



Photo Yasuhiro Kirano

## Index

非侵襲医療に向けた革新的アイソトープ製造法 .....永井 泰樹・川端 方子	1
PHITS計算コードの開発秘話 .....中村 尚司	6
〔コラム〕 4 th Column.....中川 恵一	10
外部放射線被ばくの実用量に関するICRU/ICRP共同報告 ～第14回放射線モニタリングに係る国際ワークショップの パネルディスカッション～ ..... Hannes Stadtmann	11
放射線安全技術講習会 第62回放射線取扱主任者試験受験対策セミナー・開催のお知らせ	17
「2019国際医用画像総合展」のご案内.....	18
「個人線量測定サービス規約」の名称を変更いたしました .....	18
〔サービス部門からのお願い〕 4月1日はガラスバッジ、ガラスリングの交換日です。 ....	19

# 非侵襲医療に向けた革新的アイソトープ製造法

永井 泰樹\*1、川端 方子\*2

## 1. はじめに

健康で自立した生活を長く続けたいとの想いは、世代を問わず多くの方々的心愿と思われる。実際、人々の健康への関心と国民皆保険制度のため日本人の平均寿命は世界の上位に位置している。ところで、我が国では2017年に亡くなった134万人の半分の方は、三大生活習慣病のがん(37万人)、心疾患(20万人)、そして脳血管疾患(11万人)が原因であった。米国では食生活の改善等で1991年以降がんによる死亡者数が減少し続けているが、我が国では逆に増え続け2016年のがん罹患数は101万人であった。その中就労可能年齢の20~64歳の方は約30万人で10万人余が依願退職や解雇で離職している。そのため、がん罹患勤労者の治療と就労の両立そして三大生活習慣病罹患数の減少に向け、非侵襲で生活の質の高い医療の研究開発はますます重要になっている。そのような医療に「特定の臓器や細胞に集積しやすい医薬品にラジオアイソトープ(RI)を合成した放射性医薬品を用いる核医学医療」がある。放射性医薬品は患者に投与された後病巣部に集積し、医薬品中のRIがガンマ線を放出する場合は病巣部の画像がガンマカメラで得られる。その結果、例えば脳血流の画像を撮影して脳血管の異常を脳梗塞などが発症する前に見つけられる。またRIがベータ線とガンマ線を放出する場合は、ベータ線はがん細胞を致死し(非侵襲治療)ガンマ線でその診断治療効果を確認できる。

本稿では、健康長寿社会に向け核医学医療が更なる貢献をする上でその鍵となる医療用RIに係る課題とその解決に向けた我々の研究開発の現状を紹介する。

## 2. 医療用RIに係る2つの課題

先ずモリブデン-99( $^{99}\text{Mo}$ )について述べる。テクネチウム-99m( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ )医薬品を用いて三大生活習慣病や認知症等の核医学診断が、我が国で年間約70~90万件(毎日約3,000人)行われている<sup>1)</sup>。 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (半減期=6時間)は $^{99}\text{Mo}$ (半減期=66時間)のベータ崩壊により得られ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 医薬品は製薬メーカーや病院で $^{99}\text{Mo}$ から化学分離後製剤化され利用されている。ところで、我が国は診断に必要な全ての $^{99}\text{Mo}$ を毎週数回輸入しているため $^{99}\text{Mo}$ の安定供給体制は堅固でなければならない。現在 $^{99}\text{Mo}$ は海外の6~9基の高経年化した研究用原子炉で濃縮 $^{235}\text{U}$ の核分裂反応で製造されている(以降:原子炉製 $^{99}\text{Mo}$ )。しかし、2008年から始まった原子炉の計画外停止及び $^{99}\text{Mo}$ の分離処理施設のトラブルがその後も頻発し $^{99}\text{Mo}$ 供給体制は脆弱である<sup>2)</sup>。また短半減期 $^{99}\text{Mo}$ の輸入は自然災害でも影響を受ける。実際、2010年4月にアイスランドの火山灰により欧州の空港が閉鎖され $^{99}\text{Mo}$ 輸入が停止した。

次に、医療用新RIの課題について述べる。医薬品のがん細胞など病巣部への集積度、治療効果そして副作用は個人差があるため、がん治療では個々の患者に応じた個別化医療が重要とされている。放射性医薬品を用いる核医学医療は、「同じ患者に同じ医薬品を用いて診断し治療することで個別化医療を実現できる唯一の医療法である」と考えられている<sup>3)</sup>。そしてがんの大きさや種類は色々あるので多様なRIが不可欠である。しかし日本で使用中のがん治療用RIは、 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{223}\text{Ra}$ の4種類のみである(最近 $^{177}\text{Lu}$ が米国で承認された)。個別化医療を強力に推進するためがん治療用RIの新たな製造法による一層の開発が急務である<sup>4)</sup>。開発に際しては治療用RIに要請される物理・

\*1 Yasuki NAGAI 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門  
\*2 Masako KAWABATA 株式会社千代田テクノロ 大洗研究所

化学的性質として、(i)放射性医薬品は患者に投与後病巣部に最も強い放射能強度で集積する迄に1-2日要するため半減期は数日程度であること、(ii)ベータ線のエネルギーは高低様々であること、また(iii)特定の臓器や細胞のがん部に集積する多種類の医薬品と結合できるように色々の原子番号を持つことに留意する必要がある。

### 3. 加速器中性子による医療用RIの新製造法

医療用RIは原子炉や加速器で得られる粒子を安定同位体試料に照射し製造されている。原子炉の中性子ではベータ線が放出されるRIが主に製造され、がん治療に利用されている(ガンマ線を放出するRIでは診断にも利用)。一方、加速器の陽子では陽電子放出に続き2本の511keVガンマ線が同時に放出されるRIが主に製造され、PET診断(ポジトロン断層法)に利用されている。最近、アルファ線が放出される<sup>223</sup>Raの治療効果の成果を受けアルファ線放出核<sup>211</sup>Atの製造研究が阪大、量研機構、福島県立医科大等で進行中である。

我々は上記医療用RIに係る2課題の解決に向け重陽子加速器で得られる高速中性子を用いた革新的医療用RI製造法を発見した<sup>5,6)</sup>。ところで、医療用RIの製造法開発に際しては放射性医薬品に使用されるRIの放射能濃度は極めて高いことに留意する必要がある。加速器・原子炉で製造されるRIの原子数はRI製造用試料の原子数の百万分の1以下と微量である。そこで、この微量RIを化学分離などで試料から分離し無担体の高放射能濃度RIが得られる製造法でなければならない。

重陽子加速器で得られる高速中性子を試料に照射すると陽子やアルファ線が放出され試料とは異なる原子番号のRIが製造できる。その結果化学分

離などで無担体のRIが得られる(図1参照)。

この製造法では、(i)軽元素から重元素を含め数多の試料が使用できること、(ii)陽子を用いた製造では陽子の試料中での飛程は1mm程度(30MeVの陽子)なので使用可能な試料の厚さは1mm程度に制限されるが中性子は電荷が無いので4cm厚程度の試料が利用できること、(iii)陽子やガンマ線照射では試料が発熱するため高強度ビームの照射ができないが中性子では発熱は極微量であり高強度中性子が利用できる利点がある。そのため本製造法は、医療用RIとして期待されながらも製造方法が未確立のRI及び利用中のRIを含め多様なRIの大量製造が期待できる。

次に本製造法に不可欠なエネルギー数MeV程度以上の高強度の高速中性子を得る方法について述べる。これまで高速中性子の生成研究は、核融合や原子核物理分野の研究者が加速器からの陽子や重陽子を様々な標的に照射して行ってきた<sup>7)</sup>。そして、重陽子をLi、Be、炭素等に照射し重陽子の破砕反応を利用した生成法が有力であることを見つけた。この高速中性子の特徴は、(i)40-50MeVの重陽子を炭素等に照射すると生成される中性子の大部分が重陽子の進行方向に放出されるのでRI製造用試料に中性子が有効に照射されること、(ii)中性子のエネルギーは重陽子のエネルギーの半分程度で例えば重陽子が40MeVの場合中性子の平均エネルギーは14MeVであり後述する<sup>99</sup>Moや<sup>67</sup>Cuの製造に適している点にある。

### 4. <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tcの安定確保に向けたOECD(経済協力開発機構)の取組

<sup>99</sup>Moの短中長期にわたる安定確保に向けた代替案の開発は世界が最重要視する喫緊の課題である。

実際、2009年OECDの専門機関であるNEA(原子力機関)は、<sup>99</sup>Moの供給不足の根本的背景を検討しその短中長期的安定化を確保する政策を打出すべくハイレベルグループ(日本を含めOECDのメンバー国が参加)から成る委員会を立ち上げた。そして、<sup>99</sup>Mo供給の信頼性確保をはかるため<sup>99</sup>Mo供給体制を見直し、脆弱性のポイント、取り

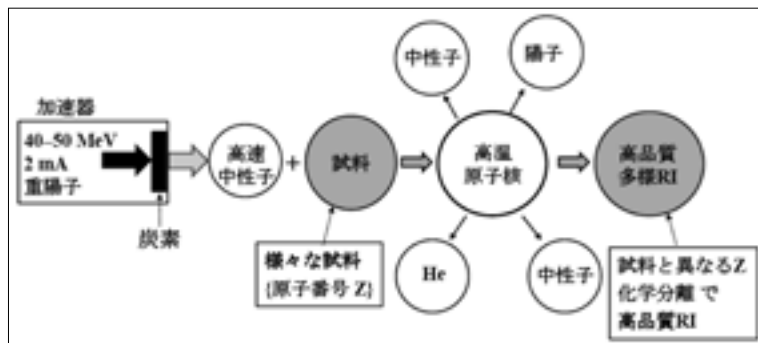


図1 加速器で得られる高速中性子による無担体RI製造法

組むべき課題と解決のための方策そして<sup>99</sup>Mo代替製造法が下記点を考慮し議論された<sup>8)</sup>。即ち、(i) <sup>99m</sup>Tc医薬品の品質は原子炉製<sup>99</sup>Moと同等であること、(ii) <sup>99</sup>Moは間断なく安定に製造できること、(iii) <sup>99</sup>Moの価格は原子炉製<sup>99</sup>Mo価格と比べ経済的持続性をもつこと、(iv) <sup>99</sup>Mo以外の医療用RIの同時生成が可能であること等である。最後の項目は、予期せぬ医療用RIの不足に備えると共に代替法の経済的価値を付加する点で重要である。以下に代替法の主たるものを記す。

**i) 原子炉の利用**

アルゼンチン、オーストラリア、南アでは低濃縮<sup>235</sup>Uの核分裂反応を用いた、米国では研究用原子炉を用い<sup>98</sup>Moの中性子捕獲反応による<sup>99</sup>Mo製造研究が進行中である。

**ii) 加速器の利用**

加速器で得られる陽子や電子（ガンマ線）を用い<sup>99</sup>Moや<sup>99m</sup>Tcを製造する研究は1970年代から行われている。その中で、<sup>100</sup>Mo (*p, 2n*) <sup>99m</sup>Tc反応による<sup>99m</sup>Tcの製造研究、<sup>100</sup>Mo (*γ, n*) <sup>99</sup>Mo反応による<sup>99</sup>Mo製造研究を米国とカナダが長年行ってきたが実用化には至っていない。我々は高速中性子を用い<sup>99</sup>Moを生成する反応、<sup>100</sup>Mo (*n, 2n*) <sup>99</sup>Mo [*(n, 2n)* と略記]、が有力であることを見つけ新製造法として提案した<sup>5)</sup>。

**5. 加速器中性子利用による<sup>99</sup>Mo製造法**

本製造法の提案に際し<sup>100</sup>Moの試料と加速器中性子の反応に係る断面積の実験値・評価値の存在が重要であった。その断面積は<sup>99</sup>Mo製造の観点から下記特徴を持つ。即ち、(i) (*n, 2n*) 反応断面積は中性子エネルギーが10MeV~20MeVで全ての反応中で最大で1バーン以上と大きく、(ii) 不要なRIの生成反応断面積は (*n, 2n*) 反応断面積の1/100以下であり核種純度の高い<sup>99</sup>Moの大量製造が期待できる。

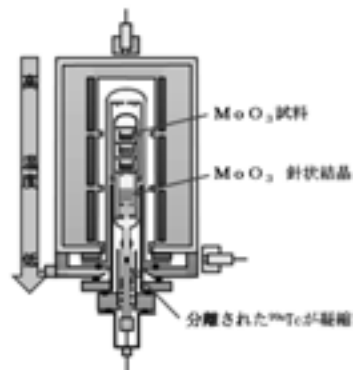
ところで、本<sup>99</sup>Mo製造法の実用化に向けては<sup>99</sup>Moから得られる<sup>99m</sup>Tcを用いた<sup>99m</sup>Tc医薬品の品質が既存の<sup>99m</sup>Tc医薬品と同等であることを実証する必要がある。実証に当たり代替法による<sup>99</sup>Moの放射能濃度が原子炉製<sup>99</sup>Moに比べ極めて低いことが課題であった。例えば、局所肺換気機能検査（換気シンチグラフィ）に利用中の<sup>99m</sup>Tc医薬品の<sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub>-の放射能濃度は病巣部の画像を鮮明に撮

るため260~370MBq/(0.1mL)である。この放射能濃度は比放射能{<sup>99</sup>Mo/(放射能/Mo質量g)}が5000Ci/gと高い原子炉製<sup>99</sup>Moを用いれば容易に得られる。しかし、Moを試料とする代替法で製造される<sup>99</sup>Moの比放射能は1Ci/g程度と極めて低い。そのため比放射能の低い<sup>99</sup>Moから高放射能濃度の<sup>99m</sup>Tcを得る分離法を開発する必要があった。

我々は過去の分離法を検討し熱分離法を採用した。(i) (*n, 2n*) 法では100g程度の多量の<sup>100</sup>MoO<sub>3</sub>試料を用いること、(ii) 高価な<sup>100</sup>Mo試料を高効率で回収できること、(iii) 短時間で分離精製が行える点を考慮した結果である。熱分離法では電気炉内に照射済の<sup>100</sup>MoO<sub>3</sub>試料を設置しMoO<sub>3</sub>とTc酸化物の蒸発温度が790度と310度と大きく異なることを利用して化学薬品を用いずに<sup>99m</sup>Tcを分離できる。しかし、この熱分離法には30年余にわたる未解決の課題があった<sup>9)</sup>。MoO<sub>3</sub>試料が1g以上の場合及び<sup>99m</sup>Tcを熱分離するミルク作業が多数回になると<sup>99m</sup>Tcの分離効率が極端に低下することであった。そこで、新型熱分離装置を自作しこの課題解決に取り組んだ(図2)。そして、実用時に使用予定の100gのMoO<sub>3</sub>試料でも適切な温度で溶融すれば多数回のミルクでも90%程度の高分離効率で<sup>99m</sup>Tcを得ることに成功し長年の課題を解決した<sup>10)</sup>。更に、この分離装置を用いれば<sup>100</sup>Moを99%の高回収率で回収できることを実証できた<sup>11)</sup>。

こうして得られた<sup>99m</sup>Tcから心筋血流、脳血流、腎臓機能、骨シンチの検査に使用されている<sup>99m</sup>Tc放射性医薬品を作り放射性医薬品基準で要請される値と比較した。表1に示す様に全ての<sup>99m</sup>Tc放射性医薬品が米国放薬基を満たし本製造法による<sup>99m</sup>Tcの実用化に大きく前進する結果を得た<sup>12)</sup>。

ところで、1台の重陽子加速器を用いて我が国の<sup>99</sup>Mo需要量の何割を賅えるかは<sup>99</sup>Moの製造が経済的に持続



**図2 <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc熱分離装置**  
 白金ポート内のMoO<sub>3</sub>試料は溶融され<sup>99m</sup>Tc酸化物が試料表面から蒸発する。同時に蒸発する微量のMo酸化物は試料近辺にMo針状結晶として凝縮し<sup>99m</sup>Tc酸化物は下流で凝縮し両者は分離される。

表1 加速器中性子で製造された<sup>99m</sup>Tcで標識した<sup>99m</sup>Tc医薬品の品質試験結果

パラメーター	米国放棄基準	実験1	実験2	実験3	実験4
pH	4.5 to 7.5	7.23	7.16	6.66	6.58
内毒素	<175 EU/V	<0.03 EU/mL	<0.03 EU/mL	<0.03 EU/mL	<0.03 EU/mL
放射性核種純度 ウラン核分裂 以外の製法	<sup>99</sup> Mo/ <sup>99m</sup> Tc<0.015% 他のガンマ線/ <sup>99m</sup> Tc<0.05%	<0.015% <0.05%	<0.015% <0.05%	<0.015% <0.05%	<0.015% <0.05%
アルミニウム	<10ppm	<10ppm	<10ppm	<10ppm	<10ppm
モリブデン	Not specified	-	0.138ppm	0.020ppm	0.034ppm
放射化学的純度	>95% <sup>99m</sup> TcO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	99.80%	99.90%	99.59%	99.52%
標識試験結果	>90%	<sup>99m</sup> Tc-MIBI 99.98%	<sup>99m</sup> Tc-ECD 98.27%	<sup>99m</sup> Tc-MAG3 97.23%	<sup>99m</sup> Tc-MDP 99.95%
診断箇所		心筋血流	脳血流	腎臓機能	がん骨転移

能力を持つか否かを左右する重要な知見である。これまで ( $n, 2n$ ) <sup>99</sup>Mo生成に適した40 MeV重陽子を用いた<sup>99</sup>Moの生成量は未測定であったためMoO<sub>3</sub>試料100 gを用い測定した。この実験では測定値を ( $n, 2n$ ) <sup>99</sup>Mo反応断面積及び加速器中性子のエネルギー等の過去のデータを精査し得た評価値と詳細に比較することも目的とした。その結果、測定値は評価値と誤差の範囲で良く一致した<sup>13, 14</sup>。この一致は、<sup>99</sup>Moの生成量を最適化する上で必要な様々な重量のMoO<sub>3</sub>試料や形状等に対して生成量を高精度で計算できることを意味する重要な結果である。実際、(i)我々はこの結果を踏まえ40 MeV 2 mAの重陽子加速器1台を用いれば我が国の<sup>99</sup>Mo需要量の50%が供給できる可能性を持つことを発見した<sup>14</sup>。一方、(ii)不要RIは<sup>100</sup>Mo ( $n, \alpha$ ) <sup>97</sup>Zr反応による<sup>97</sup>Zr (半減期=17時間)とその崩壊による<sup>97</sup>Nb (半減期=1.2時間)でありその照射直後の放射能は<sup>99</sup>Moの1/100と極めて少なく核種純度の高い<sup>99</sup>Moが得られることが実証された。

## 6. 新しい医療用RIの開発

放射性医薬品によるがん治療ではRIから放出されるベータ線、オージェ電子、アルファ線の体内での飛程が、がんの大きさに対応していることが望ましい。オージェ電子及びアルファ線の平均飛程はRIの種類にあまり依らず約0.001mmと0.1mm程度と短い。一方、ベータ線を放出するRIには多様な医薬品開発に重要な色々な飛程を持つRIがある。以下には、<sup>67</sup>Cuに関する我々の研究開発を紹介する。

<sup>67</sup>Cu (半減期=62時間)は、体内平均飛程は0.7mm程度のベータ線と画像撮影に適したガンマ線を放出する。そのため、1種類の<sup>67</sup>Cu医薬品で治療と診断が同時に可能な理想的RIとして悪性リンパ腫、大腸がん、膀胱がん、結腸がん、卵巣がん等の治

療に期待されている。これまで、高品質・高強度の<sup>67</sup>Cuを製造する開発が原子炉及び加速器を用いて1970年頃から行われてきた。加速器では陽子、アルファ、中性子及びガンマ線を用いて<sup>68</sup>Zn ( $p, 2p$ ) <sup>67</sup>Cu, <sup>70</sup>Zn ( $p, \alpha$ ) <sup>67</sup>Cu, <sup>64</sup>Ni ( $\alpha, p$ ) <sup>67</sup>Cu, <sup>68</sup>Zn ( $\gamma, p$ ) <sup>67</sup>Cu, <sup>67</sup>Zn ( $n, p$ ) <sup>67</sup>Cu, <sup>68</sup>Zn ( $p, 2p$ ) <sup>67</sup>Cu反応が調べられた。<sup>68</sup>Zn ( $p, 2p$ ) <sup>67</sup>Cuが主に利用されてきたが、(i)同時生成される不要RIの<sup>64</sup>Cuが<sup>67</sup>Cuの10倍強あり核種純度が低いことと(ii)<sup>67</sup>Cuの製造量が少ないためより適切な製造法の確立が待たれていた<sup>15</sup>。そこで、我々は加速器中性子を利用した新たな<sup>67</sup>Cu製造法、<sup>68</sup>Zn ( $n, pn+d$ ) <sup>67</sup>Cu反応、を提案し<sup>16</sup>、量研機構の加速器(TIARA)を用い製造される<sup>67</sup>Cuの核種純度を調べた<sup>17</sup>。その結果、(i)<sup>64</sup>Cuの製造量は<sup>68</sup>Zn ( $p, 2p$ ) <sup>67</sup>Cu反応の場合に比して1/500以下となり高い核種純度の<sup>67</sup>Cuが得られ、(ii)<sup>67</sup>Cuの予測製造量は50 MeV 2 mAの重陽子加速器を用いれば150 GBq/日程度の製造量が期待できることが分かった。

医薬品開発に繋がる新たな<sup>67</sup>Cu製造法が見つかったことを踏まえ、大腸がんを移植したマウスに加速器中性子で製造した<sup>67</sup>CuCl<sub>2</sub>を注射しがん部を含め体内の臓器に<sup>67</sup>Cuが集積する割合を調べる実験を計画した。ところでこの研究にはZn試料を含まない高放射能濃度の<sup>67</sup>Cuが不可欠なため30 g以上のZn試料に適用できる化学分離装置を新たに開発し高品質の<sup>67</sup>Cuを得ることに成功した<sup>18</sup>。実験では、マウスに<sup>67</sup>CuCl<sub>2</sub>を投与後一定時間が経過してからマウスの血液、肝臓、腎臓等の各臓器及び大腸がん(腫瘍)部へ集積した<sup>67</sup>Cu由来のガンマ線を測定することで、各臓器への集積率を調べた。その結果、Cuは人体には必須の元素であるため代謝により体内臓器に取込まれるが、投与した<sup>67</sup>Cuは大腸がん部にも顕著に集積する性質を持つことを発見した<sup>19</sup>。この予想外の結果は、<sup>67</sup>Cuそれ自体が大腸がんの診断・

治療に役立つ可能性を示唆すると共に今後の開発に弾みをつける成果であり本製造法による<sup>67</sup>Cuの医薬品開発を推進していきたいと考えている。

## 7. まとめと展望

放射性医薬品を用いた核医学医療は、非侵襲で生活の質の高い医療として人々に信頼され高い評価を得ている。そして原子炉や加速器を利用して医療用RIが開発され核医学医療分野でその威力を発揮している。今後、最新医療が目指す「個別化医療」に核医学医療が更なる貢献をする上で放射性医薬品開発の鍵となる多様なRIの開発が喫緊の課題である。また<sup>99</sup>Moのように供給が不安定になる利用中のRIもある。

ところで、我が国で利用中の医療用RIは全て外国で開発されたものであり、核医学医療はこれらRIの殆どを輸入して行われている。<sup>99</sup>Mo開発の祖の一人であるSrivastava氏(ブルックヘブン研究所)は、2016年米国核医学会で講演した際に、新たな医療用RIの開発は先進国の使命であると述べた。そうであるべきだと思う。また国民皆保険の我が国の医療費は、2017年には42兆円で2020年には国家予算の半分に相当する50兆円と予測されている。そして、医薬品・医療機器の貿易赤字は毎年2.5兆円という状況であり新規医薬品・医療機器の開発は、国民皆保険制度維持のためにも重要とされている。

我々は、医療用RIの国産化に向け重陽子加速器で得られる高速加速器中性子のみを用い<sup>99</sup>Moと<sup>67</sup>Cuを製造する我が国独自の革新的RI製造法を提案した。そして新製造法で製造した<sup>99</sup>Mo及び<sup>67</sup>Cuが医療用RIとして高品質を持つことを実証した。従来<sup>99</sup>Moは原子炉で<sup>67</sup>Cuは加速器と異なる施設で製造されてきた。本製造法は、これら<sup>99</sup>Moや<sup>67</sup>Cuに留まらず多様な新RIを同一の加速器で多量に製造可能である。50 MeV 2 mAの重陽子加速器施設が実現すれば喫緊の課題である<sup>99</sup>Moの供給不安定は国産化により緩和され、また我が国の研究者・技術者による国産の<sup>67</sup>Cuを含めた新たながん治療用の放射性医薬品開発の道が拓けると考えている。

## 謝辞

本研究は、原子力機構及び量研機構の加速器中性子利用RI生成研究プロジェクトとして、両機構

の方々そして千代田テクノ、住友重機械工業、(旧)富士フィルムRIファーマの方々との共同研究として行われその間東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンターのサイクロトロンを利用させて頂きました。関係者の方々のご協力に感謝します。本研究は、科学研究費補助金及び科学技術振興機構の助成金を得て行われている。

## 参考文献

- 1) アイソトープ等流通統計, 2018, 日本アイソトープ協会.
- 2) L. M. Filzen, L. R. Ellingson, A. M. Paulsen, and J. C. Hung: J. Nucl. Med. Technol. 45, 1 (2017).
- 3) S. C. Srivastava and L. F. Mausner: Therapeutic Radionuclides: Production, Physical Characteristics, and Applications, R. P. Baum (ed.), Therapeutic Nuclear Medicine, Medical Radiology. Radiation Oncology, DOI: 10.1007/174\_782 (2012).
- 4) M. J. Rivarda, et al, Applied Radiation and Isotopes 63, 157-178 (2005).
- 5) Y. Nagai and Y. Hatsukawa: J. Phys. Soc. Jpn. 78, 033201 (2009).
- 6) Y. Nagai, et al, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 064201 (2013).
- 7) P.V. Logatchev, L.B. Tecchio: Workshop on Neutron and RIB Production Targets, SPES-03, Legnaro July 23-27 (2001).
- 8) Report on the Supply of Medical Radioisotope, OECD (2010).
- 9) R. E. Boyd: Int. J. Appl. Radiat. Isot. 33, 801 (1982).
- 10) Y. Nagai, M. Kawabata, N. Sato, K. Hashimoto, H. Saeki, and S. Motoishi: J. Phys. Soc. Jpn. 83, 083201 (2014).
- 11) M. Kawabata, S. Motoishi, H. Saeki, K. Hashimoto, and Y. Nagai: J. Phys. Soc. Jpn. 86, 053201 (2017).
- 12) Y. Nagai, Y. Nakahara, M. Kawabata, Y. Hatsukawa, K. Hashimoto, H. Saeki, S. Motoishi, A. Ohta, T. Shiina, and Y. Kawachi: J. Phys. Soc. Jpn. 86, 053202 (2017).
- 13) F. Minato, K. Tsukada, N. Sato, S. Watanabe, H. Saeki, M. Kawabata, S. Hashimoto and Y. Nagai: J. Phys. Soc. Jpn. 86, 093201 (2017).
- 14) K. Tsukada, Y. Nagai, K. Hashimoto, M. Kawabata, F. Minato, H. Saeki, S. Motoishi, and M. Itoh: J. Phys. Soc. Jpn. 87, 043201 (2018).
- 15) C. S. Cutler, H. M. Hennkens, N. Sisay, S. Huclier-Markai, and S. S. Jurisson: Chem. Rev. 113, 858 (2013).
- 16) T. Kin, Y. Nagai, N. Iwamoto, F. Minato, O. Iwamoto, Y. Hatsukawa, M. Segawa, H. Harada, C. Konno, K. Ochiai, and K. Takakura: J. Phys. Soc. Jpn. 82, 034201 (2013).
- 17) N. Sato, K. Tsukada, S. Watanabe, N. S. Ishioka, M. Kawabata, H. Saeki, Y. Nagai, T. Kin, F. Minato, N. Iwamoto, and O. Iwamoto: J. Phys. Soc. Jpn. 83, 073201 (2014).
- 18) M. Kawabata, K. Hashimoto, H. Saeki, N. Sato, S. Motoishi, K. Takakura, C. Konno, Y. Naga: J. Radioanal. Nucl. Chem. 303, 1205 (2015).
- 19) Y. Sugo, K. Hashimoto, M. Kawabata, H. Saeki, S. Sato, K. Tsukada, and Y. Nagai: J. Phys. Soc. Jpn. 86, 023201 (2017).

## 著者プロフィール

永井 泰樹  
1971年 東京工大 博士修了(理学博士)。  
大阪大学助手、東京工大助教授、東京工大教授、大阪大学教授。  
専門は原子核物理・天体核物理。  
2009年以降は加速器中性子利用の医療用RI生成研究に携わっている。現在、量子科学技術研究開発機構研究員。



# PHITS計算コードの開発秘話



中村 尚司\*

現在汎用重イオン輸送計算コードとして世界中で広く使われているPHITSモンテカルロ計算コードがそもそもどのような経緯で開発されたのかを、その開発に携わった一人としてお話ししたい。

放射線医学総合研究所（放医研）で重イオン医療用加速器施設（HIMAC）の建設が1984年から概念調査が始まり、東京大学原子核研究所（東大核研）から放医研に移られてこの加速器施設の開発責任者であった平尾泰男先生（故人）から、当時（1986年）東大核研から東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター（CYRIC）に移ったばかりの筆者（中村）が、施設の遮蔽安全設計計算の全責任を負った時にこの開発研究は始まっている。この施設の設計は日建設計が請け負ったが、この当時重イオンの遮蔽設計計算が出来るコードは世界中に全く無かった。ところがこの頃、アメリカの会社で重イオンの輸送計算が出来るコードが開発されているという話を聞いて、開発担当の人を知っていたので連絡を取り、日建設計が100万円で購入する話がまとまり、前金としてその会社に20万円を払ったのに全くコードが届かなくていくら催促しても返事がない状況であった。結局そのコードは完成しなかった模様である。

ともかく設計計算を始めるために日建設計か

ら加藤隆氏を民間共同研究員としてCYRICに受け入れて、彼を指導しつつ遮蔽設計計算を始めたが、高エネルギー重イオンからの中性子生成の実験データとしては、Heイオン入射のデータが唯一あるのみで、勿論計算コードも皆無であった。いつまでも待ってられない状況だったので、Heイオンまで計算出来るHETC/KFA-1コード<sup>[1]</sup>を用いて遮蔽計算の線源となる中性子生成量を計算し、遮蔽計算には安全側の評価を与える平山・伴の近似計算式<sup>[2]</sup>を使用した。ともかく、実験値も計算コードも全く無い状況で非常に苦労して設計したものである。このHETC/KFA-1コードは、Heイオンを陽子2個、中性子2個が独立して原子核に入射して核内カスケードをそれぞれ行うというモデルで、精度は保証出来ないと明記されていた。計算結果をHeイオンによる中性子生成実験値と比べると確かにかなりの過大評価（2-3倍）となったので、安全側の評価になることが分かった。がん治療に用いられる炭素イオンの計算が出来ないので、Cイオンは核子数がHeイオンの3倍なので、Heイオンの計算結果を3倍するという仮定にした。実際にはHeイオンのビーム量がCイオンのビーム量よりもかなり多いので、この中性子生成量の評価が安全側で問題ないとして、それに基づいて遮蔽設計計算を行った<sup>[3,4]</sup>。このため

\* Takashi NAKAMURA 東北大学名誉教授

かなりの安全側の遮蔽設計となったが、そのためにその後のビーム増強等の変更の際しても放射線安全上の問題が生じることはなかったのは、けがの功名と言えよう。

この重イオン輸送計算で苦勞したことが、後の重イオン輸送モンテカルロ計算コードPHITSの開発への原動力となり、世界で最初のコードが完成することになり<sup>[5]</sup>、その後世界中で重イオン輸送計算コードが開発されるきっかけになったことは誇るべき成果である。

放射線安全設計に関しては、重イオンによる2次中性子生成の実験データが全く無いことも大きな問題であった。当時重イオン加速を行っていた加速器はアメリカのLBL(Lawrence Berkley National Laboratory) だけであり、そこでの実験を希望して申し込んだがうまくいかずに残念な思いをしたものである。

その後HIMACが完成して、1994年秋(平成6年度)から共同利用が始まり、これから自分たちでデータを思う存分取ろうと決意して、そのトップバッターとして物理汎用実験室のビームライン(PH1、PH2)を用いて、HeからXeに至る重イオン核反応による中性子生成二重微分断面積、重イオンによる中性子生成量、重イオン生成中性子の物質透過、高エネルギー中性子検出器の応答特性、重イオンによる核破碎生成物の媒質内分布などの様々な測定を行ってきた。これらの測定は放射線物理分野において重要な研究であると同時に、放射線安全に直結する研究でもある。この共同利用研究は2003年度(平成14年度)に筆者が定年退官するまで10年間に亘って、東北大CYRIC、理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、放医研、Lawrence Berkley National Laboratory(LBL、米国)と共同で行われ、博士論文8編、学術論文27編、原子力学会賞受賞3名というすばらしい成果

をあげることが出来た。

なお、これらの研究成果を中心に、筆者とHeilbronn(当時LBL)と共同で、“Handbook on Secondary Particle Production and Transport by High Energy Heavy Ions”という本を2006年にWorld Scientific Publ. Co.から出版した(図1)。

ここでは、中性子生成二重微分断面積(DDX)、厚いターゲットからの中性子生成量(TTY)、中性子遮蔽実験、核破碎反応生成物の生成断面積と放射化の実験結果が数値

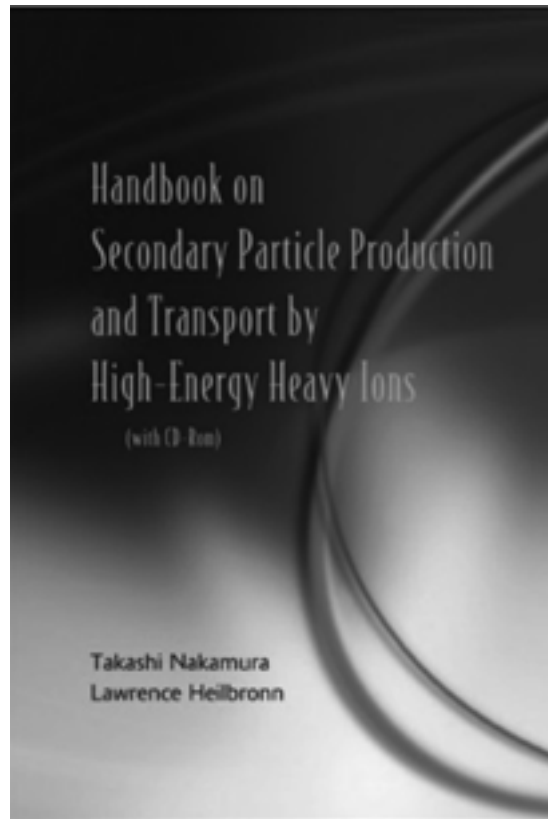


図1 World Scientificから2006年1月に出版されたハンドブック(CD Rom付)の表紙。Amazon.comから購入可能(約7千円)

Handbook on Secondary Particle Production and Transport by High Energy Heavy Ions, Takashi Nakamura and Lawrence Heilbronn, World Scientific Publ. Co. Ltd. (2006).



データ (CD-Rom) と共に与えられていて、世界中の他の重イオン加速器施設の設計にも広く利用されている。

HIMACで測定されたこれらの実験結果を理論的に解析するために、当時存在していなかった重イオン輸送計算コードを世界に先駆けて開発しようと考えて、大学院生であった岩瀬広氏 (現KEK)、三菱総研の義澤宣明氏と共同で、ORNLで20年余りに作成された Bertiniの核内カスケードモデルに基づく重イオン核反応計算コードHIC<sup>[6]</sup>を、ハドロン輸送計算コードHETC-3STEP<sup>[7]</sup>に組み込んで、重イオン輸送計算を行うモンテカルロコードHETC-CYRICを平成12年 (2000年) に開発した<sup>[8]</sup>。このコードをHIMACでの中性子生成実験の解析に適用して計算した結果、

良い精度を持つことが評価された。ただし、このコードは中性子生成計算には十分な精度を持っているものの、適用範囲が限られており、汎用計算コードを開発する必要があった。

丁度この頃に、RIST (高度情報科学技術研究機構) の仁井田浩二氏から、筆者に重イオン輸送計算コードの共同開発の提案があり、岩瀬氏を約1ヶ月間、原研に行ってもらって仁井田氏の指導の下で、岩瀬氏の開発した重イオン輸送計算のサブルーチンを、仁井田氏の開発した重イオン核反応を計算する量子分子動力学 (JQMD) コード<sup>[9]</sup>を含むNMTC-JAM<sup>[10]</sup>に組み込んで、新しい汎用重イオン輸送計算コードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code Systemの頭文字を取った名前仁井田氏が名付け親である) を開発

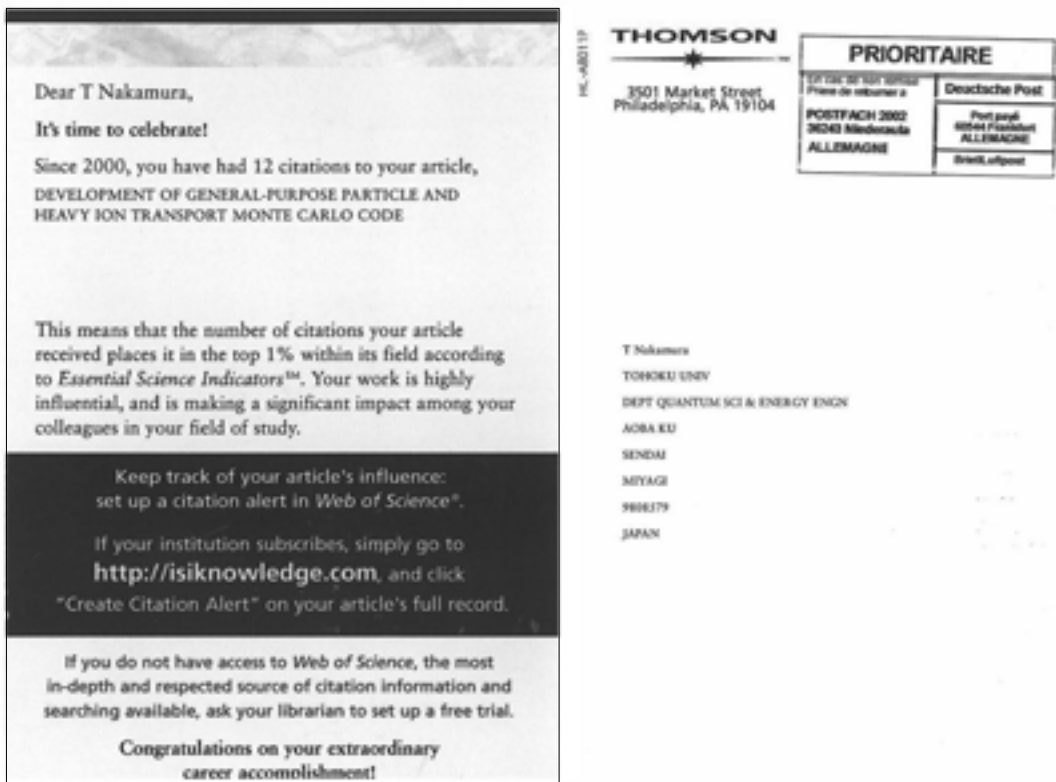


図2 Thomson社から届いた手紙

した<sup>[5]</sup>。このコードはハドロンから重イオンまでの輸送計算が出来る世界初のモンテカルロコードとして、日本から初めて発信した高エネルギー輸送計算コードであり、現在、MCNPX、FLUKA、MARSなどと並んで、世界中に広く知られる有名なコードとなっている。この成果により、平成16年3月(2004年)に仁井田、岩瀬両氏が原子力学会論文賞を受賞している。なお、PHITSコードの論文<sup>[5]</sup>は2002年11月に学会の英文誌JNSTに公表されたが、それから1年ほど経ったと思われる頃に、論文引用頻度を調べていることで良く知られているTHOMSON社から、この論文がEssential Science Indicatorsによれば、当該分野で引用数がtop 1%以内に入っていることについてのCongratulation letterが届いたことを付記しておきたい(図2)。

PHITSコード開発当時は、meVの熱領域の中性子から数100GeVのハドロン、光子、電子、そして重イオン(原子核)の物質中での核反応と輸送を扱える3次元モンテカルロコードとしては、PHITSが世界で唯一のものであったため、J-PARCの施設だけでなく世界各国の幅広い施設で利用された。特に当時計画されていた重イオンを用いた次期加速器実験計画、ドイツGSI(ドイツ重イオン研究所)のFAIR計画の中のSuper-FRS、アメリカのミシガン州立大学のFRIB計画、そして理化学研究所のRI Beam Factory計画、で利用された。また、重イオンの輸送が取り扱えるということから、炭素線がん治療施設などの医療分野、航空宇宙分野などでも利用されて、PHITSは急激に普及した。現在では更に広い分野の領域で利用され、国内のPHITSコード登録ユーザー数は3,000名を超えている。

## 参考文献

- [1] P. Cloth, D. Filges, G. Sterzenbach, Juel-Spez 196, KFA-Juelich, (1983).
- [2] 中村尚司著「放射線物理と加速器安全の工学」第2版 第8-1章、345頁、地人書館(2001)
- [3] T. Kato and T. Nakamura, Estimation of neutron yields from thick targets by high energy 4He ions for the design of shielding for a heavy ion medical accelerator, Nucl. Instrum. Methods, A 311, 548 (1992).
- [4] T. Kato, T. Nakamura and Y. Sato, Shielding Design of High Energy Heavy Ion Medical Accelerator, Proceedings of 7th International Conference on Radiation Shielding, Bournemouth, Vol. III, 893-902, UK, 12-16 September 1988.
- [5] H. Iwase, K. Niita, T. Nakamura, Development of General-Purpose Particle and Heavy-Ion Transport Monte Carlo Code, J. Nucl. Sci. Technol., 39, 1142-1151 (2002).
- [6] H. W. Bertini, T. A. Gabriel, T.T. Santoro, et al., ORNL-TM-4134, Oak Ridge National Laboratory, (1974).
- [7] N. Yoshizawa, K. Ishibashi, H. Takada, J. Nucl. Sci. Technol., 32, 601 (1995).
- [8] H. Iwase, T. Kurosawa, T. Nakamura, N. Yoshizawa, J. Funabiki, J. Nucl. Sci. Technol., Suppl. 1, 135-141 (2000); ibid. Nucl. Instrum. Methods, B 183, 374 (2001).
- [9] K. Niita, S. Chiba, T. Maruyama, H. Takada, T. Fukahori, Y. Nakahara, A. Iwamoto, Phys. Rev., C 52, 2620 (1995).
- [10] K. Niita, H. Takada, S. Meigo, Y. Ikeda, Nucl. Instrum. Methods, B 184, 406 (2001); ibid. JAERI-Data/Code, 2001-007, Japan Atomic Energy Research Institute (2001).

## 著者プロフィール

1962年3月 京都大学工学部原子核工学科卒業  
 1964年9月 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻修士修了  
 1964年10月 京都大学工学部助手  
 1970年5月 工学博士(京都大学)  
 1973年4月-1974年3月 スエーデン王国原子力研究所客員研究員  
 1975年3月 東京大学原子核研究所助教授  
 1986年7月 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター教授  
 1987年4月-1990年3月 文部省宇宙科学研究所併任教授  
 1999年10月 東北大学大学院工学研究科教授  
 2003年3月 東北大学を定年退職  
 2003年4月 東北大学名誉教授、サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター研究教授  
 現在に至る  
 2007年2月-2011年2月 文部科学省 放射線審議会会長および基本部会部会長  
 2014年12月から原子力規制庁放射線規制室技術参与



## 中川 恵一

東京大学医学部附属病院

昨年の10月末に、「がんの時代」（海竜社）という本を出版しましたが、その二か月後に、膀胱がんの「内視鏡切除」を受けました。「自己エコー検査」で、自分で見つけました。

下半身の麻酔でしたから、電気メスによる切除の様子もモニターで見ることができました。幸い、40分という短時間で完全に取りきれました。

日本人男性の3人に2人が、がんになる時代ですから、「がんになることを前提にした人生設計が必要」などと発言してきました。しかし、正直、まさか自分が罹患するとは思っていませんでしたから、滑稽な話です。

がんは臓器のもっとも表面の上皮から発生して、外側に向かって広がっていきます。私の場合、「表在性がん」でしたから、内視鏡切除が可能でした。

自分で超音波検査を行って無症状の膀胱がんを早期に見つけたのは、正直、「医者役得」であり、一般化はできません。しかし、結果的には、12月の27日に入院して、翌日の朝に手術

を受け、4泊の入院で大晦日に退院できました。

27日は午前、午後とも外来診察をして、29日からは自分の部屋で雑務もこなしましたから、「治療と仕事の両立」を文字通り、行いました。もちろん、正月明けからはふつうに仕事をしています。

しかし、もし発見が遅れて、膀胱の筋肉の層にまでがん細胞が広がっていたとすると、全摘が必要となります。その場合、小腸の一部を切り取った上でお腹に人工膀胱を作る「回腸導管」が一般的になります。

がんは症状を出しにくい病気です。まして、早期では、ほとんどの場合、何も感じません。膀胱がんも同じですが、痛みを伴わない血尿が早期発見のサインとなります。しかし、私の場合、顕微鏡で分かるような血尿もありませんでした。脂肪肝のチェックのために自分で行っていたエコー検査で偶然に発見できたのは本当にラッキーでした。

ネット上では、私の福島支援と膀胱がんを結びつける声もあります（笑）が、もちろん、何の関係もありませんので、念のため。

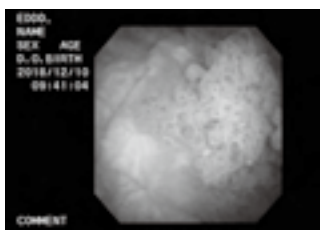
膀胱がんの「自己エコー検査」は別としても、乳がんのセルフチェックなどはだれでも簡単にできるはずですが、乳がんの発見にいたる契機の半分が自己触診というデータもあります。

しかし、ある調査によると、乳がん経験のない女性の79%が「セルフチェックで見つけられる病気」と認識しながら、実際に定期的なチェックを行っている人は7%にすぎませんでした。

日本人はもっと体を大切にするべきだと思います。私の経験が少しでもみなさんの参考になればと思っています。



2018/12/9の当直先の超音波装置で自分で見つけました！



12/28 経尿道的内視鏡切除

# 外部放射線被ばくの実用量に関する ICRU/ICRP共同報告

## ～第14回放射線モニタリングに係る国際ワークショップの パネルディスカッション～

Hannes Stadtmann\*

国際放射線単位測定委員会 (ICRU) 及び国際放射線防護委員会 (ICRP) は、公開協議を目的として2017年8月に**外部放射線被ばくの実用量に関する報告書案**を発表した。この報告書案において、その著者らは個人及び場所の線量測定の実用量に関する新しい概念を勧告している。この報告書案に関するコメントを3ヵ月以内に提出することが求められた。世界中の40以上の組織及び個人が、ICRPウェブページなどを介してコメントを提出した。その中には、肯定的な見解、新しい概念に対する批判的見解、及びこの報告書案における小さな誤りの指摘などが含まれていた。多くのコメントは以下の問題に対して懸念を示していた。

- 定義の基礎としての実効線量の安定性 ( $w_R$ 、 $w_T$ 、ファントム)
- 線質係数 Q (LET) の廃止
- サービス/ユーザーにとって高いコスト
- 正当性
- 換算係数の不確かさの評価がない
- その他の規格及び規制に対する多くの影響
- 高エネルギーに対する新しい線量値の低下 (約+14%まで)

前回の第13回放射線モニタリングに係る国際ワークショップのパネルディスカッション (大洗町、2017年12月) で、一部の発表者 (Francesco d'Errico博士、Hannes Stadtmann) はこの勧告された新しいアプローチの考えられる影響について既に指摘していた。今年のワークショップの組織委員会は、この話題を再び

検討して、ICRU/ICRP、教育機関及び科学者集団を代表して基調講演を行うスピーカー、並びにモニタリングサービス機関及び校正機関の担当者による専門パネルディスカッションを開催することを決定し、次の6名が招かれた。

Thomas Otto博士

(欧州原子核研究機構 (CERN)、スイス)

Jonathan Eakins博士

(イングランド公衆衛生局、英国)

黒澤 忠弘博士

(産業技術総合研究所、日本)

Francesco d'Errico博士

(ピサ大学、イタリア)

Pawel Marcin Olko博士

(ポーランド科学アカデミー核物理研究所、ポーランド)

Filip Vanhavere博士

(ベルギー原子力研究センター、ベルギー)

Hannes Stadtmann (Seibersdorf Labor、オーストリア) がこのパネルディスカッションの準備及び調整を行った。

セッションの初めに、コーディネーターは現在の線量に関する概要を簡潔に示した。この導入に続き、Thomas Otto博士 (ICRU/ICRP報告書案の主要共著者及びICRU報告委員会RC-26のメンバー) による基調講演が行われた。Thomas Otto博士は、勧告された実用量の新しい概念の詳細、並びに著者らが現在の定義の変更を勧告する理由について説明した。その後、他の5名のパネリストが提案された変更に関するそれぞれの見解について

\* Seibersdorf Labor GmbH 放射線防護・線量測定ビジネスユニット長

語った。

ワークショップに先立ち、すべてのスピーカーはICRU/ICRP報告書案の新しい改訂版(未発表)を受け取っていた。この改訂版の文章は遙かに明確であるが、基本概念は変更されていない。

最初の導入プレゼンテーションにおいて、コーディネーターのHannes Stadtmannは放射線防護で使用されている線量の現在の定義に関する概要を簡潔に述べた。即ち、放射線防護に対して勧告された現在使用されている線量のすべては、ICRUによって定義された**基本的な物理量**に基づいている。1990年、ICRP60は現在適用されている**等価線量**及び**実効線量**の概念を導入した。これらの定義において放射線荷重係数及び組織荷重係数が重要な役割を果たしている。2007年、ICRP103報告書により一部の荷重係数が変更された。等価線量及び実効線量(防護量と呼ばれる)は、現在ほぼ世界中で法定線量限度を構成している。残念なことに、これらの線量の両方とも直接測定できない。ICRUは、1985年(ICRU39)に個人及び場所のモニタリングに対して測定可

能な適切な実用量を既に定義しており、これらは依然として国際的に推奨されている。ほとんどのモニタリング装置はこれらの実用量に基づいて設計されている。

多くの場合、これらの実用量は防護量を控えめに推定する。基本的な物理量、防護量及び実用量の間の関係は、それらの間で算出されたICRU/ICRP報告書及びISO規格による換算係数によって表される。これらの関係並びに対応する報告書を以下の図に示す。



Hannes Stadtmann(筆者)

2つ目のプレゼンテーション(基調講演)では、新しい報告書案の共著者であるThomas Otto博士がICRU報告委員会26を代表して提案された実用量の新しい概念の詳細及び現在のシステムとの比較について説明した。現在の線量に関する概念の単純化及び度量衡の改善が強調された。現在の実用量は数MeVを

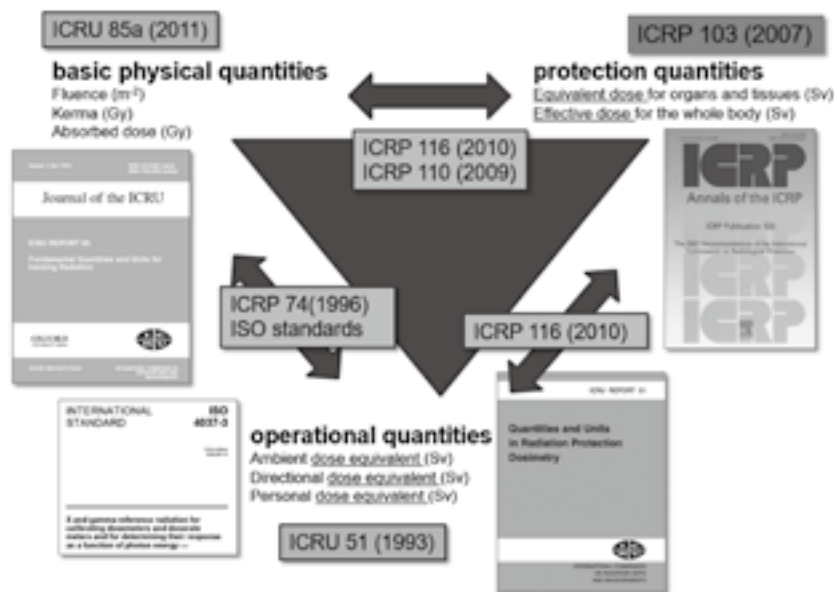


図1 放射線防護において現在使用されている線量及び関連するICRU/ICRP報告書及びISO規格による換算係数



超える高エネルギーの放射線照射場に十分に適合していない。報告書案において以下の新しい線量が提案された。

- 場所のモニタリングに対して：
  - 周辺線量 [ $H^*$  (Sv)]
  - 眼の水晶体の方向性吸収線量 [ $D'_{\text{lens}}$  (Gy)]
  - 局所皮膚の方向性吸収線量 [ $D'_{\text{local skin}}$  (Gy)]
- 個人のモニタリングに対して
  - 個人線量 [ $H_p$  (Sv)]
  - 眼の水晶体の個人吸収線量 [ $D_{p \text{ lens}}$  (Gy)]
  - 局所皮膚の個人吸収線量 [ $D_{p \text{ local skin}}$  (Gy)]

提案された新しい線量は現在の実効線量の定義（ICRP110の人体を模擬したファントムを用いる）又は臓器吸収線量の定義（新たに定義されたファントム）に直接関連があるため、これらは防護量のより優れた直接推定値をもたらす。新しい実用量は、通常、フルエンス（又は光子の空気カーマ）と換算係数（一覧として公表されている）の積として定義される。粒子の拡張範囲及びエネルギーの範囲（数keV～

50 MeV、場合によっては200 GeVまで）に対してこれらの数値が利用可能である。

皮膚及び眼の水晶体の線量に対して新しいファントムが勧告されている。今後これらの線量を測定し、等価線量 (Sv) ではなく吸収線量 (Gy) で

対応する限度を示すことが提案されている。この新しい提案された線量の結果として、今後、個人及び場所のモニタリングに対する線量計の再校正あるいは再設計が必要になると考えられる。

「エリアサーベイ機器及び個人線量計の応答特性に及ぼす提案されたICRU線量の影響」と題される3つ目のプレゼンテーションにおいて、Jonathan Eakins博士は新しい報告書案で示された線量が及ぼすと考えられる既存の線量計への影響に注目した。彼は図を用いて、旧実用量と新実用量の両方について、これらの線量計のエネルギー応答を比較した。



Thomas Otto博士

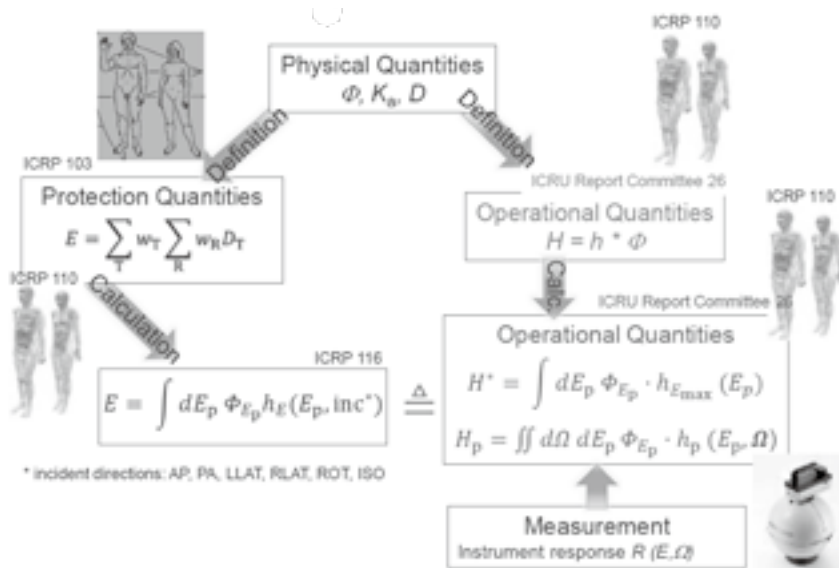


図2 提案された実効線量Eを推定する放射線防護量。実効線量と新しい実用量の間でさらなる換算係数を必要としない。



Jonathan Eakins博士

4つの中性子エリア線量計について、彼は一般にエネルギー応答は低エネルギー中性子(10 keV未満)でよりフラットになることを示した。しかし、この効果が検討した機器のすべての全体的なエネルギー応答を改善するというわけではない。しかし再校正によって、エネルギー応答を改善させることができる。Eakins博士は、基本的な再設計をどのように行うことができるかに関する提案も示した。

トラック検出器に基づくイングランド公衆衛生局(PHE)の中性子個人線量計について、低エネルギー応答に対して再設計(フィルタの変更)が必要になると考えられる。しかし、これらの線量計にとって、拡張された高エネルギー範囲(現在、20 MeV超)は解決不能な問題になっていく可能性がある。

PHEの光子用個人線量計の調査結果も非常に類似している。ここでも低エネルギー光子に対する応答を減少させるために線量計のフィルタの変更が必要になると考えられる。電子については、個人線量を正しく測定するためにさらなる検出素子又はさらなる線量アルゴリズムが必要になる可能性がある。Eakins博士は、全体としてすべての検討した線量測定システムを適応させる必要があると結論付けた。線量計の再校正及びやがて再設定の両方が必要となる。さらに彼はこれらの求められる変更の財政的な意味について慎重に考慮されるべきであると述べた。

「新しい実用量に対する標準及び校正」と題する4つ目のプレゼンテーションにおいて、黒澤忠弘博士は、新しく提案された実用量に関して、線量標準機関は線量計を校正するための新しい手順をどのように設定するべきかについて語った。

現在の校正手順は自由空気中の空気カーマ

基準又はフルエンス値に基づくことが多いため、個人線量( $H_p$ )に対する新しい線量の導入は、新しい換算係数に対する数学的調整のみを必要とする。「カーマ近似」を用いて算出される公表された換算係数を適用する必要がある。この場合、検出器の前でビルドアッププレートを使用しなければならない(現在これは、高エネルギー光子に対して既に実行されている)。現在使用されている水/PMMA校正用ファントムのすべては依然として適切であるため、個人線量計に対してさらなる校正手順を行う必要はない。

しかし、 $\beta$ 線による校正に関して、局所皮膚の線量及び眼の水晶体の線量の定義には新しいファントムが含まれることになるため、追加の換算係数が必要となる。

「中性子エリア線量計及び個人線量計の応答に及ぼすと予測される提案されたICRU-ICRP外部放射線被ばくに対する実用量の影響」と題する5つ目のプレゼンテーションにおいて、Francesco d'Errico博士は中性子線量計のエネルギー応答の変化に注目した。

Francesco d'Errico博士は、新たに勧告されたフルエンス応答曲線を科学文献から入手した線量計応答データ(IAEAの「Compendium



黒澤忠弘博士

of Neutron Spectra and Detector Responses for adiation Protection Purposes)を含む)と比較した。

以下の異なるタイプの中性子線量計の応答データを分析して検討した。



Francesco d'Errico博士

・中性子エリア/



サーベイメータ

- アクティブ型個人線量計
- パッシブ型個人線量計
  - TL アルベド線量計
  - パッシブ型トラック線量計
  - 過熱液滴型 (バブル) 線量計

この分析は、現在の校正を用いた場合、ほとんどの中性子エリアモニターはオーバーレスポンス (10 keV超～2 MeVの中性子) につながる可能性があるが、一部は熱/熱外中性子へのオーバーレスポンスにもつながる可能性があることを明らかにした。一方、新しい勧告を用いた場合、アクティブ型及びパッシブ型個人線量計は、一般に10 keV超～2 MeVの中性子に対してより正確であるが、ほとんどは熱/熱外中性子に対してオーバーレスポンスである可能性がある。

「提案された新しいICRP/ICRUの実用量を考慮した場合の個人線量計及び環境線量計の光子エネルギー応答」と題する6つ目のプレゼンテーションにおいて、Pawel Marcin Olko博士は個人線量計の角度及びエネルギー応答特性に再び注目した。彼は、新しい線量を正確に測定するために、 $H_p(10)$ 、 $H_p(3)$  及び  $H_p(0.07)$  に対して設計された現在の線量計の応答特性における必要な変更について語った。特に個人線量に対する低エネルギー光子、並びに眼の水晶体及び皮膚の個人吸収線量に対する高エネルギー光子について顕著な変更 (5以上のファクタ) が必要である。

彼は、異なるTL材料 (LiF : Mg, Ti及びLiF : Mg Cu, P) 及びBeOのOSLシグナルに対して考えられる変更について語った。Olko博士は、提案された変更は、将来、個人線量計の製造 (主に低エネルギー光子) に影響を及ぼすと結論付けた。TL検出器について、低



Pawel Marcin Olko博士

エネルギー光子に対するシグナルを減少させるために追加のフィルタが必要となる。異なるTL材料には異なるフィルタを適用する必要がある。多数の素子から構成される線量計については、線量計算アルゴリズムの変更だけで十分と考えられる。しかし長期的に見て、2つの素子による線量計は修正を必要とする。



Filip Vanhavere博士

「提案された新しい実用量の影響に関するEURADOSの見解のまとめ」と題する最後のプレゼンテーションにおいて、欧州線量測定グループ (EURADOS) の副議長であるFilip Vanhavere博士は、新たに草案された実用量に関するEURADOSのコメントを要約した。EURADOS (欧州の70以上の機関及び560名以上の科学者のネットワーク) は、内外の線量測定、放射線防護及び放射線治療、相互比較試験、トレーニングなど、さまざまな異なる線量測定のトピックス及び活動をカバーしている多くの異なるワーキンググループで構成されている。したがって、彼のプレゼンテーションでは多くの異なる見解が紹介された。以下の影響が示された。

- 線量計の設計及び機器の校正に及ぼす影響
  - 主に個人モニタリングサービスに対する大きな影響
- 規制に及ぼす影響
  - 法的規制の変更が必要である
- 線量推定に及ぼす影響
  - 大抵の場合はより優れた推定を行うことができるが、混合又は模擬作業場にとって問題である
- 放射線防護の訓練に及ぼす影響
  - 結果 (新しい概念、線量減少、その他) を理解するためのトレーニングが必要である
- 標準及び参照場に及ぼす影響



- ごくわずかな変更が必要である
- 経済的影響
  - 線量計の再設計を要するため、経済的影響が大きい
  - 費用便益分析を行う必要がある

EURADOSのその他のコメントについても話し合われたが、この限られたスペースではより詳細な内容を伝えることはできない。EUDODOSは、新しい実用量の影響に関する報告を作成するタスクグループを間もなく設立する予定である。

パネルメンバーによる上記のプレゼンテーションに続き、パネリストと聴衆の間で活発かつ興味深いQ&Aセッションが行われた(以下のトピックスを含む)。

- 実用量の基礎を形成するために、防護量(臓器に対する実効線量及び等価線量)の定義はどれくらい安定しているか?
- IEC及びISO規格は、現在の実用量に関して線量計の最小限の仕様要件を定めている。これらすべての規格を適応させる必要があるか? その要件は同じままであるか? それを適応させるのにどれくらいの時間がかかるか?
- エリア及び個人の線量計を再設計する必要があるか、又は再校正とその後の調整で十分か?
- 線量計に対する新たな型式試験を必要とするか?
- 既存の新しい報告書案を最終的なICRU/ICRP報告書の形にさせるための次のステップは何か?

話し合いを要約すると、今後、考えられる

実効線量の小さな変更が実用量に影響を及ぼすことはない結論付けられた。そのため、システムの安定性をより高める目的で、多数の換算係数が新しい定義とともに発表される予定である。

新しい実用量は、広域なエネルギー範囲にわたってより優れたリスク推定を可能にする。これは、将来のより信頼できる疫学的研究にも結び付くと予想される。しかし、直接的な健康への影響を低下させることが新しい報告書案の動機ではない。

実用量に関する多くの現行のIEC、ISO及び国家規格は修正される必要がある。国際規格に対して定期的に適用されるメンテナンスサイクル(数年)を考慮した場合、この手順は10年以内に終わると考えられる。国内外の法的規制に求められる変更はより長期間を要する可能性がある。10~20年と考えられる。

多数の線量計が再設計を必要とし、型式試験を行う必要があると結論付けられた。これらのコストを正当化することに関してコンセンサスは得られなかった。

現在のところ、この提案は改訂された形でICRU及びICRPの主要委員会による審査を受けている最中である。この報告書の受理(2019年4月に決定されるはずである)及び発行の後、発効に先立ち、この勧告は国際原子力機関(IAEA)や、欧州のEU基本安全基準(BSS)版を通じて、国内の法的規制機関、及び国内外の標準委員会の全体に行き渡らなければならない。

コーディネーターは、主催者及びすべての参加者の貢献に対して感謝を表した。

放射線安全技術講習会 **－ 受験対策の決定版！ 優れた講師陣！！－**

**第62回放射線取扱主任者試験受験対策セミナー・開催のお知らせ**

1. 期 日 第一種コース 2019年6月10日(月)～6月15日(土)の6日間  
第二種コース 2019年6月24日(月)～6月28日(金)の5日間
2. 会 場 東京都文京区湯島2-31-15 和光湯島ビル4階  
公益社団法人日本保安用品協会
3. 受講対象者 第一種又は第二種放射線取扱主任者の国家試験受験を予定している方

4. 定員及び  
受講料

定 員	受講料 (消費税別)
第一種コース 50名	55,000円
第二種コース 50名	45,000円

5. 申込締め切り 各コースともに定員になり次第締め切りとさせていただきます。尚、第一種コースは2019年5月31日、第二種コースは2019年6月14日まで受け付けます。
6. 講習会主催者 公益社団法人日本保安用品協会  
及び申込先 放射線取扱主任者試験受験対策セミナー事務局  
〒113-0034 東京都文京区湯島2-31-15 和光湯島ビル5階  
TEL 03-5804-3125 FAX 03-5804-3126 担当 福田/栗原  
e-mail : r-seminar@jsaa.or.jp URL : <http://www.jsaa.or.jp>
7. 申込用紙の  
入手方法 申込書は主催者ホームページよりダウンロード若しくは、メール、電話等による請求にて入手可能です。
8. 申込方法 郵送またはFAXにてお申し込みを受け付けます。メール、電話等による申し込みの受付はいたしません。
9. その他 お支払を確認後、「受講券」をお送りします。なお、受講料のお支払いは銀行振込でお願いいたします。

## 「2019国際医用画像総合展出展」のご案内

画像診断学・放射線腫瘍学・核医学を問わず放射線医学の全ての分野における、国内最大級のイベント、日本放射線技術学会・日本医学物理学会・日本医学放射線学会の学術大会が横浜で開催されます。弊社は今年も併設する「国際医用画像総合展 (ITEM2019)」に出展いたします。お馴染みの製品をはじめ、新商品のご紹介もいたします。

日頃ご愛顧を賜っているお客様にお会いできることをスタッフ一同、心待ちにしております。お客様のお役に立てる製品の展示をいたしますので、学会へお出かけの際はぜひお立ち寄りください。

### \*展示予定商品\*

- ①高線量率密封小線源治療装置用「アプリケーションタ」
- ②ガラス線量計小型素子システム「Dose Ace」
- ③個人放射線被ばく線量測定サービス「ガラスバッジ」
- ④眼の水晶体の線量測定用線量計「DOSIRIS」
- ⑤放射線業務従事者個人管理システム「ACEGEAR NEO」

展示品内容は変更する場合がございます。

### \*開催日時及び会場\*

2019年4月12日(金) 10:00~17:00

2019年4月13日(土) 9:30~17:00

2019年4月14日(日) 9:30~15:00

パシフィコ横浜展示ホール：ブースNo.D026

### \*学術大会\*

会期：2019年4月11日(木)~14日(日)

第78回日本医学放射線学会総会

第75回日本放射線技術学会総会学術大会

第117回日本医学物理学会学術大会

(担当：営業企画本部 金澤恵梨子)

## 「個人線量測定サービス規約」の名称を変更いたしました

このたび、ガラスバッジ等のお申込・ご契約上の規約の名称を下記のとおり変更いたしました。なお、条文内容の変更はございません。

表題および条文中の用語を変更させていただきました。

旧：個人線量測定サービス → 新：個人放射線被ばく線量測定サービス

詳しくは弊社ホームページ「お知らせ」に掲載しております。

〔千代田テクノルホームページアドレス〕 <http://www.c-technol.co.jp/>

サービス部門からのお願い

## 4月1日はガラスバッジ、ガラスリングの交換日です。

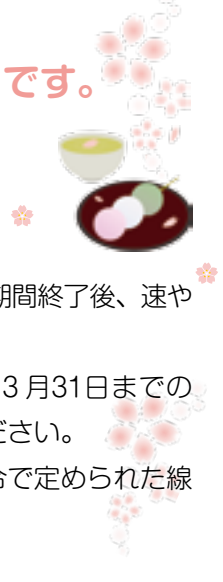
平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださりまして、誠にありがとうございます。

4月1日はガラスバッジ、ガラスリングの交換日です。

ご使用期間が3月31日までのガラスバッジ・ガラスリングは、ご使用期間終了後、速やかに弊社測定センターまでご返送くださいますようお願いいたします。

平成30年度の個人線量の集計は、平成30年4月1日から平成31年3月31日までのご使用分が対象です。ご使用になったガラスバッジをすべてご返却ください。

法定管理帳票として「個人線量管理票」を出力いたします。関係法令で定められた線量限度を超えていないことをご確認ください。



## 編集後記

- 4月号に掲載されている3つの話題と1つのコラムについて順次感じたことを書き留める。
- 「非侵襲医療に向けた革新的アイソトープ製造法」では、健康長寿命社会に向けて核医学医療が更なる貢献をするための医療用RIに関する課題とその解決に向けた研究開発の現状が述べられており、放射性医薬品開発のカギとなる多様なRIの開発が喫緊の課題であると指摘している。
- 「PHITS計算コードの開発秘話」では、meVの熱領域の中性子から数100GeVのハドロン、光子、電子、重イオンの物質中での核反応と輸送を扱える3次元モンテカルロコードとして日本から世界に発信されたコードの開発史が述べられている。海外から輸入される計算コードの利用制限が問題になりつつある現代において、世界を先導する計算コード開発の重要性を実感させるものであった。
- 「外部放射線被ばくの実用量に関するICRU/

ICRP共同報告」は、昨年12月に茨城県大洗町で開催された“第14回放射線モニタリングに係る国際ワークショップ”のパネルディスカッション結果をまとめたものである。このパネルディスカッションでは、国際放射線単位測定委員会 (ICRU) と国際放射線防護委員会 (ICRP) がまとめた「外部放射線被ばくの実用量に関する報告書」について、コーディネータ1名とパネリスト6名によって討論が進められ、新提案の線量により、個人及び環境モニタリングに対する線量計の再構成や再設計が必要になること等が指摘された。

- コラムでは、中川先生が、昨年末に自らの体で起こった、がん発見から手術までの体験談が述べられている。先生の場合はセルフチェックによる早期発見であったため、40分の手術で完了したとのこと、定期的なチェックが重要であり、早期発見・治療が大切であることが再確認できた。(河村 弘)

## FBNews No.508

発行日/平成31年4月1日

発行人/山口和彦

編集委員/今井盟 新田浩 中村尚司 金子正人 加藤和明 青山伸 河村弘

谷口和史 岩井淳 片桐和真 小口靖弘 高橋英典 和田卓久

発行所/株式会社千代田テクノ

所在地/〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話/03-3816-5210 FAX/03-5803-4890

<http://www.c-technol.co.jp/>

印刷/株式会社テクノサポートシステム

—禁断転載— 定価400円(本体371円)