0.92 (95%CI: 0.85, 0.98) と有意に低かったが、女性では 1.06 (1.02, 1.10) と有意に高かった¹⁸⁾。

1960 年以降に従事を開始した者を基準群とした死亡 RR

(注2) 原著論文では RR。

を従事開始年別に見た場合、全がん、乳がん、黒色腫では古い時期ほどRRが高い傾向が見られ、乳がんでは1940～1949年が2.44 (1.26, 4.75), 1939年以前が2.92 (1.22, 7.00)と有意に高かったが、1950～1959年に従事を開始した者では1.24 (0.77, 2.00)と有意差がなかった^{15), 19)}。乳がんを罹患率で見た場合も、1970年以降に従事を開始した者に対して、1934年以前に従事を開始した者のRRは2.9 (1.3, 6.2)と有意に高かったが、1950年以降の者では有意差がなかった²⁰⁾。観察期間を2008年まで延長した解析では、罹患率、死亡率とも出生年が1929年以前の集団において有意に高い乳がんのERRが見られたが、出生年が1950年以降の集団では有意差がなかった。従事状況等から個人毎の乳房線量の推定を行った結果、1929年以前に従事を開始した集団における累積線量は1,168 mGyであり、1980年以降に従事を開始した集団では6 mGyであった¹⁷⁾。

その他の部位では、死亡率では脳の新生物で有意に高いHRが見られたが²¹⁾、肺がんでは見られなかった²²⁾。罹患率では非黒色腫性の皮膚がん、1959年以前に従事した集団において高いRRが見られた²³⁾。

2.2.3 陸軍の放射線技師²⁴⁾

(1) コホート

第2次世界大戦中に放射線技師として訓練された陸軍の放射線技師6,560人（全て男性）。

(2) 観察期間、総観察人年

1946～1974年、総観察人年は原著論文に記載なし。

(3) 平均線量

原著論文に記載なし。

(4) 結果

医療従事者、研究者、薬剤師を対照群として死亡率の比較を行った。がん、その他の死因において有意差は見られなかった。

2.3 英国：放射線科医²⁵⁾

(1) コホート

英国のRadiological SocietyまたはRoyal College of Radiologistsに1897～1979年の間に登録された者2,698人（全て男性）。

(2) 観察期間、総観察人年

1897～1997年、69,615人年。

(3) 平均線量

原著論文に記載なし。

(4) 結果

登録時期を1897～1920年、1921～1935年、1936～1954年、1955～1979年の4群に分けた上で、男性開業医を対照群としたSMRを算出した。登録時期別の全がんのSMRは、各々1.75 ($p < 0.001$), 1.24, 1.12, 0.71と古い時期ほど高い傾向が見られた。皮膚がんでは各々4.35, 4.55,

0.00, 0.00だが、前者の2つはいずれも観察死亡数が2例であり、後者の2つはゼロであるため比較はできない。

最初の登録からの経過年数別に見た場合、40年以上の群における全がんのSMRは1.41 (95%CI: 1.03, 1.90)と有意に高く、これは1954年以前に登録した者の寄与によると、著者らは述べている。がんを除いた全ての死因では登録時期が1897～1920年、1921～1935年のSMRがいずれも0.86と有意に低かったことから、著者らは、最初の登録から40年以上経過した期間におけるがん死亡率の高いSMRは、1921～1954年に最初の登録を行った群における放射線被ばくの長期的影響と考えられるとしている。また、被ばく線量が低かったと思われる1955年以降に最初に登録した放射線科医では、がん死亡率の増加を示す証拠はなく、がん以外の死因については、登録時期にかかわらずリスクが増加しているという証拠はなかったと述べている。

2.4 カナダ：放射線医療従事者^{26)～28)}

(1) コホート

National Dose Registry of Canada（以下、NDR）に1951～1987年までに登録された者から、個人を特定する情報が不十分である者を除いた67,562人。内訳は内科医、看護師、放射線技師等であり、女性が65%を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1951～1987年、総観察人年は原著論文に記載なし。

(3) 平均線量

3.78 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

カナダの一般国民を対照群としてSMR, SIRを算出した。全死亡のSMRは0.53 (90%CI: 0.51, 0.55)、全がんのSIRは0.78 (0.75, 0.82)と有意に低かった。女性の肝がんSIRが2.41 (1.05, 4.75)と有意に高かったが、症例数は6であり、著者らは偶然の可能性があると述べている。また、甲状腺がんのSIRは1.74 (1.40, 2.14)と有意に高かったが、NDRに含まれて、より高い外部被ばく量を受けた他の職業グループでは同様の増加が観察されなかった²⁸⁾。ことから、この結果は外部被ばくに関連しているとは考えにくく、少なくとも部分的には、医療へのアクセスが容易になった結果として説明できると述べている²⁷⁾。

2.5 中国：X線作業員²⁹⁾

(1) コホート

中国では放射線科医と放射線技師は厳密に区別されていないため、両者を含めたX線作業員を対象として、中国国内の24の地方にある大病院で1950年から1980年の間に雇用されたX線作業員27,011人をコホートとした。このうち女性は5,443人と20%を占める。また、コホートを1969年以前に雇用された者（コホート1：10,207人）と

1970年以降に雇用された者（コホート2：16,804人）に分割した。

(2) 観察期間，総観察人年

1950～1995年，694,886人年。

(3) 平均線量

職歴，従事状況等から，コホート1は551 mSv，コホート2は82 mSvと推定された。

(4) 結果

対照集団を同じ病院の外科医，内科医，耳鼻科医として，SIR^(注3)を算出した。有意に高いSIRが全がん，白血病，固形がん，食道がん，肝がん，肺がん，膀胱がん，乳がん，皮膚がんで見られた。この有意に高いSIRは，乳がんを除いて男性従事者によってもたらされている。コホート1, 2のSIRは全がんでは1.24, 1.08, 白血病では2.37, 1.73, 皮膚がんでは4.31, 2.74であり，いずれもコホート1のSIRは有意に高いが，コホート2のSIRは有意差がなかった。同様の傾向は固形がん，肝がん，膀胱がん，甲状腺がんでも見られたが，乳がんでは1.34, 1.33とほぼ等しい値となった。コホート1, 2の推定線量の違い（各々551 mSv, 82 mSv）から著者らは，電離放射線の長期分割照射によって累積線量が一定のレベルに達すると，有意ながんリスクが誘発されることを意味すると述べている。

2.6 デンマーク：放射線治療従事者³⁰⁾

(1) コホート

Finsen Institute, 及びAarhus Municipal Hospital に1954～1982年の間に従事し，1968年4月1日時点で生存している放射線治療従事者4,151人。内訳は看護師が42%，内科医が17%等となっており，女性が82%と多数を占める。

(2) 観察期間，総観察人年

1968～1985年，49,553人年。

(3) 平均線量

18.4 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

全がんSIR^(注4)は1.07 (95%CI: 0.91, 1.25)と有意差はなかった。前立腺がんでは6.02 (1.94, 14.06)と有意に高かったが，症例数が5例であるため，偶然の可能性が高いとしている。その他の部位では有意差は見られなかった。線量が測定された年数を1-2, 3-5, 6以上と区分し，各々についてSIRを見た場合，全がんでは1.04, 0.92, 1.21, 乳がんでは1.21, 1.26, 1.43と増加傾向が見られたが，有意差はなかった。著者らは，放射線量や被ばく年数とがんリスクとの間には関連性は認められなかったが，最初の被ばくからの時間が経過するにつれて，有意ではない弱い増加

が認められた，と述べている。

2.7 その他

2.7.1 韓国³¹⁾

Interventional radiology departmentsの従事者55人を対象とした研究では，LAR (Lifetime Attributable Risk：放射線被ばくに起因するがんの早期発症確率を10万人当たりの過剰症例数として算出した値) とLFR (Lifetime Fractional Risk：生涯ベースラインリスクに対するLARの比) を算出した。部位別に見た場合，最も高いLAR, LFRは甲状腺がんで見られた。

2.7.2 北欧³²⁾

デンマーク，フィンランド，アイスランド，ノルウェー，スウェーデンの国勢調査人口1,500万人と，追跡調査で得られた280万人のがん症例を元に，職業とがん罹患との知見を得るための生態学的研究^(注5)が実施された。著者らは白血病について，急性骨髄性白血病の環境および職業上の危険因子には，タバコの煙，(略)，高線量放射線への曝露，高線量ベンゼンへの曝露，(略)などがあるが，今回の結果からは，これらの要因による影響を観察することは困難である，と述べている。

3. 原子力従事者

3.1 日本³³⁾

(1) コホート

1999年3月31日までに放射線業務従事者として（公財）放射線影響協会放射線従事者中央登録センターに登録された者のうち，1997年と2003年に実施した生活習慣等アンケート調査に回答し，喫煙について有効回答のある71,733人（全て男性）。コホートの大半を原子力発電施設の従事者が占め，その他は研究施設，燃料加工施設の従事者となっている。

(2) 観察期間，総観察人年

1999～2010年，591,000人年。

(3) 平均線量

25.5 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

喫煙状況，総喫煙量，禁煙からの経過年数等を用いた喫煙調整により，ERR/Svが下がることが示された。喫煙調整前後のERR/Svは白血病を除く全がんが0.80 (90%CI: -0.39, 2.19)と0.29 (-0.81, 1.57)，肺がんが1.94 (-0.56, 5.26)と0.94 (-1.24, 3.90)であった。著者らは線量と喫煙との相関が示唆される場合には，喫煙が放射線リスクを評価する際の重要な交絡因子となると述べている。

(注3) 原著論文ではRR.

(注4) 原著論文ではRR.

(注5) 個人毎の情報を有する集団を用いるコホート研究と異なり，個人毎の情報を有しない集団（国，地域等）を単位として解析する研究方法。

3.2 米国

3.2.1 原子力発電施設等従事者³⁴⁾

(1) コホート

1979～1997年の間に15の原子力発電施設事業者（プラント数では52）に1年以上従事した53,698人。うち女性は6,387人で12%を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1979～1997年、698,051人年。

(3) 平均線量

25.7 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

SMRは固形がんでは0.65 (95%CI: 0.59, 0.72)、非新生物疾患では0.34 (0.32, 0.36)と強い健康労働者効果が見られた。ERR/Svは固形がんが0.51 (−0.21, 4.64)、CLLを除く白血病が5.67 (−2.56, 30.4)と有意ではないが、非新生物疾患では6.40 (2.29, 12.2)と有意に高く、これは動脈硬化性心疾患の寄与が8.78 (2.10, 20.0)と大きいことによる。これについて著者らは、心臓疾患との関連性は他のいくつかの職業研究でも報告されているが、今回の関連性の大きさはそれらと一致していないため解釈には注意が必要であり、今後も注目していく必要がある、と述べている。

3.2.2 合同解析³⁵⁾

(1) コホート

過去に実施された軍事関連施設従事者や研究施設従事者の研究、即ちHanford^{36), 37)}、Idaho National Engineering and Environmental Laboratory³⁸⁾、Oak Ridge National Laboratory³⁹⁾、Portsmouth Naval nuclear shipyard⁴⁰⁾、Savannah River^{41), 42)}の研究では、これらの施設に30日以上従事し、外部線量が記録された者をコホートとしている。合同解析ではこれらを統合した119,196人をコホートとした。うち女性は20%を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1944～1991年、4,019,065人年。

(3) 平均線量

20.2 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

白血病を除く全がん、及びCLLを除く白血病のERR/Svは各々0.14 (95%CI: −0.17, 0.48)、1.7 (−0.22, 4.7)と有意ではなかったが、リンパ造血系のがんは2.0 (0.71, 3.5)と有意に高く、そのなかでもリンパ腫、多発性骨髄腫のERR/Svは各々、1.8 (0.027, 4.4)、3.9 (0.60, 9.6)と有意に高かった。著者らは、リンパ腫の高いリスク推定値は、本解析のコホートの一部であるSavannah River、英国、チェルノブイリ、その他医療被ばくを受けた者の研究で見られており、多発性骨髄腫の高いリスク推定値も、後述する15か国研究や英国の罹患率解析で見られていると述べている。

3.2.3 Million Worker Study^{43)～45)}

(1) コホート

現在進行中の研究としてMillion Worker Study（以下、MWS。論文によってはMillion Person Studyと呼称されている。）がある。マンハッタン計画の期間中およびその後雇用されたエネルギー省職員が36万人、原子力発電施設従事者が15万人、地上での核実験に参加した退役軍人が11.5万人、初期の放射線技師やその他の医療従事者が25万人、工業放射線技師が13万人となっており、総人数は現在のところ1,028,301人、うち女性は20%を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

未発表。

(3) 平均線量

未発表。

(4) 結果

2019年時点での進捗状況は、30万人について完了（筆者（工藤）注：おそらく生死状況、死因、線量データ等の確定）、残りについては3年以内に完了、あるいは調査開始予定とのことである。サブコホートについての解析結果は公表されているものもある⁴⁵⁾が、MWSとしての解析は2022～2023年頃の完了が予定されている。

3.3 英国^{46), 47)}

(1) コホート

軍事関連施設、燃料加工・再処理施設、電力会社に1999年までに従事し、線量記録が保管されている167,003人。女性は16,437人と10%を占めている。

(2) 観察期間、総観察人年

1955～2011年、3,684,391人年。

(3) 平均線量

25.3 mSv（潜伏期10年を仮定した平均線量）。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

白血病を除く全がんのERR/Svは死亡率で0.285 (90%CI: 0.06, 0.53)、罹患率で0.283 (0.10, 0.48)と有意に高かった。また、部位別がんにおいても死亡率では直腸、喉頭、膀胱、罹患率では直腸、胸膜、リンパ造血系等有意に高いERR/Svが見られた。これらの結果について著者らは、長期の観察により狭い信頼区間を実現でき、得られたリスク推定値は原爆被爆者の研究結果と一致している、と述べている。

3.4 フランス⁴⁸⁾

(1) コホート

使用済み燃料再処理、燃料加工等の燃料サイクル事業が主体のCEA-AREVA Nuclear Cycleにおいて1950～1994年の間に1年以上従事した者、または原子力発電施設が主

体の Électricité de France において1961～1994年の間に1年以上従事した者について、1968年1月1日時点で生存し、線量が記録されていない者等を除外した59,004人。うち女性は7,436人で13%を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1968～2004年、1,469,949人年。

(3) 平均線量

18.4 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

SMRは全死亡が0.60 (95%CI: 0.59, 0.62)、固形がんが0.68 (0.65, 0.71)と強い健康労働者効果が見られたが、胸膜がんでは1.69 (1.22, 2.27)、黒色腫では1.40 (1.02, 1.88)と有意に高かった。胸膜がんについては、従事年数が長いほどSMRが増加する傾向があったことから、著者らはアスベスト等の職業ばく露による可能性が部分的にあるかもしれないと述べている。しかしながら黒色腫については従事年数が長いほどSMRが減少する傾向となっており、そのような可能性は職業ばく露の可能性は支持されないとしている。

また、ERR/Svは固形がんが0.36 (90%CI: -0.42, 1.25)、CLLを除く白血病が3.52 (<0, 16.00)と有意ではないが、骨髄性白血病では14.95 (1.21, 43.61)と有意に高かった。骨髄性白血病の有意に高いERR/Svは最高線量群における1例の死亡によってもたらされており、また骨髄性白血病の原因となるベンゼンにばく露した可能性も考えられるため、解釈には注意が必要と著者らは述べている。

3.5 ロシア (Mayak)^{(49)～(52)}

(1) コホート

1948年に核兵器製造施設として操業を開始したMayak Production Associationにおいて、1948～1982年の間に原子炉、放射科学施設、プルトニウム製造施設、水処理施設、機械修理施設に従事したことのある25,757人。うち女性は6,362人で25%を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1948～2015年、998,048人年。

(3) 平均線量

419 mGy (肺の外部線量)。ほぼ全員について線量が測定されているが、一部は職歴から推定された。

(4) 結果

ガンマ線による外部被ばくとプルトニウムによる内部被ばくの各々について肺がん死亡のERR/Gyを算出した。男性ではガンマ線0.164 (95%CI: 0.043, 0.300)、プルトニウム3.472 (1.534, 8.952)。女性ではガンマ線0.550 (-0.102, 1.274)、プルトニウム8.910 (2.671, 28.263)であった。これらの結果から著者らは、ガンマ線による外部被ばくとプルトニウムによる内部被ばくの両方で、肺がんの発生率が有意に増加したと述べている。また、肺、肝、骨を除いた

固形がんでは0.12 (-0.73, 4.33)と有意に高いERR/Gyが見られており、喫煙経験の有無による喫煙調整はERR/Gyにほとんど影響を与えなかったとしている⁽⁵⁰⁾。CLLを除く白血病においても1.0 (0.5, 2.0)⁽⁵¹⁾と有意に高いERR/Gyが見られている。

3.6 カナダ^{(53)～(55)}

(1) コホート

Atomic Energy of Canada Limited (AECL), Ontario Hydro, Hydro-Quebec, New Brunswick Power Corporationにおいて1年以上従事した者をコホートとした。AECLは1949年に操業を開始したが、1956年の火災により線量記録が消失したため、コホートには1956年以降の従事者のみが含まれた。残りの3社の操業開始は1956年以降である。線量データの不備が判明したため^{(54), (55)}、修正に伴い若干名の除外、追加を行った45,316人を新コホートとして解析を行った。女性は7,619人と17%を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1956～1994年、613,648人年。

(3) 平均線量

21.64 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

白血病を除く全がんのERR/Svは1.20 (95%CI: -0.73, 4.33)と有意ではなく、部位別がんでも有意に高い死因はなかった。

3.7 ドイツ⁽⁵⁶⁾

(1) コホート

旧西ドイツにある17の発電施設のいずれかにおいて、1991年1月1日時点で従事していた者、また、2008年12月31日までに従事を開始した者のうち、年間の実効線量が6 mSvを超える、または超える可能性がある従事を3か月以上継続した者8,972人。うち女性は226人と3%を占める。

(2) 観察期間、総観察人年

1991～2008年、130,737人年。

(3) 平均線量

29.5 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

SMRは全死亡が0.50 (95%CI: 0.45, 0.56)、全がんが0.65 (0.51, 0.82)、非新生物疾患が0.43 (0.35, 0.53)と強い健康労働者効果を示し、有意に高い死因はなかった。HR/mSvは白血病を除く全がんが0.999 (95%CI: 0.996, 1.001)、肺がんが0.996 (0.990, 1.002)であり、有意に高い死因はなかった。

3.8 韓国

3.8.1 死亡率⁵⁷⁾

(1) コホート

1) 医療, 研究施設, 2) その他の研究施設, 教育施設, 3) 原子力発電施設, 4) 非破壊施設等, 5) 軍隊, 公的組織等において, 1984~2004年の間に電離放射線に被ばくした79,679人。うち女性は10,400人と13%を占める。

(2) 観察期間, 総観察人年

1992~2004年, 633,159人年。

(3) 平均線量

6.1 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

一般国民を対照群としたSMRは全死亡が0.58 (95%CI: 0.54, 0.62), 全がんが0.73 (0.64, 0.82)と強い健康労働者効果を示し, 有意に高い死因はなかった。ERR/Svは全死亡が1.7 (90%CI: -4, 7), 全がんが7.2 (-5, 21)であり, 有意に高い死因はなかった。

3.8.2 罹患率⁵⁸⁾

(1) コホート

1978~2005年の間に4つの原子力発電施設において, 線量計が支給された者のうち, 1992年から2005年にかけて実施した生活習慣等のアンケート調査と健康診断に参加した者8,429人(全て男性)を放射線業務従事者とし, 比較のために放射線被ばくのない7,807人も非放射線業務従事者として解析に含まれた。

(2) 観察期間, 総観察人年

1992~2005年, 63,503人年。

(3) 平均線量

19.9 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

一般国民を対照群とした放射線業務従事者のSIRは全がんが1.07 (95%CI: 0.87, 1.30)と有意差はなかったが, 甲状腺では5.93 (2.84, 10.9)と有意に高かった。甲状腺がんの有意に高いSIRについては, 非放射線業務従事者のSIRも5.20 (2.24, 10.2)と有意に高いことから, 広く実施されている検診の効果によると著者らは述べている。また, 放射線業務従事者のERR/Svは白血病を除く全がんが2.06 (95%CI: -1.91, 9.0), 甲状腺が45.18 (<-12.13, 97.43)であり, 有意に高い疾患, 部位はなかった。

3.9 15か国研究^{59)~61)}

(1) コホート

オーストラリア, ベルギー, カナダ, フィンランド, フランス, ハンガリー, 日本, 韓国, リトアニア, スロバキア, スペイン, スウェーデン, スイス, 英国, 米国による15か国のデータセットから, 従事年数が1年以下の者等を除外した407,391人。うち女性は39,789人と10%を占める。

(2) 観察期間, 総観察人年

1943~2000年, 5,192,710人年。

(3) 平均線量

19.4 mSv。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

日本, 米国のIdaho National Laboratory, カナダのOntario Hydroのデータは社会経済状態のデータがないという理由で, これを調整する全がんや非がんの解析からは除外されたが, 社会経済状態の調整を行わない白血病の解析には含まれた。白血病を除く全がんのERR/Gyは0.97 (90%CI: 0.27, 1.80)と有意に高かったが, CLLを除く白血病は1.93 (<0, 7.14)と有意ではなかった。白血病を除く全がんの有意に高いERR/Gyはカナダの寄与が大きく, カナダを除外した場合は0.58 (-0.10, 1.39)と有意ではなくなった。公表後にカナダの線量データに不備があり, これを修正した場合にはカナダ及び15か国解析のリスク推定値が下がることが判明した^{54), 55)}。

3.10 INWORKS^{62)~66)}

(1) コホート

米国, 英国, フランスの3か国のコホートを合同した解析。米国101,428人(33%), 英国147,866人(48%), フランス59,003人(19%)からなる総人数308,297人のコホートであり, 各々3.2.2章, 3.3章, 3.4章で述べたコホートが基となっている。うち女性は40,035人と13%を占める。

(2) 観察期間, 総観察人年

1944~2005年, 8,221,032人年。

(3) 平均線量

20.9 mSv (結腸線量)。全員について線量が測定されている。

(4) 結果

白血病を除く全がんのERR/Gyは0.48 (90%CI: 0.20, 0.79), CLLを除く白血病は2.96 (1.17, 5.21), 肺がんは0.56 (0.08, 1.02)と有意に高かった。また, 非新生物疾患は0.19 (0.07, 0.30), 循環器系疾患は0.22 (0.08, 0.37)と有意に高かった。著者らはこれらの結果をもとに, 低線量放射線と固形がん死亡率との関連について直接的な証拠が得られたとし, 非新生物疾患についても放射線に影響される可能性があるとしている。

4. 考 察

放射線科医, 放射線技師をコホートとした研究では, 古い時代(概ね1950年以前)から観察を開始している研究も幾つかある^{15)~25), 29)}。しかし概してコホートの人数が多くないため, 総観察人年が50万を超えているのは米国の放射線科医, 放射線技師^{15)~23)}と中国のX線技師²⁹⁾の研究のみである。カナダ^{26), 27)}, デンマーク³⁰⁾の研究ではコホート全員の線量が記録されていたが, 古い時代では個人

毎の線量データがないものが多く、日本の放射線技師⁸⁾、米国の放射線技師¹⁷⁾、中国のX線技師²⁹⁾の研究では従事状況等から線量が推定されているが、他の研究では行われていない。おそらくこのような事情を反映して、放射線科医、放射線技師をコホートとした研究では暦年間で死亡率（または罹患率）を比較する手法が多く用いられている。この結果、古い時代において全がんが高リスクを示す傾向が見られた。これを疾患別に見た場合、白血病、皮膚がん、乳がんにおいて同様の傾向が見られた。一方、近年の従事者では高リスクは見られていない。放射線科医の年間の平均被ばく線量は、1920～1929年では900～7,000 mSv、1930～1949年では50～100 mSvであったが、法規制、線量低減技術の進歩等により1950年代前半では50 mSv、1960年代前半では5 mSvと大きく下がった。以降1970年代から10年ごとに1 mSv、0.75～0.34 mSv、0.55～0.12 mSvとなり、2000年以降では0.23～0.08 mSvと推定されている⁶⁷⁾。幾つかの疾患が古い時代において高リスクを示し、近年で見られていないことは、被ばく線量の違いによる可能性が考えられる。一方、このことは、近年の従事者は相対的に若く、がんの好発年齢に十分達していないことによる可能性も考えられるため、より長い観察が望まれる。

米国の放射線技師^{15)～23)}、カナダ^{26), 27)}、デンマーク³⁰⁾の研究ではコホートの半数以上を女性が占め、女性に関する健康影響の知見を得られている点で、貴重な研究と言える。米国の放射線技師（USRTコホート）については線量も推定され、解析結果がコンスタントに発表されており、今後の解析が待たれる。

放射線科医、放射線技師は国家資格であり、一般に学歴は高く、健康的な生活習慣を送っていると考えられる。このため、これらのコホートでは被ばく線量の多寡によって、生活習慣、社会経済状態等の特性が大きく異なることは考えにくい。一方、原子力従事者のコホートは、一つのコホート内に電力会社、研究機関、燃料加工、非破壊検査、核兵器製造等、様々な職種が混在していることがあり、コホート内の異質性は放射線科医、放射線技師より大きいと考えられる。このため、原子力従事者のコホートは、放射線科医、放射線技師のコホートに比べて生活習慣、社会経済状態が交絡因子となっている可能性が高いと考えられる。

原子力産業が本格化したのは、放射線の医療利用より新しい時代であるため、原子力従事者の研究における観察開始は古いものでも1940年代からと放射線科医、放射線技師の研究より新しい時期となっている。しかしコホートの人数は概して放射線科医、放射線技師より大きいため、総観察人年が100万を超えている研究もある^{35), 46), 48), 59)～66)}。被ばく線量は放射線科医、放射線技師より低く、ロシアのMayakを除いて概ね20 mSv前後となっている。

原子力従事者の解析結果は一貫していない。白血病を除く全がん（または全がん、固形がん）において有意に高いERR/Sv(ERR/Gy)を示した結果^{46), 50), 59), 62)}がある一方で、有意差がない結果^{33)～35), 48), 53), 56)～58)}もある。

日本の原子力従事者を対象とした研究³³⁾における喫煙状況、総喫煙量、禁煙からの経過年数を用いた喫煙調整が放射線リスク推定値を下げ、死因によっては半分程度となるという結果は、原子力従事者コホートを用いて放射線リスクを検討する際の、交絡因子調整の重要性を示している。

Mayak^{49)～52)}のコホートはガンマ線による高い外部線量と共に、プルトニウムによる高い内部被ばく線量を有している点で特異的である。肺、肝、骨を除く固形がんの解析⁵⁰⁾では、喫煙調整はERR/Gyにほとんど影響を与えなかったとしている。これは喫煙感受性の高い肺、肝を除外したことによる可能性もあるが、一方で、喫煙情報が喫煙経験の有無だけであり、総喫煙量等を考慮していないことによる可能性も考えられる。肺がんの解析⁴⁹⁾では総喫煙量、プルトニウム線量の調整により、外部線量によるERR/Gyが0.64 (95%CI: 0.45, 0.84)から0.19 (0.07, 0.31)に下がることが示されている。ただし総喫煙量の算出に当たって、喫煙データを有しない女性従事者は全て非喫煙としたことや、喫煙本数と喫煙開始年齢が得られなかった従事者（喫煙者の43%）について平均値を代入したことには、不確かさがあるように思われ、この点は著者らも研究の限界と述べている。

現在、原子力従事者をコホートとした研究で最も注目されている研究はINWORKS^{62)～66)}であろう。INWORKSの参加国である米国、英国、フランスを個別に解析した場合の、白血病を除く全がんのERR/Svは米国が0.14、英国が0.28、フランスが0.34であるが、この3か国を合同したINWORKSのERR/Gyは0.48となっており、各国個別のERR/Sv (0.14～0.34)より高くなっている。この原因は、INWORKSが各国個別の解析とは異なる手法を採用したこと、即ち、(1)結腸線量を使用したこと、(2)従事期間が1年未満の者を除外したこと（フランスは個別の解析でも、この規準を採用）、(3)中性子モニタリング状況を調整したこと、に起因する可能性が指摘されている⁶⁸⁾。

既に述べたように、原子力従事者の解析結果は一貫していない。この原因の一つは、交絡因子の調整等の解析手法が研究間で異なることに起因する可能性も考えられる⁶⁹⁾。放射線疫学の結果の解釈に当たっては、この点にも留意する必要があると思われる。

付記

本稿の3.1章で取り上げた日本の原子力従事者の研究は原子力規制委員会原子力規制庁の委託業務として実施したものである。開示すべき利益相反はない。

参考文献

- 1) Kaji M, Tango T, Asukata I, et al.: Mortality experience of cockpit crew members from Japanese airlines. *Aviat. Space Environ. Med.* 64: 748–750, 1993
- 2) Tokumaru O, Haruki K, Bacal K, et al.: Incidence of cancer among female flight attendants: A meta-analysis. *J. Travel Med.* 13: 127–132, 2006
- 3) Blettner M, Zeeb H, Auvinen A, et al.: Mortality from cancer and other causes among male airline cockpit crew in Europe. *Int. J. Cancer* 106: 946–952, 2003
- 4) Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, et al.: Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14, 1950–2003: An overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat. Res.* 177: 229–243, 2012
- 5) 古川俊之, 丹後俊郎: 新版医学への統計学. 朝倉書店, 1998
- 6) Bresow NE, Day NE: Statistical methods in cancer research: Volume II—The design and analysis of cohort studies. Lyon, International Agency for Research on Cancer, IARC Scientific Publications, No. 82, 1987
- 7) 田中司朗, 角山雄一, 中島裕夫, 他: 放射線必須データ 32 被ばく影響の根拠. 創元社, 2016
- 8) Yoshinaga S, Aoyama T, Yoshimoto Y, et al.: Cancer mortality among radiological technologists in Japan: Updated analysis of follow-up data from 1969 to 1993. *J. Epidemiol.* 9: 61–72, 1999
- 9) Yoshinaga S, Yamamoto Y, Aoyama T, et al.: Results and problems of occupational dose reconstruction for Japanese radiological technologists. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 77: 73–78, 1998
- 10) 放射性同位元素等の規制に関する法律: <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=332AC0000000167>. (accessed Sep 8, 2021)
- 11) Matanoski GM, Seltser R, Sartwell PE, et al.: The current mortality rates of radiologists and other physician specialists: Death from all causes and from cancer. *Am. J. Epidemiol.* 101: 188–198, 1975
- 12) Matanoski GM, Seltser R, Sartwell PE, et al.: The current mortality rates of radiologists and other physician specialists: Specific causes of death. *Am. J. Epidemiol.* 101: 199–210, 1975
- 13) Matanoski GM, Sternberg A, Elliott EA: Does radiation exposure produce a protective effect among radiologists? *Health Phys.* 52: 637–643, 1987
- 14) Berrington de González A, Ntwe E, Kitahara CM, et al.: Long-term mortality in 43,763 U.S. radiologists compared with 64,990 U.S. psychiatrists. *Radiology* 281: 847–857, 2016
- 15) Mohan AK, Hauptmann M, Freedman DM, et al.: Cancer and other causes of mortality among radiologic technologists in the United States. *Int. J. Cancer* 103: 259–267, 2003
- 16) Freedman DM, Sigurdson A, Rao RS, et al.: Risk of melanoma among radiologic technologists in the United States. *Int. J. Cancer* 103: 556–562, 2003
- 17) Preston DL, Kitahara CM, Freedman DM, et al.: Breast cancer risk and protracted low-to-moderate dose occupational radiation exposure in the US radiologic technologists cohort, 1983–2008. *Br. J. Cancer* 115: 1105–1112, 2016
- 18) Sigurdson AJ, Doody MM, Rao RS, et al.: Cancer incidence in the U.S. radiologic technologists health study, 1983–1998. *Cancer* 97: 3080–3089, 2003
- 19) Mohan AK, Hauptmann M, Linet MS, et al.: Breast cancer mortality among female radiologic technologists in the United States. *J. Natl. Cancer Inst.* 94: 943–948, 2002
- 20) Doody MM, Freedman DM, Alexander BH, et al.: Breast cancer incidence in U.S. radiologic technologists. *Cancer* 106: 2707–2715, 2006
- 21) Rajaraman P, Doody MM, Yu CL, et al.: Cancer risks in U.S. radiologic technologists working with fluoroscopically guided interventional procedures, 1994–2008. *Am. J. Roentgenol.* 206: 1101–1108, 2016
- 22) Velazquez-Kronen R, Gilbert ES, Linet MS, et al.: Lung cancer mortality associated with protracted low-dose occupational radiation exposures and smoking behaviors in U.S. radiologic technologists, 1983–2012. *Int. J. Cancer* 147: 3130–3138, 2020
- 23) Yoshinaga S, Hauptmann M, Sigurdson AJ, et al.: Non-melanoma skin cancer in relation to ionizing radiation exposure among U.S. radiologic technologists. *Int. J. Cancer* 115: 828–834, 2005
- 24) Jablon S, Miller RW: Army technologists: 29-year follow up for cause of death. *Radiology* 126: 677–679, 1978
- 25) Berrington A, Darby SC, Weiss HA, et al.: 100 years of observation on British radiologists: Mortality from cancer and other causes 1897–1997. *Br. J. Radiol.* 74: 507–519, 2001
- 26) Ashmore JP, Krewski D, Zielinski JM, et al.: First analysis of mortality and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada. *Am. J. Epidemiol.* 148: 564–574, 1998
- 27) Zielinski JM, Garner MJ, Band PR, et al.: Health outcomes of low-dose ionizing radiation exposure among medical workers: A cohort study of the Canadian national dose registry of radiation workers. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 22: 149–156, 2009
- 28) Sont WN, Zielinski JM, Ashmore JP, et al.: First analysis of cancer incidence and occupational radiation exposure based on the national dose registry of Canada. *Am. J. Epidemiol.* 153: 309–318, 2001
- 29) Wang JX, Zhang LA, Li BX, et al.: Cancer incidence and risk estimation among medical x-ray workers in China, 1950–1995. *Health Phys.* 82: 455–466, 2002
- 30) Andersson M, Engholm G, Ennow K, et al.: Cancer risk among staff at two radiotherapy departments in Denmark. *Br. J. Radiol.* 64: 455–460, 1991
- 31) Lee WJ, Bang YJ, Cha ES, et al.: Lifetime cancer risks from occupational radiation exposure among workers at interventional radiology departments. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 94: 139–145, 2021
- 32) Pukkala E, Martinsen JI, Lynge E, et al.: Occupation and cancer: Follow-up of 15 million people in five Nordic countries. *Acta Oncol.* 48: 646–790, 2009
- 33) Kudo S, Ishida J, Yoshimoto K, et al.: Direct adjustment for confounding by smoking reduces radiation-related cancer risk estimates of mortality among male nuclear workers in Japan, 1999–2010. *J. Radiol. Prot.* 38: 357–371, 2018
- 34) Howe GR, Zablotska LB, Fix JJ, et al.: Analysis of the mortality experience amongst U.S. nuclear power industry workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation. *Radiat. Res.* 162: 517–526, 2004
- 35) Schubauer-Berigan MK, Daniels RD, Bertke SJ, et al.: Cancer mortality through 2005 among a pooled cohort of

- U.S. nuclear workers exposed to external ionizing radiation. *Radiat. Res.* 183: 620–631, 2015
- 36) Gilbert ES, Cragle DL, Wiggs LD: Updated analyses of combined mortality data for workers at the Hanford site, Oak Ridge National Laboratory, and Rocky Flats weapons plant. *Radiat. Res.* 36: 408–421, 1993
- 37) Wing S, Richardson DB: Age at exposure to ionising radiation and cancer mortality among Hanford workers: Follow up through 1994. *Occup. Environ. Med.* 62: 465–472, 2005
- 38) Schubauer-Berigan MK, Macievic GV, Utterback DF, et al.: An epidemiologic study of mortality and radiation-related risk of cancer among workers at the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, a U.S. Department of Energy facility. Report No. 2005–131. Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health, Division of Surveillance, Hazard Evaluations, and Field Studies, 2005
- 39) Frome EL, Cragle DL, Watkins JP, et al.: A mortality study of employees of the nuclear industry in Oak Ridge, Tennessee. *Radiat. Res.* 148: 64–80, 1997
- 40) Rinsky RA, Zumwalde RD, Waxweiler RJ, et al.: Cancer mortality at a Naval nuclear shipyard. *Lancet* 1: 231–235, 1981
- 41) Cragle DL, Watkins JP, Robertson-Demers K: Mortality among workers at the Savannah River nuclear fuels production facility. Proc. Section on Statistics in Epidemiology. Alexandria, VA: American Statistical Association, 83–87, 1998
- 42) Richardson DB, Wing S: Evidence of confounding by smoking of associations between radiation and lung cancer mortality among workers at the Savannah River site. *Am. J. Ind. Med.* 54: 421–427, 2011
- 43) Boice JD, Ellis ED, Golden AP, et al.: The past informs the future: An overview of the million worker study and the Mallinckrodt chemical works cohort. *Health Phys.* 114: 381–385, 2018
- 44) Boice JD, Cohen SS, Mumma MT, et al.: The Million Person Study, whence it came and why. *Int. J. Radiat. Biol.* 2019, Doi: 10.1080/09553002.2019.1589015
- 45) Boice JD, Ellis ED, Golden AP, et al.: Sex-specific lung cancer risk among radiation workers in the million-person study and patients TB-Fluoroscopy. *Int. J. Radiat. Biol.* 2019, Doi: 10.1080/09553002.2018.1547441
- 46) Haylock RGE, Gillies M, Hunter N, et al.: Cancer mortality and incidence following external occupational radiation exposure: An update of the 3rd analysis of the UK national registry for radiation workers. *Br. J. Cancer* 119: 631–637, 2018
- 47) Muirhead CR, O'Hagan JA, Haylock RGE, et al.: Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: Third analysis of the National Registry for Radiation Workers. *Br. J. Cancer* 100: 206–212, 2009
- 48) Leuraud K, Fournier L, Samson E, et al.: Mortality in the French cohort of nuclear workers. *Radioprotection* 52: 199–210, 2017
- 49) Stram DO, Sokolnikov M, Napier BA, et al.: Lung cancer in the Mayak workers cohort: Risk estimation and uncertainty analysis. *Radiat. Res.* 195: 334–346, 2021
- 50) Sokolnikov M, Preston D, Gilbert E, et al.: Radiation effects on mortality from solid cancers other than lung, liver, and bone cancer in the Mayak worker cohort: 1948–2008. *PLoS ONE* 10: e0117784, 2015
- 51) Shilnikova NS, Preston DL, Ron E, et al.: Cancer mortality risk among workers at the Mayak nuclear complex. *Radiat. Res.* 159: 787–798, 2003
- 52) Azizova TV, Batistatou E, Grigorieva ES, et al.: An assessment of radiation-associated risks of mortality from circulatory disease in the cohorts of Mayak and Sellafield nuclear workers. *Radiat. Res.* 189: 371–388, 2018
- 53) Zablotska LB, Lane RSD, Thompson PA: A reanalysis of cancer mortality in Canadian nuclear workers (1956–1994) based on revised exposure and cohort data. *Br. J. Cancer* 110: 214–223, 2014
- 54) Ashmore JP, Gentner NE, Osborne RV: Incomplete data on the Canadian cohort may have affected the results of the study by the International Agency for Research on Cancer on the radiogenic cancer risk among nuclear industry workers in 15 countries. *J. Radiol. Prot.* 30: 121–129, 2010
- 55) Canadian Nuclear Safety Commission; Verifying Canadian nuclear energy worker radiation risk: A reanalysis of cancer mortality in Canadian nuclear energy workers (1957–1994). Summary report INFO-0811, 2011
- 56) Merzerich H, Hammer GP, Tröltzsch K, et al.: Mortality risk in a historical cohort of nuclear power plant workers in Germany: Results from a second follow-up. *Radiat. Environ. Biophys.* 53: 405–416, 2014
- 57) Ahn YS, Park RM, Koh D-H: Cancer admission and mortality in workers exposed to ionizing radiation in Korea. *J. Occup. Environ. Med.* 50: 791–803, 2008
- 58) Jeong M, Jin YW, Yang KH, et al.: Radiation exposure and cancer incidence in a cohort of nuclear power industry workers in the Republic of Korea, 1992–2005. *Radiat. Environ. Biophys.* 49: 47–55, 2010
- 59) Cardis E, Vrijheid M, Blettner M, et al.: The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: Estimates of radiation-related cancer risks. *Radiat. Res.* 167: 396–416, 2007
- 60) Vrijheid M, Cardis E, Ashmore P, et al.: Mortality from diseases other than cancer following low doses of ionizing radiation: Results from the 15-Country study of nuclear industry workers. *Int. J. Epidemiol.* 36: 1126–1135, 2007
- 61) Vrijheid M, Cardis E, Blettner M, et al.: The 15-Country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: Design, epidemiological methods and descriptive results. *Radiat. Res.* 167: 361–379, 2007
- 62) Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, et al.: Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: Retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ.* H5359, 2015
- 63) Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, et al.: Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): An international cohort study. *Lancet Haematol.* 2: e276–e281, 2015
- 64) Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, et al.: A site-specific solid cancer mortality after exposure to ionizing radiation: A cohort study of workers (INWORKS). *Epidemiology* 29: 31–40, 2018
- 65) Gillies M, Richardson DB, Cardis E, et al.: Mortality from circulatory diseases and other non-cancer outcomes among nuclear workers in France, the United Kingdom and the United States (INWORKS). *Radiat. Res.* 188: 276–290, 2017

- 66) Hamra GB, Richardson DB, Cardis E, et al.: Cohort profile: The International Nuclear Workers Study (INWORKS). *Int. J. Epidemiol.* 45: 693–699, 2016
- 67) Linet MS, Kim KP, Miller DL, et al.: Historical review of cancer risks in medical radiation workers. *Radiat. Res.* 174: 793–808, 2010
- 68) Wakeford R: Overview of epidemiological studies of nuclear workers: Opportunities, expectations, and limitations. *J. Radiol. Prot.* 41: 1075–1092, 2021
- 69) 工藤伸一, 石田淳一, 吉本恵子, 他: 各国の放射線疫学コホート研究における手法の相違点. *保健物理* 52: 265–274, 2017

著者紹介

工藤 伸一 (くどう・しんいち)

放射線学博士

現職名: (公財)放射線影響協会放射線疫学調査センター統計課長

関心分野: 放射線疫学

1991年より放射線業務従事者の疫学統計解析に従事.

論文紹介

〈連載：RPT誌特集〉

最近のRPT誌レビュー論文から

Title: Medical application of particle and heavy ion transport code system PHITS

Authors: Takuya Furuta, Tatsuhiko Sato

Radiol. Phys. Tech. 14: 215–225, 2021

和訳タイトル：PHITSの医学物理計算への応用

著者：古田琢哉，佐藤達彦

粒子・重イオン輸送計算コードPHITSは、任意の三次元体系中の様々な粒子（光子、電子、陽子、中性子、重イオン等）の輸送をモンテカルロ法により模擬する汎用の計算コードである。PHITSは、加速器施設における遮蔽計算や人体に対する放射線防護研究、宇宙地球惑星科学での放射線研究等、幅広い応用分野で利用されている。

医学物理分野におけるPHITSの新規ユーザー数の増加が近年顕著であり、論文等の発表件数も数多く見られるようになった。その内容も、放射線治療応用、施設の遮蔽計算、放射線生物学応用、医療機器研究開発等、多岐にわたっている。この総論では、これらの応用研究例を示すとともに、医学物理応用研究で有益なPHITSの機能を紹介する。具体的には、PHITSを用いた放射線治療応用研究として、粒子線治療（図1）、X線治療、ホウ素中性子捕獲療法、密封小線源治療、標的核医学治療（図2）にPHITSを利用した例を示す。また、PHITSを用いた放射線治療施設における遮蔽計算および放射線生物学応用研究の例についても示す。さらに、医学物理応用ツールの研究開発にPHITSを利用した例として、CT撮影による被ばく線量評価システムWAZA-ARI、医療従事者教育のための放射線診断機器線量分布の可視化ツール（図3）、ゲル線量計開発を紹介する。開発中のPHITSを用いた放射線治療シミュレーションツールRT-PHITSについても紹介する。

医学物理分野でのPHITSの利用拡大には、医学物理分野の研究者の協力による新機能の追加や利便性向上が大きく貢献している。今後も引き続き積極的にユーザーの要望を取り込み、PHITS開発を進めていく予定なので、要望や意見をPHITS事務局（phits-office@jaea.go.jp）にぜひお寄せいただきたい。また、PHITSユーザー間の情報交換の場をウェブに提供する目的で、PHITSフォーラム（<https://meteor.nucl.kyushu-u.ac.jp/phitsforum/>）を開設したので、ぜひこちらも積極的に利用いただきたい。

参考文献

- 1) Furuta T, Sato T: Medical application of particle and heavy ion transport code system PHITS. Radiol. Phys. Tech. 14: 215–225, 2021
- 2) Sato T, Furuta T, Liu Y, et al.: Individual dosimetry system for targeted alpha therapy based on PHITS coupled with microdosimetric kinetic model. EJNMMI Phys. 8: 4, 2021

Author: Takuya Furuta

Abstract: This is a review on medical application of particle and heavy ion transport code system PHITS by JSRT and JSMP (<https://www.jsmp.org/en>)

注）本論文紹介はJSRT誌との合同企画により両学会誌に掲載しております。

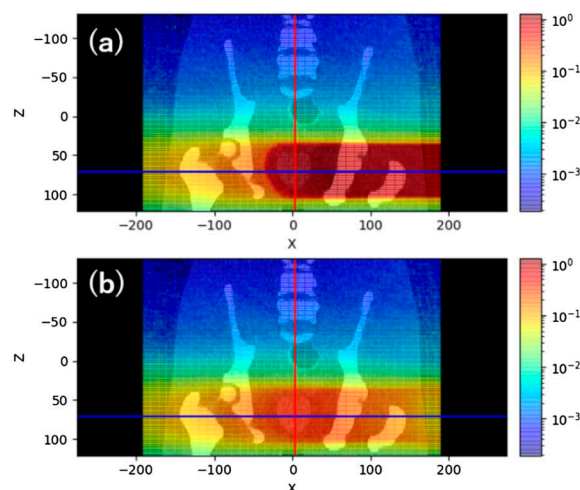


図1 PHITSによる炭素線治療での線量分布計算¹⁾
(a)全線量, (b)二次粒子による線量。

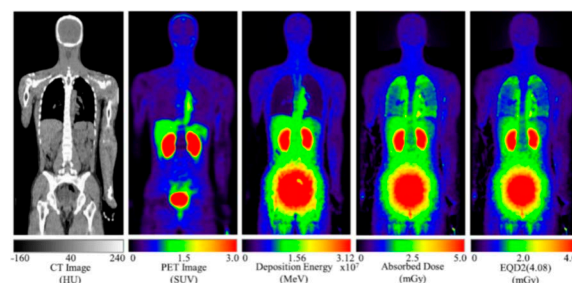


図2 標的核医学治療へのPHITS応用例。CT画像、¹⁸F投与時のPET画像、付与エネルギー分布、吸収線量分布、等効果線量分布
クリエイティブ・コモンズ・ライセンスによる文献²⁾からの転載。

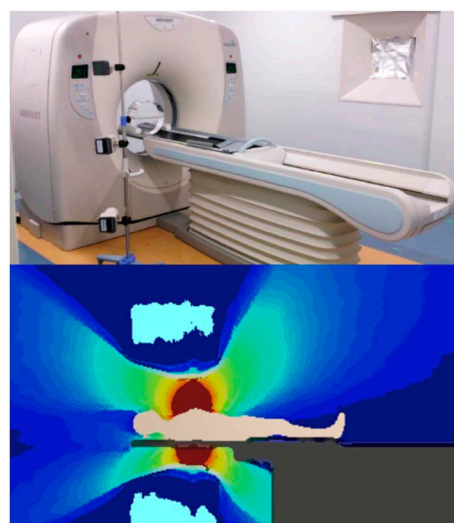


図3 可視化されたCTスキャン室内の線量分布¹⁾

執筆著者：古田琢哉（日本原子力研究開発機構）

施設紹介

新潟大学医歯学総合病院医学物理グループ 新潟大学大学院保健学研究科医学物理士養成コースの紹介

宇都宮悟^{*1}, 棚邊哲史², 中野永², 坂井まどか², 田邊俊平², 滝澤健司^{3,4},
久島尚隆⁵, 成田啓廣¹, 早川岳英¹, 笹本龍太¹

¹新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野

²新潟大学医歯学総合病院放射線治療科

³新潟大学大学院医歯学総合研究科放射線医学分野

⁴新潟脳外科病院

⁵長岡中央総合病院

Introduction of Medical Physics Group at Niigata University

Satoru UTSUNOMIYA^{*1}, Satoshi TANABE², Hisashi NAKANO², Madoka SAKAI², Shunpei TANABE², Takeshi TAKIZAWA^{3,4},
Naotaka KUSHIMA⁵, Akihiro NARITA¹, Takahide HAYAKAWA¹, Ryuta SASAMOTO¹

¹ Department of Radiological Technology, Graduate School of Health Sciences, Niigata University

² Department of Radiation Oncology, Niigata University Medical and Dental Hospital

³ Department of Radiology and Radiation Oncology, Graduate School of Medical and Dental Sciences, Niigata University

⁴ Niigata Neurosurgical Hospital

⁵ Nagaoka Chuo General Hospital

1. 施設概要

新潟大学は1949年に開学した国立大学であり、医学部は旧六医科大学の一つである旧新潟医科大学を直接の起源に持つ。また、医学物理とも関係の深い放射線医学教室の開設が1925年であり日本屈指の伝統を持つなど、新潟の地には放射線医学の伝統が脈々と受け継がれている。

新潟大学に医学物理グループが発足した一つのきっかけは、2012年度から東北がんプロフェッショナル養成推進プラン（がんプロ）に参加したことである。それに伴い、2013年1月に医学物理士の宇都宮悟が新潟大学大学院医歯学総合研究科に赴任した。同じ時期に大学院保健学研究科博士前期課程に医学物理士養成コースが開設され、和田真一教授（当時）を中心に医学物理分野における大学院教育の体制も整備された。また、翌年2014年4月に棚邊哲史が新潟大学医歯学総合病院に医学物理士として赴任し、新潟大学の医学物理グループとしての活動が本格的に始動することになった。

新潟大学には、2021年9月現在、医学物理分野の研究・臨床・教育に携わる教員・職員が複数の部署に在籍している。医歯学総合病院放射線治療科には、医学物理士教員の棚邊哲史、中野永、医学物理士レジデントの坂井まどか、田邊俊平の4名が在籍している。大学院保健学研究科放射線技術科学分野には、医学物理士でもある宇都宮悟、早川岳英、成田啓廣、放射線腫瘍医である笹本龍太の4名が在

籍している。宇都宮は医歯学総合病院での医学物理士臨床業務にも従事している。大学院医学物理士養成コースには博士前期課程2年生が3名、1年生が2名在籍している。また、病院放射線治療科の放射線腫瘍医の方々、病院診療支援部の放射線技師の方々、理学部理学科の教員の方々にも医学物理分野の活動にご協力いただいている。

医歯学総合病院放射線治療部門ではリニアックを2台 (Varian Clinac iX, Novalis Tx)、密封小線源治療装置1台 (Elekta Flexitron) を保有しており、外照射では前立腺癌、



図1 Novalis Txの前での医歯学総合病院医学物理グループの集合写真（奥左：中野，奥中央：宇都宮，奥右：棚邊，手前左：坂井，手前右：田邊）

* 連絡著者 (corresponding author) 新潟大学大学院保健学研究科放射線技術科学分野 [〒951-8518 新潟県新潟市中央区旭町通2番町746]

Department of Radiological Technology, Graduate School of Health Sciences, Niigata University, 2-746 Asahimachi-dori, Chuo-ku, Niigata 951-8518, Japan

E-mail: sutsuno@clg.niigata-u.ac.jp

頭頸部癌、悪性神経腫瘍、食道癌、肺癌など様々な部位にVMATを実施している。医学物理グループの充実はVMATの適応拡大に寄与しており、施行人数の年間累計数は増加傾向にある。最近では複数の転移性脳腫瘍に対する単一アイソセンターを用いたSRSの件数も増えてきている。当院の医学物理士および医学物理士レジデントは、放射線腫瘍医・診療放射線技師・看護師との密接な協力体制の下、臨床業務を行っている。特に、診療放射線技師の方々とはVMAT患者個別線量検証やリニアックQAを協働で行うなど、一体となった活動を行っているのが特徴と言える。本学ではこの11月よりリニアックの機器更新を控えており、診療放射線技師の方々と協力しながら現在急ピッチで準備を進めている。新規に導入される装置のうち1台はVarian TrueBeamとなる予定であり、2022年6月の稼働を目指している。

2. 教育活動

2.1 大学院医学物理士養成コース

前述のように、2012年度からがんプロに参加したことがきっかけとなり、本学の医学物理士教育体制の整備が進み、2014年4月より、大学院保健学研究科博士前期課程の医学物理士養成コースが一般財団法人医学物理士認定機構(JBMP)の認定コースとして承認された。本コースは博士前期課程(修士課程)では珍しく、病院での臨床実習を行っているのが特徴である。科目「医学物理臨床実習」では、医歯学総合病院の放射線治療科にて、治療計画や線量測定の実習を、週に1日の頻度で半年間行う(ただし、現在は新型コロナウイルスの影響で病院での実習は中止している)。また、後述するように米国の医学物理士レジデントコースで実施されているような口頭試験を課し、実践的な理解度を確保したうえで同科目の成績を評価している。また、学生が普段は見る機会の少ないリニアックのAnnual QAの見学も行っている。修士課程のうちに病院での医学物理士業務を直に見学し自分でもやってみることで、それまで漠然としていた医学物理士のイメージが具体的に、後述のように医学物理士レジデントコースに進んで本格的に医学物理士を目指す学生も現れるようになったのは大きな成果と言える。また、これまでの同コース修了者17名のうち、修了後の合格を含めると計11名の医学物理士認定試験合格者を輩出している。

2.2 副専攻「医学物理学基礎」

本学では遡ること2013年より副専攻プログラム「医学物理学入門」が開始されている。これは、新潟大学が取り組んでいる独自の教育活動の一環で、学部卒業時に授与される「学士」の学位(主専攻)とは別に、一定の条件を満たした学生に副専攻の認定を与える制度で、本学に全21プログラムあるのうちの一つである。この制度のおかげ

で、医学物理士を目指す学生や医学物理分野での研究活動を目指す学生は、学部生のうちに必要な基礎知識の習得を効率よく行うことができる。具体的には、理工系分野の学生が医療系科目を履修し、医学部保健学科の学生が理工系科目を履修することで、それぞれ副専攻「医学物理学基礎」の認定が可能となった。学部時代に副専攻「医学物理学基礎」で基礎科目を修めた学生が大学院に進学することでスムーズに大学院での医学物理教育に接続できるようになった効果は大きい。

2.3 医学物理士レジデントコース

本学の医学物理士教育の大きな特徴となっているのが医歯学総合病院放射線治療科に設置されている医学物理士レジデントコースの存在である。本コースは、2015年10月に大学院医歯学総合研究科・医歯学総合病院放射線治療科・大学院保健学研究科放射線技術科学分野が協力し開設された。全国では筑波大学に続き2番目、光子線・電子線治療のみを行う施設としては全国初の設置となる本レジデントコースは、全国的にもモデルケースとして注目されており、物理系・保健学系の医学物理士スタッフに加え、放射線腫瘍医や診療放射線技師とも協力してレジデント教育を行っている。本コース設置の経緯を振り返ると、大学院保健学研究科の和田真一教授(当時)や放射線治療科の青山英史教授(当時)らによって東北がんプロ参加当初からコース設置の構想が明文化されていた。2013年に米国の医学物理士レジデントコース修了者である宇都宮が新潟大学に赴任し、2014年初め頃からレジデントコースの先行施設である筑波大学に見学に行くなど設置に向けて本格的な準備を開始した。準備に当たっては前述の和田教授と青山教授に加えて笠原敏文診療支援部長(当時)と長橋崇之人事企画係長(当時)のお二人には特に大変ご尽力いただいた。また、最終的には鈴木榮一病院長(当時)のご英断がなければコースの設置がなかったことも明記しておきたい。このような経緯を経て、2015年10月に最初のレジデントである高橋春奈氏(現・東北大学大学院医学系研究科)を採用することができた。また、2016年4月より2人目のレジデントとして本学大学院保健学研究科出身の久島尚隆氏(現・長岡中央総合病院)を採用した。久島氏が切り拓いた、本学大学院保健学研究から本学医歯学総合病院の医学物理士レジデントへ進むという流れは、現在の医学物理士レジデントである坂井まどか氏にも受け継がれている。その後、2018年度に滝澤健司氏(現・新潟脳外科病院)が、2019年度に中野永氏(現・医歯学総合病院)が修了し、これまでに合計4名の修了者を輩出している。

本コースは2017年4月よりJBMPが定める認定医学物理教育コースとなった。また、2020年9月時点で計4名の修了生はいずれも新潟県内の病院(新潟市民病院、長岡中央総合病院、新潟脳外科病院、新潟大学医歯学総合病院)

に医学物理士として就職しており、新潟県の放射線治療の質の向上にも貢献している。このような活動は県内の関連病院からも高い評価を得ている。また、当コースは、医歯学総合病院の「医歯学総合病院の目指すべき方向」の「高度医療人の育成の推進：医学物理士レジデントコースの運営」として位置付けられており、本院の教育機能の中で非常に重要な役割を果たしている。

医学物理士レジデントコースとは、主に大学院修了者に対して病院での臨床業務に関わることを通じて医学物理士臨床研修を系統的に行うコースである。米国で医学物理士の認定を受けるためには、レジデントコースの修了が必須の要件となっている。米国のCAMPEP(Commission on Accreditation of Medical Physics Educational Programs)の定める基準によると、医学物理士レジデントが習得すべき知識・スキルは主に以下のようなものがある：(1)臨床で用いられている最新の技術の実用上のスキル、(2)臨床上の目的を理解した上で、技術を応用するスキル、(3)医師、診療放射線技師、看護師など、他職種との協力体制における医学物理士の役割の理解、(4)コミュニケーションスキル、対人関係スキル、(5)患者情報の扱い方、(6)臨床現場での潜在的危険を察知し回避する能力、(7)プロフェッショナルとしての振る舞い方、守るべき倫理。このような知識・スキルは、実際に病院で働くという経験を通して最も効率よく習得されるものであることがわかる。また、IOMP(International Organization for Medical Physics)やIAEA(International Atomic Energy Agency)などの国際機関の活動などを通じて医学物理士の臨床研修についての国際的な標準を確立しようという動きもある。本学の医学物理士レジデントコースの研修内容および評価法はIAEAの「Training Course Series 37(Clinical Training of Medical Physicists Specializing in Radiation Oncology)」(IAEA TCS-37)に準じており、新潟大学の臨床研修項目が国際基準に照らして客観性を持つことを重視している。この文章には、研修者のcompetency assessment(適格性評価)に関する項目が詳細に書かれている。研修者の到達度をcompetency levelと呼ばれる5段階の尺度(5:該当項目に関する理解が限定的、4:監督下で実施可能、3:監督無しで実施可能であるが結果の確認は必要、2:監督無しで実施可能でありマイナーなエラーのみ許容、1:監督無しで適切に実施可能)で評価する。また、本コースの研修プログラムは臨床研修と集中学習項目に大別される。臨床研修では臨床現場における医学物理士業務を経験し、将来的に独力で全ての業務を行えることを目的としている。一方、集中学習項目では、米国医学物理学会(AAPM)が発行する文献などを読むことで臨床業務のひとつひとつの根拠や原理を理解することを主な目的としている。研修生の評価は前述のIAEA TCS-37を参考にコンピテンシーレベル(達成度)を用いた客観的評価を採用して



図2 医学物理グループと診療放射線技師の方々が一緒に放射線治療装置QAを実施する



図3 VMAT治療計画の実践的なスキルを磨くことは医学物理士レジデントにとって重要である

いる。また、研修項目ごとに口頭試験を実施し、理解度を確認している。

2.4 医学物理士短期臨床研修コース

本学には「医学物理士短期臨床研修コース」が設置されており、主にがん診療拠点病院に勤務する医学物理士に対して高精度放射線治療における臨床業務上のスキルアップのための学び直しとキャリアアップの機会を提供している。近年、IMRTなどの高精度放射線治療の普及には目覚ましいものがあり、同治療に関わる医療者にも相応の高度なスキルが求められるようになってきている。特に医学物理士は治療計画や線量検証などの高精度放射線治療に特化した業務に携わることが多く、最新技術への対応を含むスキルアップの必要性が高い職種と言える。前述の医学物理士レジデントコースに加えて、既に医学物理士の認定を持つ者が比較的短時間で効率よく高精度放射線治療に必要なスキ



図4 本学医学物理士レジデントコースの歴代修了者の修了式の様子。1枚目：第1号修了者の高橋春奈氏（現・東北大学大学院医学系研究科）の修了式（左：鈴木榮一病院長（当時），中央：高橋氏，右：青山英史教授（当時）），2枚目：第2号修了者の久島尚隆氏（現・長岡中央総合病院）の修了式（左から5人目：久島氏），3枚目：第3号修了者の滝澤健司氏（現・新潟脳外科病院）の修了式（左から5人目：滝澤氏），4枚目：第4号修了者の中野永氏（現・新潟大学医歯学総合病院）の修了式（左から，棚邊，宇都宮，中野氏，富田善彦病院長，金沢勉診療支援部長）

ルを身につける機会に対する需要も高いと思われる。以上を背景として、新潟大学では2016年10月より病院に勤務する医学物理士認定者が履修可能な短期臨床研修コースを新たに開設し、高精度放射線治療における臨床業務上のスキルアップの機会を提供している。本コースではVMAT放射線治療計画の立案と確認、線量検証業務についての臨床研修を約半年間行う。これまで合計6名の修了者（新潟県立がんセンター，長岡赤十字病院，JA秋田厚生連由利組合総合病院，魚沼基幹病院，長岡中央総合病院）を輩出し、現在はそれぞれの所属先で高精度放射線治療のエキスパートとして活躍している。本コースは2018年4月より、国内で唯一の「短期臨床研修教育コース」としてJBMPから認定を受けた。修了者の感想は本稿末尾にURLを掲載した本グループのホームページの「メンバー紹介」ページ下部のリンク先から閲覧できる。

2.5 医学物理ミーティング

月に2回実施している「医学物理ミーティング」では、医学物理分野の教員（医歯学総合病院，大学院保健学研究科），医学物理士レジデント，大学院生が参加し、医学物理の教科書の輪読，医学物理分野の最近の研究論文（Med-

ical Physics 誌，International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics 誌）の紹介，学会発表の予行などを行っている。2013年より継続的に行っており，2020年10月6日時点で174回目を数える。輪読では，米国の有名な医学物理分野の教科書『Khan's The Physics of Radiation Therapy』や『ゴイテン 放射線腫瘍学』を読了するなど，修士課程の大学院生にはやや難解と思われる文献にも積極的にチャレンジしている。このミーティングは大学院生が論文紹介や研究発表に慣れることや，普段はあまり会うことの少ない医歯学総合病院と保健学研究科の教員・学生が交流する重要な機会になっている。また，2020年度はZoomを用いて開催したことから新潟県内の放射線治療関係者も参加しやすい環境となり，同年度に開催した「医学物理ミーティング」（計16回）が，病院より「令和2年度1年間に自院が主催した市民向け及び医療者向けの公開講座」として認められた。

3. 研究活動

本学の医学物理分野の研究活動は多岐にわたっているが，下記にその一部を紹介する。

新型の呼吸同期放射線治療装置 SyncTraX FX4（島津製

作所)の、脳定位照射を前提とした様々なコミッショニング項目(画像誘導装置の画質、画像座標系と治療座標系の一致度、被ばく線量、線量照射精度)の検討および評価を行い、いずれも良好な結果を得た¹⁾。これは、医歯学総合病院医学物理士の棚邊哲史が中心となって行われた研究である。

悪性神経腫瘍のVMAT治療計画において、線量アルゴリズムAnalytical Anisotropic Algorithm(AAA)とAcuros XB(AXB)との間の線量分布の違いを比較検討した。その結果、AAAプランとAXBプランの間には有意な線量差が認められ、PTV内に頭蓋骨領域が大きく含まれる場合に特に大きな線量差が認められた²⁾。これは、新潟脳外科病院医学物理士の滝澤健司(現・新潟大学客員研究員/元・医歯学総合病院医学物理士レジデント)が中心となって行われた研究である。

前立腺癌の放射線治療におけるIMRTの導入とIGRTを用いた患者位置合わせの導入によるPTVマージンの縮小が、直腸の正常組織障害発生確率(NTCP)低減の観点から見て相補的な関係にあることを定量的に示した³⁾。この研究では、治療計画を臨床的観点から評価するうえでNTCPなどの放射線生物学的指標が有用であることが示された。これは、大学院保健学研究科の宇都宮悟が中心となって行われた研究である。

放射線治療装置付属の検出器EPIDを用いて測定したIMRT治療計画のフルエンス分布のradiomics特徴量を抽出し、それをもとに機械学習モデルを作成することでIMRTの患者個別QAにおいて治療計画装置のパラメータであるMLCの透過線量率とMLCリーフ幅のエラーを検出できることを示した⁴⁾。これは、医歯学総合病院医学物理士レジデントの坂井まどかが中心となって行われた研究である。

複数の脳転移に対して単一アイソセンターを用いた定位照射を行った場合のセットアップ誤差の線量および腫瘍制御率(TCP)への影響を評価した。TCPはターゲットのアイソセンターからの距離が大きくなるにつれて、GTVサイズが小さくなるにつれて低下することが示された⁵⁾。これは、医歯学総合病院医学物理士の中野永が中心となって行われた研究である。

4. 研究者の日常

医歯学総合病院における医学物理士・医学物理士レジデント業務は、「臨床・教育・研究」の三本柱から成る。1日の流れとしては、朝の始業前に行われる放射線腫瘍医を主体とした検討会へ参加し、VMAT治療計画の提示・説明やVMAT患者個別QA結果の提示・説明などを行う。また、週1回朝の始業前に行われる放射線治療科のリサーチミーティングでは、研究活動の報告の他、各種セミナーの参加報告、重要なガイドラインの概説、治療計画装置の

スクリプト機能の紹介など多岐に渡る。日常的に医学物理士および医学物理士レジデントは、医師・診療放射線技師・看護師との協力体制の下、主に以下の臨床業務を行っている：(1)3次元原体放射線治療(3DCRT)計画の作成(作成補助含む)、(2)VMAT治療計画作成、(3)3DCRT/VMAT計画チェック、(4)VMAT患者個別QAの実施、(5)VMATコミッショニングの実施計画立案・実施・評価、(6)放射線治療装置および放射線治療計画装置のQA/QCの実施計画立案・実施・評価、(7)密封小線源治療の治療計画・品質管理、(8)放射線治療科の検討会・カンサード・放射線治療品質管理室会議などの参加。当院では、前立腺癌局所照射、温存乳房接線照射、喉頭限局照射、全脳照射などの3DCRT治療計画立案においても、ターゲットおよび正常臓器の輪郭描出作業を含めて医学物理士が関わっている。また、VMATは、前立腺癌や頭頸部癌、悪性神経腫瘍の他、最近では食道癌や肺癌に対しても実施している。患者様に放射線治療による恩恵を最大限ご提供できるよう、医学物理学的観点からVMATの適応拡大にも寄与しており、年々IMRT施行人数の年間累計数は増加傾向にある。また、新潟県内の関連施設(新潟脳外科病院、新潟市民病院、長岡中央総合病院、魚沼基幹病院、上越総合病院)での医学物理士業務も定期的に従事し、これらの施設で実施している研究活動への協力も行っている。研究活動に充てる時間は各自が捻出している。

大学院保健学研究科医学物理士養成コースの大学院生は、研究活動に加えて大学院講義科目の履修、各種ミーティングへの参加、医学物理士認定試験対策など忙しい日々を送っている。修士1年生は理学部理学科で開講されている「熱力学」「統計力学」「量子力学」などの物理系科目の履修で苦勞することが多いようだが、必死で理解しようと頑張っている。前述の医学物理ミーティングで発表することは準備に多大な時間を要するので負担も大きいですが、専門の教科書や最新の研究論文をわかりやすく説明し教員からの質疑応答にも適切に答えられるように準備することは、大学院生にとって良い訓練になっている。また、修士2年生に対しては合計4回の模擬試験を実施するなど、医学物理士認定試験合格に向けて全教員がサポートする体制も整えている。

5. 医学物理を志す者へ一言

医学物理分野の特徴の一つは、基礎に物理学・工学・生物学・情報学など多様な学問分野があることであり、それらの間の相互作用があることで医学物理がとてもエキサイティングな分野となっている。医学物理は、患者への医療に貢献するという点は共通の目標として共有しつつ、広い裾野を持ち、様々なバックグラウンドを持った人が思い思いのアプローチで関わるができるような、とてもオープンな学問領域であるとも言える。新潟大学で医学物理研

究に携わる教員・学生も、各々が関心を持っている対象自体はかなり多様ではあるが、「医学物理」を一つのキーワードとすることで一つのグループとして共通認識を持って活動している。この原稿を読む若い方が、何らかの形で将来医学物理という分野に、それぞれ自分自身の得意とするアプローチで関わることを願っている。

本学の医学物理士レジデントコースは、医学物理士の臨床業務をしっかり身につけて即戦力として働ける医学物理士を目指したい方には正にうってつけの教育コースと言える。治療計画や品質管理などの臨床スキルの修得はもちろん、その背景にある基礎理論を深く理解することも重視している。米国の医学物理士レジデントコースに倣った口頭試験などの評価体制も整っており、放射線腫瘍医や診療放射線技師などの他職種との関わりから、多くのことを学ぶ機会も持つことができる。放射線治療は変化の激しい分野だが、だからこそしっかり腰を落ち着けて、どこへ行っても通用するような医学物理士の臨床スキルの基本をじっくり身につけることに意味があると考え。ぜひ、新潟で医学物理士を目指すことも検討していただければ有難い。

最後に、新潟大学医学物理グループの活動の詳細についてはホームページ (<http://www.clg.niigata-u.ac.jp/~medphys/index.html>) をご参照いただきたい。

参考文献

- 1) Tanabe S, Umetsu O, Sasage T, et al.: Clinical commissioning of a new patient positioning system, SyncTraX FX4, for intracranial stereotactic radiotherapy. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 19(6): 149–158, 2018
- 2) Takizawa T, Tanabe S, Utsunomiya S, et al.: Dosimetric comparison of analytic anisotropic algorithm and Acuros XB algorithm in VMAT plans for high-grade glioma. *Phys. Med.* 73: 73–82, 2020
- 3) Utsunomiya S, Yamamoto J, Tanabe S, et al.: Complementary relation between the improvement of dose delivery technique and PTV margin reduction in dose-escalated radiation therapy for prostate cancer. *Pract. Radiat. Oncol.* 9: 172–178, 2019
- 4) Sakai M, Nakano H, Kawahara D, et al.: Detecting MLC modeling errors using radiomics-based machine learning in patient-specific QA with an EPID for intensity-modulated radiation therapy. *Med. Phys.* 48: 991–1002, 2021
- 5) Nakano H, Tanabe S, Sasamoto R, et al.: Radiobiological evaluation considering setup error on single-isocenter irradiation in stereotactic radiosurgery. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 22: 266–275, 2021

連載コラム シカゴ通信

世界の島国

—ニュージーランド、インドネシア、タヒチ、バルカン半島諸国—

〈Chicago Report〉 The World with Many Islands:
New Zealand, Indonesia, Tahiti, Balkan Nations

地球上の約70%は海ですので、世界中の国は島国と考えることができます。そこで大陸ではなく島国の集まり、あるいは島国の一部として世界を眺めることが可能です。

ニュージーランド訪問

オールブラックスで有名な世界屈指のラグビーチームはニュージーランド代表です。私は高校時代にラグビーをやったことがあるので是非ニュージーランドを訪問したいと思っていました。最近では次男がトライアスロン大会に参加するため頻繁にニュージーランドを訪問していますので、我々も3年前にニュージーランドを訪れるチャンスがありました。ニュージーランドの面積は日本の約70%ですが、人口はたったの400万人です。そこで自然あふれる豊かな国であることは容易に想像できます。トライアスロンは、北島のほぼ中央に位置するタウポという町で開催されたのですが、オークランド（写真1）からレンタカーで約3時間の距離です。この町はオークランド最大のタウポ湖という湖畔に位置しています。トライアスロンの試合（写真2）は通常18時間程継続しますので、早朝6時にスタートして、早い人は8時間ほどでゴールするのですが、遅い方は18時間もかかり、夜中の12時頃にゴールする方

もいます。この大会はニュージーランドの夏の2月に開催され、朝5時頃からスタートの応援に出かけたのですが、すごく寒いことに気が付きました。しかし、衣類を取りにホテルに戻ることができず、すごく寒かったことを経験しました。そのせいで私も家内も酷い風邪を引いたことを覚えています。

ニュージーランドは火山地帯ですので大きな間欠泉（写真3）が見られます。有名な食事にはラムの肉料理とニュージーランド特産のムール貝があります。オークランドの本格ベルギー料理店でのビールとマッスル・ポット（写真4）と呼ばれる伝統的なエナメル製の鍋に1kgのマッスルがたっぷり入った料理は凄かったです。鍋いっぱいのマッスルは、大人2人で充分な量でした。この料理を食べにニュージーランドを再び訪問する価値があると思っています。



写真1 人口142万ニュージーランド経済の中心都市オークランド



写真2 タウボのトライアスロン・レース



写真3 迫力満点の間欠泉



写真4 1kgのマッスル・ポットという名物料理

神秘的なインドネシア

インドネシア訪問は、2015年ジョグジャカルタでアジア・オセアニア地域の医学物理に関する国際会議が開かれ実現しました。ジョグジャカルタはジャワ島の古都で、王宮や周辺のボロブドールやプランバナン寺院群などの世界遺産があります。現在はイスラム教徒が90%以上ですが、仏教とヒンズー教も共存しています。ボロブドール遺跡（写真5）は、9世紀ごろに50年の歳月をかけて建造されたのですが、建造後1000年以上も密林の中で火山灰に隠れていたのです。しかし、仏教遺跡の伝説を信じたイギリス人によって1814年に発見されました。発掘作業は極めて困難だったので、修復・保存は1973年のユネスコ主導による大規模作業を待つこととなります。遺跡の訪問では、そのような歴史を想像するのが困難です。一方、プランバナン寺院群（写真6）は、ジャワ・ヒンズー教の遺跡です。9世紀頃には北部は仏教王朝に、南部はヒンズー教王朝に統治されていましたが、二つの国は王族同士の婚姻で親戚関係にあったそうです。そこで同時代の宗教文化の繁栄と共存を理解することができます。インドネシアの特徴ある伝統的な染色工芸は、日本でジャワ更紗（バティック）と呼ばれています。影絵芝居やラマヤナ舞踏と呼ばれるきらびやかな衣装をまとった踊り手によるダンスは一見の価値があります。

会議の後、バリ島を訪問し休暇を楽しみました。バリ島は1920年代から欧米で「バリ島ブーム」と呼ばれるほど多くの芸術家が訪問し、バリ島の文化や芸術に影響を及ぼしたと言われています。地図の上では小さな島に見えるのですが、実際には巨大な島と感じるほど（東京都の3倍）多くの地域と施設がありました。リゾートホテル（写真7）はとても快適で、海岸沿いのジョギングは素晴らしく、高級ショッピングセンターもあります。リゾートホテルの集まった地域は数地区あり、会議ホストの推薦でプノア岬と呼ばれる海に突出している細長い半島を選びましたが、これは良い選択でした。バリ島見学タクシーツアーでは、有名な段々畑（写真8）や旧火山湖を含むバトール山とキンタマーニと呼ばれる高原地帯の大景観を眺めながら昼食、夕方には太陽が海に沈むのを賛美しながら海岸で海鮮バーベキュー（写真9）を楽しみました。インドネシア訪問を通じて強く感じたのは、人々の心の温かさです。その理由は、信心深い宗教（写真10）を持つ人々が根底のような気がします。



写真5 1000年以上も密林の中で火山灰に隠されていたボロブドール仏教遺跡



写真6 プランバナン・ヒンドゥー寺院史跡



写真7 バリ島ブノア岬のリゾートホテル



写真8 バリ島の伝統的な段々畑



写真9 バリ島海岸で夕日を眺めながら楽しめる海鮮バーベキュー



写真10 バリ島の多くの個人の家で見られる宗教的祭壇

太平洋の遠く離れた島タヒチ

私は子供の頃からフランスの印象派の絵が好きでした。当時画家として特に気に入っていたのは、ロートレック、ゴッホ、ルノアール、ゴーガンなどの印象派画家達でした。シカゴに行ってから自分で油絵をたまに楽しんでいたこともありましたが、特に強い印象に残っているのは、ゴーガンがタヒチで生涯の多くを過ごしたことです。そこで私は子供の頃から長い間タヒチを訪問したいとの強い願望を持っていました。この旅行は2019年2月に実現しました。しかし、中国でのパンデミック発生直後だったため、タヒチに着いてから、時折我々は日本人で中国のパンデミックとは関係ないとの説明が必要でした。タヒチは太平洋の東南部にある118の島からなるフランス・ポリネシア領です。東京からタヒチまでは飛行機で約11時間かかりますが、アメリカやオーストラリアからもほぼ同等の時間がかかりますので、南太平洋に浮かぶ孤島は楽園の極上バカンスとも呼ばれています。

タヒチの島々で良く知られているのはモーレア島(写真11)、タヒチ島(写真12)、ボラボラ島などです。我々は、タヒチに到着し一泊してから翌日フェリーで30分ほどの

距離のモーレア島のリゾートに滞在しました。この地域のリゾートホテルは各部屋が、島から離れた海上に個別に建設された水上バンガロー(写真13)になっています。好きな時に自分の部屋から自由に海に飛び込み熱帯魚と一緒に泳ぎ回ることができます。モーレア島の我々の滞在したリゾートは、海岸から約500mの位置にあるサンゴ礁で囲まれ、海上は全く波がなく驚くほど穏やかで薄緑色の美しい海でしたが、比較的強い流れのあることから海水は絶えず透明できれいでした。サンゴ礁のエッジ部分は白波が立っており、それから先は深い海を示す濃い青色でサンゴ礁の外は明らかに外洋の波のあるのが分かります。バンガローの周辺には多数の熱帯魚が泳いでいますが、約1mのエイがゆっくりと泳いでいるのを見つけたときには驚きました。島は比較的小さいのでレンタカーで容易に一周できます。タヒチは一度来る価値のある所と感じました。



写真11 タヒチ島から眺めるモーレア島



写真12 モーレア島から眺めるタヒチ島



写真13 モーレア島の水上演ガロー

バルカン半島諸国：クロアチア，スロベニア， ルーマニア，ブルガリア

バルカン半島の諸国は，世界史においてユニークで重要な役割を果たしています。第一次世界大戦はここから始まったのです。シカゴ大学の私の秘書のエベレンはクロアチア（英語ではクロエイシアと発音）出身でいつも素晴らしい国だ（beautiful country）と言っていましたので，訪問したいと考えていました。2018年にバルカン半島の4カ国（写真14）を訪問するチャンスが訪れました。クロアチアの首都はザグレブで，有名なオリエント急行が通過す

る都市で1925年に建てられたホテル（写真15）に宿泊しました。ザグレブを訪問する際には，この素晴らしい歴史的ホテルに宿泊することをお勧めします。ザグレブ市内は殆ど徒歩で散策でき，アドリア海からの海鮮料理（写真16）を楽しむことができます。我々の訪問中はサッカーのワールドカップ試合の最中で，クロアチアは優秀な成績で町中がサッカーで沸き上がっていました。ザグレブからレンタカーで2時間ほどの距離に大小16の湖と92カ所の滝を持つプリトウヴィツェ湖群国立公園（写真17）があり，素晴らしいユネスコの世界遺産です。世界中でこのような滝を見たことがありません。



写真14 クロアチア，スロベニア，ルーマニア，ブルガリア



写真15 エスプラナーデ・ザグレブ老舗ホテル



写真16 ザグレブの海鮮料理



写真17 クロアチア・プリトゥヴィツェ湖群国立公園



写真18 スロベニア・リュブリャナの街（リュブリャーナ城から撮影）

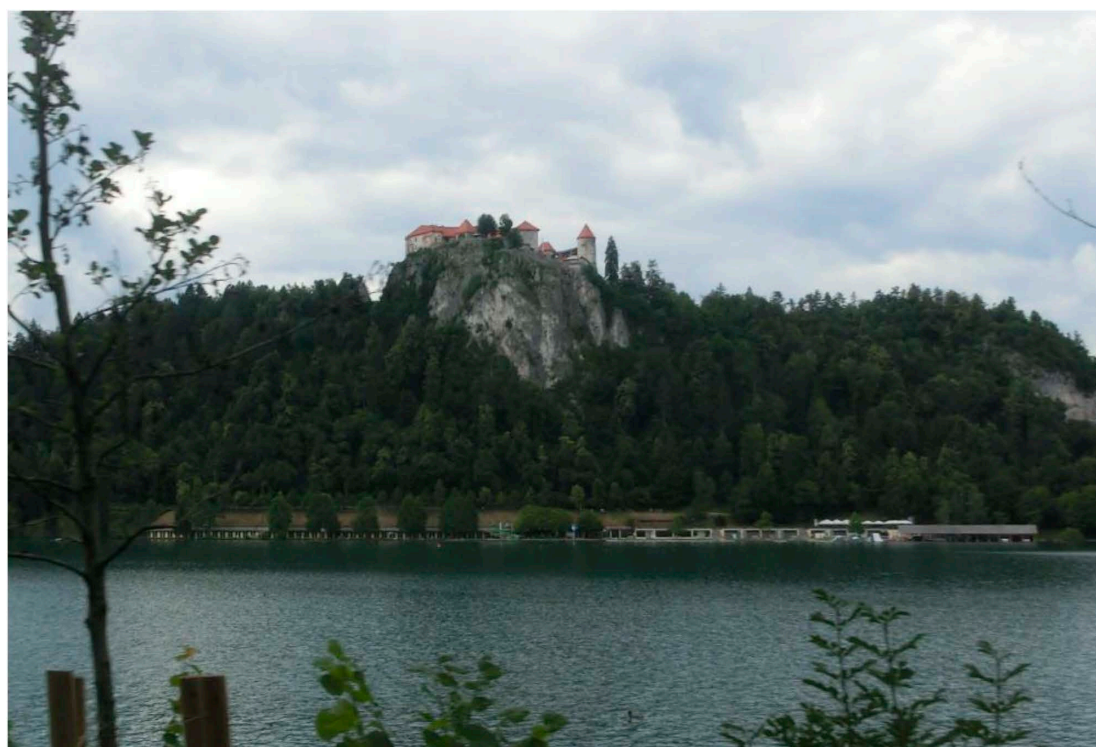


写真19 スロベニア・ブレッド湖から断崖100mに建つブレッド城

クロアチアに接近する西側の国は、スロヴァニアです。この国は四国ほどの小さな国ですが、1991年にユーゴスラヴィアから独立したのです。その直後1992年にクロアチアが独立しています。首府リュブリャナは美しい街（写真18）で、リュブリャナ城から眺めると美しい瓦屋根の建物が眺められます。この国ではユーロを通貨として許されているので（他の3国では不可）経済的に優れた国であることが分かります。米国では、前トランプ大統領メレニア夫人はスロヴァニア出身のモデルだったことが知られています。スロヴァニアの北西オーストリアの近くにブレッド湖（写真19）がありリゾート地で多くの方が湖で泳いでいました。スロヴァニアの南西には、アドリア海への小さな出口がありますが、海岸の大部分はイタリア領土で、その先端の都市は有名な物理国際サマースクールのあるトリエステです。

クロアチアのザグレブからルーマニア（英語ではローメニアと発音）の首都ブカレストまでは飛行機で約2時間です。ルーマニアは日本の本州とほぼ同じ面積ですが、人口は約2000万人です。シカゴ大学では教員と学生にルーマニア出身の方がいましたので、是非ルーマニアを訪問したいと思っていました。そこでバルカン半島訪問にはルーマニアも含んでいました。最近の歴史ではチャウシェスク共産党書記による独裁化で国民が疲弊し、歴史的建造物は破壊され、1989年に革命がおこり処刑などの大きな国際ニュースの記憶があります。20世紀初頭には“バルカンの

小パリ”と呼ばれるほど美しい町並みだったそうです。しかし、現在でもブカレスト近郊には中世の街並みを残した美しい古都ブラショフ、豪華で素晴らしいカロル1世の夏の離宮ペレシュ城（写真20）、“吸血鬼ドラキュラ”のモデルとなったブラン城（写真21）があります。ブカレストには1879年から続く老舗ルーマニア料理店（写真22）がありますし、国民の館と呼ばれるチャウシェスク大統領の未完の宮殿（写真23）は、アメリカ・ペンタゴンに次ぐ世界第2の大規模な大きさです。この地域の訪問は、英国小説作家アガサ・クリスティの名作ミステリー小説の映画「オリエント・イクスプレスの殺人」を何度も見たことを思い出します。

ブルガリアは、ルーマニアの南に接する国で、トルコの西とギリシャの北に位置します。そこでヨーロッパの東端でアジアとの接点の国です。歴史的には世界最古の黄金文化を築いた古代ブルガリアから始まり、バルカン半島で最も強大な国家だった時期もあります。最近の両世界大戦ではドイツ側につき敗戦、その後共産党独裁体制になりますが、1989年には一党独裁体制が崩壊し、民主化が進み、2007年にはEUへの加盟が実現しています。我々はブカレストからのツアーに参加しブルガリアを訪問しました。ブルガリアの国土の中央にはバルカン山脈が横たわり山と丘陵の多い国です。ヴェリコ・タルノヴォは、森と丘陵に囲まれた第2次ブルガリア王国時代の首都（写真24）で、昔の城の廃墟（写真25）が残っています。ブルガリアは、ヨー



写真20 1875年カロル1世の豪華な王室夏の離宮（ルーマニア）



写真21 吸血鬼ドラキュラの居城モデルのブラン城



写真22 1879年から続くブカレストのルーマニア料理店



写真23 ブカレストの国民の館



写真24 ヴェリコ・タルノヴォの街



写真25 ヴェリコ・タルノヴォの第2次ブルガリア王国（1187-1393）首都の古城の跡



グルトで有名ですが、香水などに使用されるバラのエッセンスオイルは、世界の70%がブルガリアで生産されているそうです。

(2021年11月25日記 土井邦雄*)

土井邦雄^{1,2}

¹ シカゴ大学

² 群馬県立県民健康科学大学

Kunio Doi^{1,2}

¹ The University of Chicago

² Gunma Prefectural College of Health Sciences

*E-mail: k-doi@uchicago.edu

追悼文

田中栄一先生のご逝去を悼む



田中栄一先生が2021年8月21日に永眠されました。誤嚥性肺炎で10日間ほど入院しての大往生とご家族からお伺いしています。93歳でした。ここでは先生のご活躍を紹介させていただき、追悼とさせていただきます。

田中先生の放射線との初めての出会いはつらい出来事でした。学徒動員先の広島で、1945年8月6日は爆心から約6キロメートルのところにいたそうです。京都大学理学部物理学科をご卒業後、1951年から工業技術院電気試験所に在職され、高感度の振動容量電位計を開発されました。これは、数社のメーカーによる国産化の端緒となりました。1957年に新設された放射線医学総合研究所（放医研）に移籍され、研究棟の設計と並行してヒューマンカウンターの設計・建築に携わられました。1962年に完成した装置は、当時の原爆実験による環境放射能汚染の研究に使用されました。

一方、微量放射能測定の高感度向上のために同時計数型ベータ線スペクトロメータの開発にも取り組まれ、その論文は1961年にNucl. Instr. Meth. 誌に掲載されました。この装置は新技術開発事業団の委託テーマに採択され、企業によって1968年に「ピコベータ」の商品名で製品化されました。環境放射能の測定のみでなく、広島・長崎の原子爆弾による残留放射能の測定にも利用されましたので、原爆の悲惨さを体験された先生のお気持ちが察せられます。1961年1月に先生は放医研物理研究部物理第一研究室の室長に就任され、「人体及び生物に対する放射線の測定に関する調査研究に関する業務」を担われました。同年12月に皇太子殿下（現上皇陛下）が初めて放医研をご見学された際には、研究室において最新の実験装置などをご説明されたと先生より伺いました。

原子力発電で産生されるプルトニウムの体内被ばくに対する予防と対策に関わる研究が放医研の急務であり、1963年から1968年にかけて特別研究班が組織されました。この時、先生はプルトニウム測定法、肺モニター、傷

モニター、ダストモニターの開発研究に携わるなかで、ポケット型の個人用放射線警報計を考案し試作に成功しました。これは振動容量電位計のハウリング発信を利用した斬新な発明ですが、当時の放医研にはまだ職務発明規則がなく、先生個人で特許出願されました。論文は1967年にHealth Phys. 誌に掲載されました。この装置は理研計器（株）から製品化がなされ、先生は思わぬ特許料収入を得たそうです。

1960年代後半、核医学が世界中で盛んになると、ガンマカメラの性能向上に期待が高まりました。先生は、ガンマカメラの原理を追及し、理論的な考察を行った結果、ガンマ線の入射位置の演算に新しい方式を用いることによって解像力と有効視野を改善できることを見だし、1970年にJ. Nucl. Med. 誌へ論文が掲載されました。さらに、遅延電線を利用して位置情報を時間情報に変換することで位置演算を実現する実装法を考案し、遅延電線式ガンマカメラを提案しました。試作をして実証した後、新技術開発事業団の斡旋で東芝（株）と協力して、1972年に世界初の大面積高解像力ジャンボ・ガンマカメラの開発に成功しました。その結果をIAEAのシンポジウムで発表し、翌年に論文がIAEAから出版されました。視野直径が34cmで、解像力が30%従来機より向上したこの装置は同社により製品化され、海外にも輸出されました。その業績に対して1973年に毎日新聞社より第25回毎日工業技術賞が先生に授与されました。さらに1978年には内閣府により紫綬褒章を受勲されました。

X線CTが発表された1972年、先生はSPECT装置の開発研究を進行中でした。日本船舶振興協会医療技術研究開発財団の資金援助を受けた東芝（株）との協同研究によりSPECT装置は完成しました。この時、解析的な手法の画像再構成を研究して日夜模索する中で、先生は重畳積分法を独自に開発されました。勇んで論文を投稿すると、既にやられた内容であると差し戻され驚いたそうです。しか

し、めげずに新たな視点で統計的ノイズを含む投影データから画像を再構成する場合の最適フィルタを見いだして論文を再投稿し、1975年にPhys. Med. Biol. 誌で受理されました。先生は画像再構成に関する考察をさらに進めて、超関数を導入した論文が1979年にPhys. Med. Biol. 誌に掲載されました。

1970年に放医研に整備された医用サイクロトロンで生産される短寿命の陽電子（ポジトロン）放出アイソトープを核医学に利用するため、田中先生が率いる計測装置研究開発チームはポジトロン・イメージングの研究を開始しました。まず2個の二次元検出器を対向させて同時計数を検出する方式のポジトロンカメラを試作しましたが、X線CTの誕生をきっかけにポジトロンCT (PET)の開発研究に移行しました。日立化成(株)が開発したBGOシンチレータが利用できることから、日立メディコ(株)および日立中央研究所の協力を得て、頭部用PET装置の開発は進みました。そのなかで、先生は独創的な「ポジトロジー」方式を提案しました。検出器を円周上にわざと不均等間隔で配置し、その検出器リングを連続回転することで解像力を向上する方法です。1979年に装置は完成し、ポジトロジカ第1号 (Positologica-I) が我が国初のPET装置として放医研で稼働を始めました。

次に通産省医療福祉技術研究開発事業の一つとして、日立メディコ(株)、日立中央研究所、浜松ホトニクス(株)の3社で構成される研究組合に放医研が協力する形で、1979年から1982年にかけて2台の全身用多断層PET装置が先生のご指導の下で開発されました。1台目のPositologica-IIは1982年に放医研へ、2台目のPositologica-IIIは1983年に京都大学へ設置され、臨床応用の研究に使われました。これらの装置の検出器には、ガンマ線を検出した結晶を二つの出力信号から電氣的に弁別する「コーディング方式」が初めて用いられ、後に商用PET装置で主流となるブロック検出器の先駆けとなりました。さらに動物用PET装置への要求から、1983年に放医研は浜松ホトニクス(株)と協力して世界初の小動物（マウス）PET装置Positologica-IVの開発を始めました。同社が開発したゲート付き光電子増倍管が使われ、当時としては世界最高の解像力(3mm)を得ました。1984年には、RIイメージング装置に関するこれまでの功績を称えて、先生に島津科学技術振興財団より第3回島津賞が授与されました。このようなPET装置の開発研究が評価されて、新技術開発事業団の開発委託事業として、ヒトの脳の高次機能の研究を目的とする高性能高解像力の頭部用PET装置の開発が認められました。1986年から1989年にかけて浜松ホトニクス(株)と放医研が協力し、先生のご指導の下に開発研究は実施されました。特殊な光電子増倍管「Quad-PMT」を用いることで、1988年に完成した装置は視野中心で3.5mmの解像力が達成されました。

以上の装置開発と並行して、先生は基礎的な研究を多数行っています。シンチレーション検出器の高計数率特性を改善するための待ち合わせサンプリング法の開発(1979年, Nucl. Instr. Meth.), 多断層PET装置の設計に関する理論的研究(1982年, J. Comput. Assist. Tomogr.), タイムオブフライト (TOF, ガンマ線の飛行時間情報)を利用したPETの理論的研究(1982年, IEEE Comp. Soc.), 逐次近似型画像再構成法によるPET画像の総計ノイズの低減に関する研究(1982年, IEEE Comp. Soc.)などで、すべて英文誌に論文は掲載されました。

SPECTは、PETと異なりガンマ線の体内吸収の補正が困難です。先生はこの問題にも挑戦し、1983年にWBP (Weighted backprojection)法を提案され、J. Comput. Assist. Tomogr. 誌に論文が掲載されました。WBP法を簡素にして高速化したRPC (Radial post-correction)法の論文は、1984年にPhys. Med. Biol. 誌に掲載されました。それと同時に1983年から2年間、先生は厚生省がん研究助成金による班研究「高性能シングルフォトンECT装置の開発に関する研究」の研究代表者を務め、班員の方々との共同研究を精力的に進めました。

1986年より3年間、先生は日本医学物理学会の前身である日本医学放射線学会物理部会の会長を務められ、学会の運営に貢献されました。先生は、1988年3月に約30年勤務された放医研を定年退官しましたが、特別研究員としてその後も同研究所の研究者へ刺激を与え続けていただきました。同年4月からは、浜松ホトニクス(株)に顧問として虎ノ門の東京支社に勤務されました。同社では、1990年に中央研究所を開設し、1992年には、その中にPETセンターが建設され、PET装置の開発や動物を用いた応用研究が開始されました。先生は若手技術者の育成、指導に熱心に取り組まれました。1993年からは成蹊大学大学院で非常勤講師も務められ、医用物理計測の講義を9年間続けられました。受講生からの評判がとても良かったそうです。

一方、先生は磁気浮上電離箱の研究も手がけました。電離箱の中心電極を非接触で浮上させ、電気漏洩のない高感度の電離箱式放射線測定器をすべて手作りで試作し、性能を評価しました。その結果、きわめて高性能の環境ラドン濃度測定器が実現できました。この論文は、1991年にIEEE Trans. Nucl. Sci. 誌に掲載されました。

1993年に先生は同社の取締役役に就任され、会社の経営陣の中で技術的視点から重責を担われました。同年に医学放射線物理学会名誉会員となられ、1997年には勲三等瑞宝章を叙勲されています。2003年に再び顧問に退かれてから、先生は逐次近似型画像再構成の高速化に研究の的をしばり、ブロック型逐次近似法の高速化を考察した研究を2003年のPhys. Med. Biol. 誌に投稿し受理されました。そして、新たな画像再構成法をDRAMA法と名付けました。2010年にはDRAMA法の収束性や高速性を分析した

論文をPhys. Med. Biol. 誌に投稿し受理されました。その80歳を超えての挑戦が成功した後、惜しまれながら2014年に同社を退職されました。なお、2013年には先生がIOMP（国際医学物理機構）により、この半世紀内に医学物理学で顕著な業績を挙げた世界の医学物理学者50人のうちの1人に認定されたことを追記します。

不肖の弟子である村山は1976年に放医研に入所し、先生の研究室に配属されて以来45年にわたりご指導を賜りました。最初の自信作を英文誌に投稿する前に下書き原稿を先生にお渡しすると、翌日お返しいただいた下書きは全面真っ赤で、詳細な添削がされていました。書き直した論文を投稿すると、戻されることなくすぐさま受理されました。この時、先生から教わったのは、わかりやすい起承転結の道筋と簡潔な記述に努めることの重要性です。先生が書かれた論文は皆その良いお手本になっています。

先生の足跡をたどると、ご業績が放射線計測、核医学、画像工学など多彩な分野にわたるというだけでなく、それぞれの領域で独自に深い掘り下げが行われていることに驚きを禁じえません。また、時代の要請に目を向けて研究の方向を的確に選択し、社会に恩恵を与えた功績は計り知れず、世界にも類まれな科学者でした。

ここに、あらためて先生のご冥福を心よりお祈りいたします。



1979年 放医研に搬入されたPositologica-Iの前で
(右端：田中栄一先生)

元放射線医学総合研究所物理研究部物理第一研究室
主任研究官
村山秀雄

田中栄一先生ご略歴

学歴

1950 (昭和 25) 年 3 月	京都大学物理学科卒業
1961 (昭和 36) 年 12 月	理学博士 (京都大学) の学位授与

職歴

1950 (昭和 25) 年 4 月	京都大学教養学部宇治分校助手 (1951 年 3 月まで)
1951 (昭和 26) 年 5 月	通産省工業技術院電気試験所研究員 (1957 年 11 月まで)
1957 (昭和 32) 年 12 月	科学技術庁放射線医学総合研究所物理研究部研究員 (1960 年 12 月まで)
1961 (昭和 36) 年 1 月	科学技術庁放射線医学総合研究所物理第一研究室長 (1985 年 3 月まで)
1985 (昭和 60) 年 4 月	科学技術庁放射線医学総合研究所物理研究部長 (1988 年 3 月まで)
1988 (昭和 63) 年 4 月	浜松ホトニクス株式会社 役員室 顧問 (1993 年 11 月まで)
1993 (平成 5) 年 9 月	成蹊大学非常勤講師 (2012 年 3 月まで)
1993 (平成 5) 年 12 月	浜松ホトニクス株式会社 取締役 (2003 年 11 月まで)
2003 (平成 15) 年 11 月	浜松ホトニクス株式会社 役員室 顧問 (2014 年 12 月まで)

栄誉

1970 (昭和 45) 年 5 月	20 年勤続精励表彰 (科学技術庁長官)
1973 (昭和 48) 年 12 月	第 25 回毎日工業技術賞 (毎日新聞社, 遅延電線式シンチレーションカメラの開発)
1977 (昭和 52) 年 4 月	第 19 回科学技術功労者表彰 (科学技術庁長官, シンチレーションカメラの位置演算信号発生装置の開発)
1978 (昭和 53) 年 11 月	紫綬褒章 (内閣総理大臣, 総理府賞勲局長, 第 1585 号 遅延電線式シンチレーションカメラの開発)
1980 (昭和 55) 年 5 月	30 年勤続精励表彰 (科学技術庁長官)
1982 (昭和 57) 年 4 月	第 41 回注目発明選定証 (科学技術庁長官, ポジトロン CT 装置に関わる発明)
1983 (昭和 58) 年 11 月	第 18 回機械振興協会賞 (機械振興協会, 陽電子放出核種横断断層装置「ポジトロン CT」の開発)
1984 (昭和 59) 年 1 月	第 3 回島津賞 (島津科学技術振興財団, ポジトロン CT の研究開発をはじめ RI イメージング装置に関する研究開発)
1986 (昭和 61) 年 4 月	第 45 回注目発明選定証 (科学技術庁長官, 放射線検出装置の発明)
1995 (平成 7) 年 3 月	第 6 回江藤記念賞 (日本放射線影響協会, 多年にわたる核医学イメージング装置の開発)
1997 (平成 9) 年 11 月	叙勲 (勲三等 瑞宝章)

学会委員歴等

1966 (昭和 41) 年 7 月	放射性物質取扱主任者試験委員 (1974 年 6 月まで)
1982 (昭和 57) 年 3 月	日本医用画像工学会会長 (1986 年 7 月まで)

1986 (昭和61) 年 4 月	日本医学放射線学会物理部会長 (1989年3月まで)
1986 (昭和61) 年 7 月	日本医用画像工学会副会長 (1994年7月まで)
1986 (昭和61) 年～	Regional Editor of IEEE Transaction Medical Imaging
1989 (平成 元) 年 7 月	日本核医学会理事 (1993年7月まで)
1991 (平成 3) 年10 月	学術会議放射線科学研究連絡委員 (1994年10月まで)
1993 (平成 5) 年 9 月	日本医学放射線物理学会名誉会員
1994 (平成 6) 年 7 月	日本医用画像工学会名誉会員
1994 (平成 6) 年～	Editorial Board of Intern. J. Imaging Systems and Tech.
1996 (平成 8) 年10 月	日本核医学会名誉会員
1997 (平成 9) 年 1 月	International Advisory Board of Physics Medicine and Biology
1997 (平成 9) 年10 月	応用物理学会終身会員
2002 (平成14) 年 5 月	放射線医学総合研究所名誉研究員
2013 (平成25) 年12 月	50 Medical Physicists with Outstanding Contribution during the Period 1963–2013 (IOMP)
2015 (平成27) 年	日本医用画像工学田中栄一記念賞設立 (Medical Imaging Technology 論文賞)

◆ ◆ ◆ 編 集 後 記 ◆ ◆ ◆

2021 年を振り返りますと、新型コロナやアメリカ大統領の話題で世界がより身近に感じられるようになりました。本誌でも、米国在住の土井先生による連載コラムをスタートし、世界への関心を高めております。身近なところでは、とても悲しいニュースがございました。私が PET 装置開発や論文執筆などで手ほどきを受けたのは、浜松ホトニクス取締役役に就かれていた時期でしたが、もしかしたらお孫さんぐらいの年齢だったからかもしれません、そのような重役とは思ってもよらないぐらいに、本当にやさしくにこやかに接してくださり、何ひとつ嫌な思い出がございません。共同作業で残したいいくつかの研究業績が代えがたい形見のようです。本学会に留まらず、多くの先生方が悼む気持ちを同じくしており、追悼文をご執筆頂いた元編集委員長の村山先生を中心に、JAMIT-JSMP 合同企画による特集の準備を進めております。田中栄一先生のご冥福を心からお祈り申し上げます。

(編集委員長 長谷川智之)

Japanese Journal of Medical Physics

Editorial Board

T. Hasegawa (Chief)
Y. Anetai
F. Araki
T. Isobe
N. Kanematsu
R. Kohno
M. Sakai
S. Sato
S. Sugimoto
Y. Takahashi
A. Nohtomi
M. Hashimoto
T. Fujisaki
T. Magome
N. Matsufuji
S. Minohara
Y. Mori
H. Watabe
T. Yamada

JSMP Secretariat:

c/o International Academic Publishing, Co., Ltd., 358-5
Yamabukicho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0801, Japan
TEL: 03-6824-9384 FAX: 03-5227-8631

JSMP Editorial Office:

c/o International Academic Publishing, Co., Ltd., 332-6
Yamabuki-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-0801, Japan
TEL: 03-6824-9363 FAX: 03-5206-5332

ISSN: 1345-5354

Japanese Journal of Medical Physics [JJMP] is published four times per annual volume by the Japan Society of Medical Physics.

JJMP is indexed in Index Medicus and MEDLINE on the MEDLARS system.

医 学 物 理

編集委員長

長谷川智之 (北里大学)

編集委員

姉帯 優介 (関西医科大学)
荒木 不次男 (熊本大学)
磯辺 智範 (筑波大学)
兼松 伸幸 (量子科学技術研究開発機構)
河野 良介 (量子科学技術研究開発機構)
境 麻未 (倉敷中央病院)
佐藤 清香 (エレクトラ (株))
杉本 聡 (順天堂大学)
高橋 豊 (大阪大学)
納富 昭弘 (九州大学)
橋本 成世 (北里大学)
藤崎 達也 (茨城県立医療大学)
馬込 大貴 (駒澤大学)
松藤 成弘 (量子科学技術研究開発機構)
荻原 伸一 (神奈川県立がんセンター)
森 祐太郎 (筑波大学)
渡部 浩司 (東北大学)
山田 崇裕 (近畿大学)

公益社団法人日本医学物理学会事務局:

〒162-0801 東京都新宿区山吹町 358-5
(株) 国際文献社内
TEL: 03-6824-9384 FAX: 03-5227-8631

公益社団法人日本医学物理学会編集事務局:

〒162-0801 東京都新宿区山吹町 332-6
(株) 国際文献社内
TEL: 03-6824-9363 FAX: 03-5206-5332

ISSN: 1345-5354

本誌は年1巻とし、1号、2号、3号及び4号として発行します。

本誌の研究論文、資料、特集のレポート等はMEDLINEで検索できます。

賛 助 会 員 名

エ レ ク タ 株 式 会 社	東 洋 メ デ ィ ッ ク 株 式 会 社
株 式 会 社 応 用 技 研	長 瀬 ラ ン ダ ウ ア 株 式 会 社
加 速 器 エ ン ジ ニ ア リ ン グ 株 式 会 社	株 式 会 社 日 立 製 作 所
住 友 重 機 械 工 業 株 式 会 社	ユ ー ロ メ デ ィ テ ッ ク 株 式 会 社
株 式 会 社 千 代 田 テ ク ノ ル	公 益 社 団 法 人 日 本 生 体 医 工 学 会
株 式 会 社 通 商 産 業 研 究 社	

目 次

巻 頭 言

暗がりでも色を見分けるヤモリの目と医学物理研究

福士政広…………… 179

〈連載：教育委員会企画〉

解 説

放射線業務従事者を対象としたコホート研究の総説 [第2部]

工藤伸一, 井上一雅, 福士政広…………… 180

〈連載：RPT 誌特集〉

論文紹介

最近のRPT誌レビュー論文から：PHITSの医学物理計算への応用

古田琢哉, 佐藤達彦…………… 194

施設紹介

新潟大学医歯学総合病院医学物理グループ

新潟大学大学院保健学研究科医学物理士養成コースの紹介

宇都宮悟, 棚邊哲史, 中野永, 坂井まどか, 田邊俊平, 滝澤健司, 久島尚隆, 成田啓廣,
早川岳英, 笹本龍太…………… 195

連載コラム：シカゴ通信

世界の島国

—ニュージーランド, インドネシア, タヒチ, バルカン半島諸国—

土井邦雄…………… 201

追 悼 文

田中栄一先生のご逝去を悼む

村山秀雄…………… 214

編集後記……………

219

【複写される方へ】

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、(社)日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の方でない限り、著作権者から複写権等の行使の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3階 一般社団法人 学術著作権協会

FAX: 03-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

著作物の転載・翻訳のような、複写以外の許諾は、直接本会へご連絡下さい。