



Photo Yasuhiro Kirano

## Index

放射線診療（業務）従事者指定に関するガイドライン	
－ 看護職者 － ……………堀田 昇吾、草間 朋子	1
不均等被ばく時における線量計の装着方法……………	3
<sup>99</sup> Moの準国産化に向けた取り組み	
河村 弘、太田 朗生、棚瀬 正和、斎藤 隆、 穂苅 宏、金澤 秀隆……………	6
[コラム] 20th Column	
【コロナとがん】……………中川 恵一	11
図説 量子ビーム・放射線利用	
－ 第8回 何を今さらLET－ ……………岡田 漱平	12
ご使用期間中にガラスバッジが破損した場合の取り扱いについて…………	17
令和2年度放射線安全取扱部会年次大会	
（第61回放射線管理研修会）開催中止のご連絡……………	18
[サービス部門からのお願い]	
測定依頼票のご記入のお願い……………	19

# 放射線診療(業務)従事者指定に関するガイドライン

## － 看護職者 －

堀田 昇吾\*、草間 朋子\*

### はじめに

我が国では、「放射線診療(業務)従事者」は、法令上(医療法、RI規制法、電離則等)は「管理区域に立ち入る者」と定義され、個人モニタによる線量評価、教育・訓練、健康診断の実施等が義務付けられているが、医療領域では、看護職者を含む医療スタッフを法令上の「放射線診療従事者」として、放射線管理の対象にするか否かは、各医療施設の判断に任されており、判断基準は一様ではない。そこで、日本放射線看護学会は、看護職者の放射線診療従事者としての選定基準を全国的に統一し、線量評価、教育・訓練、健康診断を確実に実施し、放射線管理を徹底していくことが必要であると考へ、2020年3月、「放射線診療(業務)従事者の指定に関するガイドライン－看護職者－」([http://www.rnsj.jp/wp-content/uploads/RNS\\_guidelines.pdf](http://www.rnsj.jp/wp-content/uploads/RNS_guidelines.pdf))を提案した。本ガイドラインは、日本看護協会、日本医師会、日本診療放射線技師会の賛同を得ている。

### ガイドラインの作成手順

医療従事者や放射線防護等の専門家からなる研究班を構成し作成にあたった。また、医療施設の放射線管理者(診療放射線技師長)や原子力関連施設の被ばく線量管理担当者を対象にインタビューと質問紙調査を行い、ガ

イドラインの有用性、運用にあたっての留意点などの意見を聴取し、現場で活用できるガイドラインの作成を目指した。

### 放射線診療(業務)従事者としての指定のための看護職者の区分

管理区域への立ち入りの程度、すなわち予測被ばく線量を考慮して、看護職者を表に示すA(放射線診療従事者)、B(一時的な管理区域立ち入り者)、C(一般看護師)の3区分とする。

A区分：予測被ばく線量が $500\mu\text{Sv}/\text{月}$ を超える可能性がある看護職者。これは、女性作業員に対する線量限度( $5\text{mSv}/3\text{月}$ )と、国際放射線防護委員会(以下ICRP)の1977年勧告<sup>1)</sup>を参考に決定した。1977年勧告では、年間の被ばく線量が線量限度の $3/10$ を超えるおそれのある作業員は、線量モニタリングすべきであるとされており、医療現場での実用性を考慮し、この考え方を採用した。

B区分：予測被ばく線量がA区分とC区分の間にある看護職者。

C区分：ICRPが公衆被ばくの線量限度としている $1\text{mSv}/\text{年}$ を参考に、 $80\mu\text{Sv}/\text{月}$ を超える可能性がない看護職者。

### 具体的な分類方法

看護職者を所属によりIとII群に分類する。

\* Shogo HORITA 東京医療保健大学 東が丘・立川看護学部 看護学科 講師  
\* Tomoko KUSAMA 東京医療保健大学 名誉教授

表 放射線診療(業務)従事者としての指定のための看護職者の区分

	放射線診療(業務)従事者としての指定のための看護職者の区分	予測被ばく線量
A区分	放射線診療(業務)従事者として指定し、被ばく線量評価、教育・訓練、電離放射線健康診断を義務付ける	500 $\mu$ Sv/月を超える恐れがある看護職者
B区分	「一時立ち入り者」とし、管理区域への立ち入りの都度、被ばく線量を測定・記録し、記録結果を5年間保管する	80 $\mu$ Sv/月を超える恐れがあり、500 $\mu$ Sv/月を超える恐れがない看護職者
C区分	公衆被ばくの線量限度に達しない看護職者で防護・管理の対象としない (一般の看護職者として扱う)	80 $\mu$ Sv/月を超える恐れがない看護職者

放射線科・放射線部等、放射線診療を主たる業務内容としている部署および看護単位に所属する看護職者はI群とし、予測被ばく線量に拘らず、全てA区分(放射線診療従事者)とする。I群に該当しない看護職者はII群とし、放射線診療従事者としての指定のための看護職者の区分(A,B,C)に基づいて区分する。区分にあたっての予測被ばく線量は、放射線業務の内容すなわち放射線診療に従事する頻度や時間から判断する。予測被ばく線量を判断するための目安となる放射線診療行為の回数等を、先行研究のモダリティごとの1検査・治療での線量をもとに計算しガイドライン別表に例示した。例えば、CT撮影では撮影室内で看護職者が患者を介助する場合がある。先行研究<sup>2-4)</sup>の結果では、CT撮影の介助により85~605  $\mu$ Sv/回被ばくする可能性があるとされているので、最も高い605  $\mu$ Sv/回の値をもとに「1回/月以上の頻度で1ヶ月以上継続して、頭部の固定介助または上肢挙上介助、バギングなど、撮影中患者の介助を行う看護職者または、上記介助を2回/月以上行う看護職者」はA区分とする。

### A区分の看護職者の個人モニタの装着部位

医療現場では、核医学を除く放射線診療に従事する場合には防護衣を着用することが多い。防護衣を着用した場合には、看護職者の被ばくは不均等被ばくとなり、被ばく線量(実効線量)の測定・評価には個人モニタを

2ヶ所(頸部と防護衣の内側の腹部または胸部)に装着する必要がある。

紹介した日本放射線看護学会が提示したガイドラインを全国の医療施設において適用していただき看護職者の放射線管理の標準化が図られることを期待している。

本ガイドラインは、原子力規制庁 放射線安全規制研究推進事業 放射線安全規制研究の委託(主任研究者:草間朋子)を受けて作成した。

### 参考文献

- 1) ICRP. (1977). 国際放射線防護委員会勧告. (日本アイソトープ協会, 編) 日本 東京.
- 2) 宮島隆一ら. (2018). X線CT撮影の介助時における医療従事者被ばくの効果的な防護方法について. 日本放射線技術学会雑誌, 74 (4), 326-334.
- 3) Mori H, et al. (2014). Investigation of qualitative and quantitative factors related to radiological exposure to nursing staff during computed tomography examinations. Health Phys., 107, S202-210.
- 4) 富田博信ら(2004). OSL線量計を用いたMDCT 装置のCT室内散乱線分布の測定. 日本放射線技術学会誌, 60 (11), 1550-1554.

### 著者プロフィール



#### 堀田 昇吾

千葉県出身。看護師。  
国立看護大学校看護学部看護学科卒業  
国立看護大学校研究課程部看護学研究科修士  
東京医療保健大学看護学研究科博士課程修了

国立成育医療研究センター、東京医療保健大学東が丘・立川看護学部助手、助教を経て現職。  
日本放射線看護学会 広報・渉外委員、学術推進委員。  
現在は医療者の職業ばく管理についての研究や、看護学生・看護師への放射線教育の研究を主に行なっている。

# 不均等被ばく時における線量計の装着方法

## 線量計測技術課

### 1. はじめに

昨今、弊社へ放射線防護衣（以下、防護衣）を着用した不均等被ばく時における線量計の適切な装着位置・個数に関する問い合わせが増えており、その背景の一つには令和3年4月施行の放射線防護に関する法令改正<sup>※</sup>が挙げられます。この法令改正の主な内容は、「眼の水晶体の等価線量限度引き下げ」、「3mm線量当量による眼の水晶体の等価線量の算定も可能とすること」になりますが、法令改正の検討段階で現行法令に定められた適切な装着位置で線量測定がされていないという事例が報告されました。それを受け、厚生労働省労働基準局安全衛生部長および厚生労働省医政局地域医療計画課長より「放射線業務従事者等に対する線量測定等の徹底および眼の水晶体の被ばくに係る放射線障害防止対策の再周知について」の通知が令和元年11月1日および6日に発行されております。本通知には、「放射線測定器を適切な位置に装着しているか確認すること」と記載されていることから、今まで以上に法令に基づいた線量計の装着を求められることが予想されます。

線量計の装着方法については、電離放射線障害防止規則（労働安全衛生法）、医療法施行規則や獣医療法施行規則などに記載されています。本項では電離放射線障害防止規則（以下、電離則）を例に現行法令に基づく線量計の装着方法をご紹介しますので、貴所の被ばく状況に合わせた装着をご検討いただければ幸いです。

※法令改正についてはFBNews No.519号(2020.3)などにも記事を掲載しております。弊社ホームページのFBNewsバックナンバーをご参照ください。  
(<https://www.c-technol.co.jp/fbnews>)

### 2. 線量計の装着方法

線量計の装着位置と個数は、**図1**に示す身体区分において全身が均等に被ばくしているか否かで決まり、電離則では、以下のように記載されています。

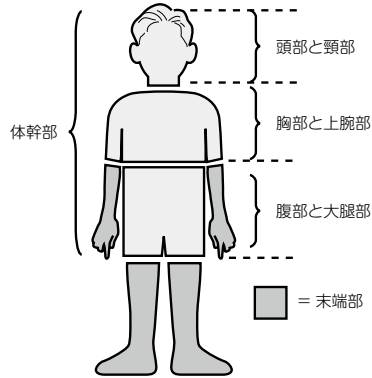


図1 身体区分

電離放射線障害防止規則 第八条 第三項 第一項の規定による外部被ばくによる線量の測定は、次の各号に掲げる部位に放射線測定器を装着させて行わなければならない。ただし、放射線測定器を用いてこれを測定することが著しく困難な場合には、放射線測定器によって測定した線量当量率を用いて算出し、これが著しく困難な場合には、計算によってその値を求めることができる。



- 一 男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性にあっては胸部、その他の女性にあっては腹部
- 二 頭・頸部、胸・上腕部及び腹・大腿部のうち、最も多く放射線にさらされるおそれのある部位（これらの部位のうち最も多く放射線にさらされるおそれのある部位が男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性にあっては腹・大腿部である場合を除く。）
- 三 最も多く放射線にさらされるおそれのある部位が頭・頸部、胸・上腕部及び腹・大腿部以外の部位であるときは、当該最も多く放射線にさらされるおそれのある部位（中性子線の場合を除く。）

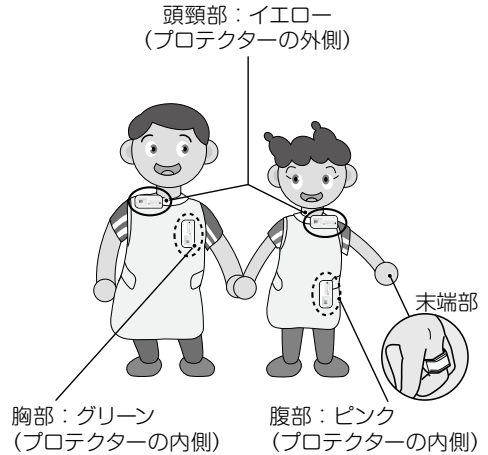


図3 不均等被ばく時の装着方法

状況は、頭・頸部を除く体幹部を覆う防護衣を着用しているときです。防護衣で守られていない頭・頸部は胸・上腕部および腹・大腿部に比べ被ばく線量が高くなるため、体幹部が不均等に被ばくしているといえます。そのため、線量計は防護衣の内側の基本部位の1個に加え、頭・頸部に近い位置（襟元など）かつ防護衣の外側に1個の計2個を装着する必要があります。（図3）

防護衣を着用していないときも頭・頸部と基本部位の線量計はそれぞれの部位の線量を測定している必要があるため2つの線量計を常に装着することになります。

電離則第八条第三項の第二号が上述した内容を指しています。

ii. 末端部不均等被ばく

末端部不均等被ばくは体幹部に比べ末端部の被ばくが大きくなる状況であり、患者の介助、透視を伴う手技、動物の保定などで手指にX線発生装置からの直接線が当たる可能性がある状況などが挙げられます。直接線による被ばくは短時間でも数mSvの被ばくを受けることもあり得るので、手指の皮膚の等価線量を測定するための末端部用線量計による測定が重要となります。弊社の末端部用線量計ガラスリング（図4）は指輪型のため指先に装着することが可能であり、エチレンオキ

①均等被ばくの場合（線量計を1個のみ装着）

体幹部を覆う防護衣を着用していない状況では、全身に放射線が均等に照射されていると考えます。その場合、基本部位（男性：胸部、女性：腹部）に1個の線量計を装着していれば十分となります。（図2）

電離則第八条第三項の第一号のみに該当する状況となります。

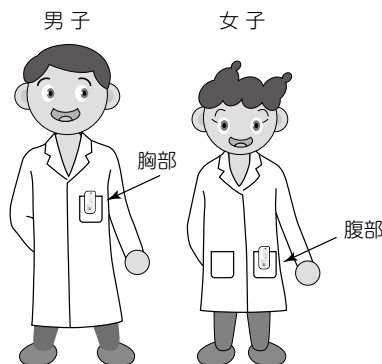


図2 均等被ばく時の装着方法

②不均等被ばくの場合（線量計を2個以上装着）

i. 体幹部不均等被ばく

体幹部不均等被ばくの最も代表的な被ばく



図4 末端部用線量計(ガラスリング)

サイドガス滅菌と過酸化水素プラズマ滅菌に対応しています。必要なときのみ装着するパートタイム方式（標準の登録はこちら）と常に装着するフルタイム方式のどちらかを選択して登録することができます。

電離則第八条第三項の第三号が前述した内容を指しています。なお、体幹部不均等被ばくかつ末端部不均等被ばくのときは、電離則第八条第三項第一号～三号に該当するため、基本部位、頭頸部、末端部の計3個の線量計が必要となります。

### 3. 実効線量・等価線量算定への影響

基本部位に頭・頸部の線量計を追加して2個の線量計から算定する場合、実効線量、眼の水晶体の等価線量、皮膚の等価線量に影響があります。まず、実効線量の算定は、体幹部の各部位の放射線に対する影響の割合を加味して頭・頸部の測定値には「0.11」、基本部位の測定値には「0.89」を乗じて足し合わせることで実効線量を求めます。

防護衣の外側の測定値1.0mSv、内側の測定値0.1mSvの場合の算定例 ・防護衣なし 基本部位のみで測定 $= 1.0\text{mSv}$ ・防護衣あり 基本部位のみ(防護衣内側)で測定 $= 0.1\text{mSv}$ ・防護衣あり 基本部位+頭・頸部で測定 $(0.11 \times 1.0\text{mSv}) + (0.89 \times 0.1\text{mSv})$ $= 0.2\text{mSv}$
--

次に眼の水晶体の等価線量では、より眼の水晶体に近い位置に装着している頭・頸部の測定値を使用します。最後に皮膚の等価線量ですが、基本部位と頭・頸部の測定値の大きい方を使用します。正しく線量計と防護衣を装着していれば防護衣の外側に装着している頭・頸部の測定値の方が防護衣の内側に装着している基本部位の測定値より大きくなるため、頭・頸部の測定値が使用されることが考えられます。

以上のことより、防護衣を着用しているにもかかわらず頭・頸部に線量計を装着していないと実効線量・等価線量共に過少に評価していることとなります。

末端部に線量計を追加する場合は、皮膚の等価線量のみ影響があります。必要なときのみ装着するパートタイム方式では、装着していない時間の測定値を基本部位の線量計の測定値で補完するため、末端部と基本部位の測定値を足し合わせ保守的に算定します。一方、フルタイム方式では常に線量計を装着しているため、末端部の測定値のみでも評価することが可能となり、基本部位の測定値と比較してどちらか大きい方で算定します。

実効線量・等価線量の算定方法は弊社ホームページで公開しているガラスバッジサービス取扱説明書（30頁目）でより詳細にまとめておりますので是非ご覧ください。

### 4. おわりに

本項では代表的な被ばく状況を例に線量計の装着方法を紹介させていただきました。貴所の状況と照らし合わせて線量計の追加のご要望やご不明な点があれば最寄りの営業所までご連絡いただければ幸いです。また、本年1月よりガラスバッジWebサービスをリニューアルしております。Webサービス上からもご使用線量計の追加は可能ですので、この機会に是非ご利用ください。

# 99Moの準国産化に向けた取り組み

河村 弘\*1、太田 朗生\*2、棚瀬 正和\*3、斎藤 隆\*4、穂苅 宏\*5、金澤 秀隆\*6

## 1. はじめに

近年、核医学診断技術、即ち微量の放射線を放出する薬（ラジオアイソトープ）を体内に投与し、特定の臓器や組織に集め、これを特殊なカメラで測定し、その分布を画像にして行う放射線検査技術の発展は目覚ましい。そのラジオアイソトープの中でも99Moを親核種とする99mTcは特別な存在である。

日本において、毎年約100万人のがん患者が発生しており、約100万件の99mTcを用いた放射線診断が行われている。これを見ても、がん診断のための99Moの必要性は明らかである。そのため、内閣府主催の99Moの安定供給のための官民検討会<sup>1)</sup>で協議され、アクションプランが2011年に定められた。しかしながら、日本国内において唯一99Moの安定供給が可能とされていた材料試験炉JMTRは廃止措置手続きに入っており、現在、日本において99Moの国産化ロードマップが不明瞭な状況にある。

一方、図1に示すように、世界の研究用原子炉（以降、研究炉と称す）の内、99Moを製造して

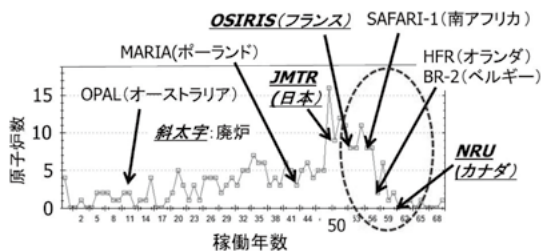


図1 世界の研究用原子炉の稼働状況

いる主要研究炉は50年以上稼働されており、老朽化等のために順次廃止されつつある。これにより、研究炉の新規建設が行われなければ、99Moの供給量も並行して減少していくことになる<sup>2)</sup>。

他方、アメリカでは、99Moの国産化計画が進められており、少なくとも2023年頃には、全世界の供給量の約50%を消費しているアメリカで99Moを輸入しなくてもよい状況になり、世界的需要の逼迫は緩和される。

これら2つの相反する状況変化を加味すると、「既存の99Mo製造用研究炉の更なる寿命延長」や「新たな99Mo製造用研究炉の新設」が行われなければ、99Mo供給量の経時変化は図2のようになる。最悪のシナリオかもしれないが、この図からも明らかのように、2024年以降、日本への99Moの安定供給に大きな懸念が生じることは容易に予想される。そのため、それまでの間にできることは、至急対応

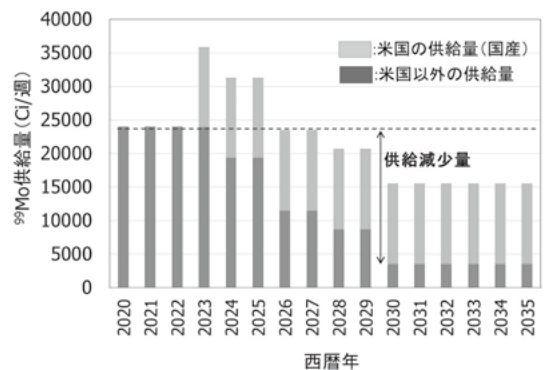


図2 世界の99Mo供給量経時変化予想

(既存の99Mo製造用研究炉の更なる寿命延長や新たな99Mo製造用研究炉の新設がない場合)

\*1 Hiroshi KAWAMURA 営業統括本部 特別参与  
 \*2 Akio OHTA 大洗研究所 研究開発課  
 \*3 Masakazu TANASE 大洗研究所 アドバイザー  
 \*4 Takashi SAITO 営業統括本部 アドバイザー  
 \*5 Hiroshi HOKARI 同上  
 \*6 Hidetaka KANAZAWA 営業統括本部 参事

する必要がある。

千代田テクノルは、ウランを用いない<sup>99</sup>Mo製造法、即ち、核不拡散性が高く、放射性廃棄物量が少ない(n,γ)法による<sup>99</sup>Mo製造に関する知見・経験を蓄積してきた。このような状況を踏まえ、上記の課題を解決するため、本技術を活用し、<sup>99</sup>Mo製造が可能な研究炉を有している海外の研究機関と協力して、優先的に日本へ<sup>99</sup>Moを供給する、「<sup>99</sup>Moの準国産化」の検討を開始することとした。具体的には、日本において約1,400Ci/週(6 dayCi)の<sup>99</sup>Moが用いられている。その10%(約140Ci/週(6 dayCi))以上を目標に、2023年頃までに海外から輸入できるか否かの検討を行う。なお、<sup>99</sup>Moの輸入形態は<sup>99</sup>Mo溶液とする。

加えて、<sup>99</sup>Moの確保は、がん対策基本法の基本的考え方に合致した、国民の健康に関するセキュリ

ティの問題であり、石油、医薬品等の備蓄・確保と同様に、国が担うべき責務であると思う。そのためにも、2024年を目標に、国による準国産化<sup>99</sup>Moの確保ができるように準備しておくことは重要である。

## 2. 準国産化に利用する研究炉の選定

まず、日本への優先的な製造を行ってもらうためには、諸外国の研究機関と友好関係を有していることが必要不可欠となる。そのため、準国産化のために使用する研究炉として我が社が強力な協力関係を有する諸外国(ポーランド、カザフスタン、ウズベキスタン及びインドネシア)の研究機関が運転・管理している研究炉を第1次候補とした(図3参照)。なお、候補研究炉の選定基準を表1に示す。4つの候補研究炉をネットワーク化させて

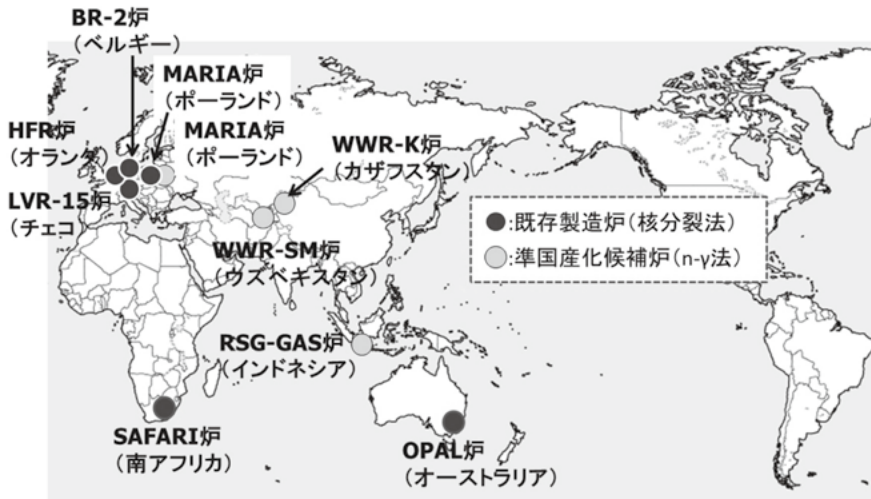


図3 <sup>99</sup>Mo製造実施中の研究炉と準国産化のための候補研究炉

表1 候補研究炉の選定基準

候補炉選定のための判定基準	MARIA炉	WWR-SM炉	WWR-K炉	RAS-GAS炉
熱中性子束密度が $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 以上	○	○	○	○
地元国際空港からの距離が短い	○	○	○	○
<sup>99</sup> Moの(n,γ)法による製造実績の有無	○	○	△*	○
国産 <sup>99</sup> Moの国内頒布実績の有無	×	○	○	○
年間稼働日数が210日以上	○	○	○	○
連続6日間運転が可能か	○	○	○	○
7月～8月の運転が可能か	○	×	×	×

(\*) JAEA及び千代田テクノルと個別に研究協力を開始中。



<sup>99</sup>Moを輸入することを考えており、例えば、年間に安定して輸入するため、研究炉点検時期の夏場に運転しているMARIA炉をメンバーに入れておくことは非常に重要となる。また、将来の<sup>99</sup>Mo国産化のために、知見・経験を蓄積するという観点から、日本においてこれまで行ってきた、ウランを用いず、<sup>98</sup>Moを中性子照射する(n,γ)法による<sup>99</sup>Moの製造実績を有しているか、或いは開発中であることも条件とした。特に、MARIA炉を除いた他の3基の研究炉は、(n,γ)法による<sup>99</sup>Moの国内等への製造・頒布の実績と経験を有している。MARIA炉では、JAEAと千代田テクノルが個別に(n,γ)法による<sup>99</sup>Mo製造に関する開発協力を開始

している。

また、候補研究炉の特徴を表2に示す。各炉の中性子束密度は $1 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>/s以上であり、年間稼働率も高い。加えて、全4基の候補研究炉は、炉運転用燃料の安定確保のために、同燃料が低濃縮燃料化(LEU化)されている。また、<sup>99</sup>Moの長期間製造を可能にするために必要な原子炉施設の寿命延長補強工事も実施済である。各候補研究炉は、近隣国際空港まで車で1~2時間程度の所にあり、陸送に有利な立地条件にある。加えて、WWR-K炉以外の炉は、近隣国際空港から成田空港に直行便が飛んでいる。

300gのMoO<sub>3</sub>を熱中性子束密度 $1 \times 10^{14}$ (n/cm<sup>2</sup>/s)

で6日間中性子照射し、各研究炉から近隣空港まですぐに陸送され、空港で待機預かりされることなく、すぐに成田空港まで空輸され、日本に到着した時の<sup>99</sup>Mo量を表3に示す。なお、近隣空港は、MARIA炉の場合はワルシャワ空港、WWR-K炉の場合はアルマティ空港(フランクフルト空港経由)、WWR-SM炉の場合はタシケント空港、RSG-RAS炉の場合はスハルノ・ハッタ空港である。また、各研究炉での実績から、照射直後から<sup>99</sup>Mo溶液を製造する

表2 候補研究炉の主な特徴

項目	原子炉	ポーランド	ウズベキスタン	カザフスタン	インドネシア
	MARIA炉	WWR-SM炉	WWR-K炉	RSG-GAS炉	
臨界年	1974	1978 (1959)	1967	1987	
原子炉出力* (MW)	18 (30)	6 (10)	6 (10)	15 (30)	
年間運転日数(日)	180	242	210	147	
年間運転サイクル数	36	11	10	21	
1サイクルの運転日数(日)	5~10	22	21	7	
MAX.熱中性子束密度 (n/cm <sup>2</sup> /s)	$2.5 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{14}$	$2 \times 10^{14}$	$2.5 \times 10^{14}$	
MAX.高速中性子束密度 (n/cm <sup>2</sup> /s)	$3 \times 10^{14}$	$1.5 \times 10^{14}$	$1.1 \times 10^{14}$	$2.3 \times 10^{14}$	
照射孔数	燃料領域	3	15	3	5
	反射体領域	35	28	4 (10)	9
LEU化	完了	完了	完了	完了	
寿命延長補強工事	完了	完了	完了	完了	

(\* ) 例えば、6(10)は、実際の運転出力が6MWで定格出力が10MWであることを示す。

表3 候補研究炉から成田空港までの<sup>99</sup>Mo量推移

候補研究炉	<sup>99</sup> Mo量(Ci)				備考*4
	照射直後*1	炉搬出時*2	現地空港*3	成田空港	
MARIA (ポーランド)	83	65	63	56	経験なし(開発中)
WWR-SM(ウズベキスタン)	同上	同上	64	58	経験あり
WWR-K(カザフスタン)	同上	同上	64	52	経験あり
RSG-GAS(インドネシア)	同上	同上	63	58	経験あり
準国産化製造量の合計	—	—	—	<b>220</b>	

(\*1) MoO<sub>3</sub>重量が300gで、中性子照射量が $1 \times 10^{14}$ (n/cm<sup>2</sup>/s)×6日間の場合。

(\*2) 照射直後から<sup>99</sup>Mo溶液を製造するまで1日間必要として評価。

(\*3) MARIA炉はワルシャワ空港、WWR-K炉はアルマティ空港(フランクフルト空港経由)、WWR-SM炉はタシケント空港、RSG-RAS炉はスハルノ・ハッタ空港から空輸するとした場合。

(\*4) 候補研究炉で照射されたMoO<sub>3</sub>から<sup>99</sup>Mo溶液を製造した経験の有無。

まで1日間必要として評価した。成田空港到着時の<sup>99</sup>Mo量評価に関しては、さらに航空会社との協議等により精査する必要はあるが、MoO<sub>3</sub>重量、<sup>98</sup>Mo濃縮度等を増やすことが可能であることを考えると、少なくとも国内使用量の10% (1406 dayCi/週) 程度の準国産化は十分可能性がある。なお、<sup>99</sup>Moの生成量評価では熱中性子との反応しか考慮しなかったが、実際は熱外中性子との反応により表3の値の1.5~2倍程度にはなると思われる。今後、照射物の形状等に基づいた全中性子スペクトルを考慮した詳細核計算を行う予定である。

### 3. <sup>99</sup>Mo製造プロセスの概要

#### (1) 全体の流れ

上記の試算から、それぞれの国で、MoO<sub>3</sub>300gを6日間照射して得られる<sup>99</sup>Moの量は83Ciである。成田空港では、空路の違いで52~58Ciとなっている。最も低い52Ciとして以下を記述する。成田空港から1日かけて<sup>99</sup>Moのプロセス施設に到着し、翌日、処理する。処理時の<sup>99</sup>Moは31Ciとなり、4つの原子炉を用いた場合には約120Ciが供給可能となる。加えて、熱外中性子での生成効果、濃縮<sup>98</sup>Moの使用、照射するMoO<sub>3</sub>の増量等を考えれば、2~3倍の供給は少なくとも可能と思われるので、目指すべき“140Ci(週当たりの使用量の10%)以上”は十分達成できると予測される。

天然Moであれ、濃縮<sup>98</sup>Moであれ、<sup>98</sup>Moの(n, γ)反応で生成して得た<sup>99</sup>Moは、比放射能が極めて低いため、我々は、低比放射能の<sup>99</sup>Mo溶液から高濃度の<sup>99m</sup>Tc溶液を得る方法を開発している。<sup>3, 4, 5)</sup>

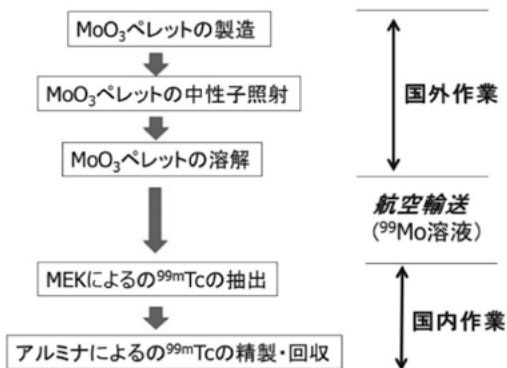
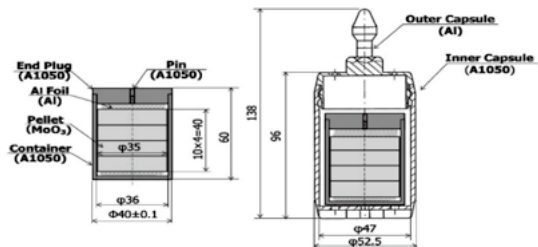


図4 <sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc製造に係る全体の流れ

この方法が開発されれば、最終的に各炉当たり約24Ci(回収率80%)の<sup>99m</sup>Tcを20mlの生理食塩水に回収できることになる。ここでは、ターゲットの中性子照射から、ターゲットの溶解、<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc溶液からのメチルエチルケトン(以降、MEKと称す)による<sup>99m</sup>Tcの溶媒抽出、アルミナによる精製・回収の全行程について概説する。<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tc製造に係る全体の流れを図4に示す。

#### (2) MoO<sub>3</sub>ペレットの中性子照射

MoO<sub>3</sub>はモリブデンの主要な鉱物である二硫化モリブデンの焙焼によって生産される。MoO<sub>3</sub>の融点及び密度は各々795℃及び4.69g/cm<sup>3</sup>である。Moの天然同位体は7種類あり、<sup>98</sup>Moの同位体存在比は最も高く、約24.4%である。MoO<sub>3</sub>は、粉末を焼き固めて円筒状物(ペレット)に成型してインナーキャプセルに密封し、さらにそれを照射キャプセルに入れて原子炉に装荷し、中性子照射する。WWR-K炉を用いた場合の照射キャプセル例を図5に示す。3章での<sup>99</sup>Mo量評価ではMoO<sub>3</sub>重量を300gとしたが、図5中のMoO<sub>3</sub>の重量は約150g(理論密度80%の場合)になる。MoO<sub>3</sub>の必要重量は、照射キャプセルの数量によって調整可能である。中性子照射後は、照射キャプセル及びインナーキャプセルを解体し、MoO<sub>3</sub>ペレットを取りだし、MoO<sub>3</sub>ペレットを溶かして次のプロセス“<sup>99</sup>Mo溶液の製造”に移る。



(a)インナーキャプセル (b)照射キャプセル  
図5 照射キャプセルの概要(WWR-K炉の場合)

#### (3) MoO<sub>3</sub>ペレットの溶解

照射済MoO<sub>3</sub>ペレットを6M-NaOH水溶液で溶解し、モリブデン酸ナトリウム(Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>)溶液にする。これを日本まで空輸してくることになる。

#### (4) <sup>99m</sup>Tcの抽出と<sup>99m</sup>Tcの精製・回収

ここでは、溶媒抽出法を利用した<sup>99</sup>Moと<sup>99m</sup>Tcの分離方法について紹介する。溶媒抽出法とは、

水や有機溶媒のように2つの混じることのない溶媒と物質の親水性・親油性の差を使って複数の混合物質から特定の物質を抽出する手法である。以下、プロセス全体の手順を概説する。なお、本工程に係る実用型試験製造装置を製作完了し、JAEA ホットラボ施設に設置しており、近々、最終実証試験をJAEAとともに進行。

#### ①<sup>99m</sup>Tcの溶媒抽出

Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>溶液にMEKを加え、<sup>99m</sup>Tcを抽出するために攪拌する。攪拌により、<sup>99m</sup>TcはMEKに移動する。攪拌後、水相と有機相が分離するまで5分間静置する。静置後、分離した有機相を自然落下と弁の開閉を用い、水相と分離して回収する。なお、<sup>99m</sup>Tcを取り出す作業（ミルクング）は、乳牛Cow（<sup>99</sup>Mo）からミルク（<sup>99m</sup>Tc）を絞り出すように何回も行うが、前の溶媒抽出で使用した水相のNa<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>溶液を用いる。一方、濃縮<sup>98</sup>Moを使用した場合は、<sup>99</sup>Moの放射量が十分に減衰した後、Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>から濃縮<sup>98</sup>Moを回収する化学処理を行い、MoO<sub>3</sub>ペレットとして再利用する。

#### ②アルミナカラムによる<sup>99m</sup>Tcの精製・回収

MEKには、<sup>99m</sup>Tcと<sup>99</sup>Moが含まれている。この<sup>99</sup>Moを除去するために、塩基性アルミナカラムに前工程で回収したMEKを通液する。このMEKは人体に有害であるため、最終製品からは除去する必要がある。そのため、<sup>99</sup>Mo除去後のMEKをさらに酸性アルミナカラムに通液し、<sup>99m</sup>Tcを吸着させた後、十分な超純水で同カラムを洗い、同カラムに若干付着しているMEKも除去する。その後、生理食塩水を通液し、カラムから過テクネチウム酸ナトリウム（Na<sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub>）の形で<sup>99m</sup>Tcを回収し、製薬会社から医療機関に提供される。

## 4. 今後の進め方

現在、国内での<sup>99</sup>Moの国産化に関して、原子炉と加速器を用いた検討が公式に個別提案されている。原子炉利用に関しては、2つのことが検討されている。1つは、もんじゅ跡地に新設される研究用原子炉の利用で、概念設計が2020年度から開始され、2022年度から詳細設計が行われる予定である<sup>6)</sup>。もう一つは、JMTR後継炉の利用で、2019年3月から利用ニーズ等の検討が開始された

が、10～20年の長期のリードタイムを要するといわれている<sup>7)</sup>。また、加速器利用に関しては、日本メジフィジックス社が、<sup>99m</sup>Tc製品の主原料となる<sup>99</sup>Moの自社生産を行うプロジェクトに着手したことを2019年3月29日にプレス発表し、「専用の電子線加速器を同社の千葉工場内に設置し、2023年からの生産を目指している。」ということを表明した<sup>8)</sup>。生産開始当初の必要量に対する自社生産の比率は20～30%程度の見込みと記されているので、日本の必要量の約20%程度を確保できる可能性がある。

これらの状況を踏まえ、国、研究機関、企業等が公式に表明している「原子炉や加速器を用いた国内の<sup>99</sup>Mo製造計画」を反映させた、国の「<sup>99</sup>Moの国産化に向けたマスタープラン」の構築は急務である。マスタープランの構築は、国民の安全・安心を確保するために、国内の医療関係者、ラジオアイソトープ供給関係者、製薬メーカー等が目標を共有するという意味で必要不可欠であり、重要である。

## 参考文献

- 1) 井上登美夫,「国産化<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tcの医療運用に向けての課題」, RADIOISOTOPES, 62, 667-678 (2013)
- 2) 河村弘, 棚瀬正和, 山林尚道, 太田朗生, 竹内宣博,「日本における<sup>99</sup>Mo製造の現状と課題」, FBNewsNo.506 p6～10 (2019)
- 3) 独立行政法人 日本原子力研究開発機構, 文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブ 成果報告書,「JMTR を用いた放射化学による<sup>99</sup>Mo/<sup>99m</sup>Tcの国産化技術開発」,平成26年3月
- 4) 棚瀬正和, 藤崎三郎, 太田朗生, 椎名孝行, 山林尚道, 竹内宣博, 土谷邦彦, 木村明博, 鈴木善貴, 石田卓也, 小林正明, 河村弘,「(n, γ)法で得られる<sup>99</sup>Moからの高濃度<sup>99m</sup>Tc溶液の大量製造技術の評価 -<sup>99m</sup>Tcの代わりに非放射性Reを用いた基礎的検討-」, RADIOISOTOPES, 65, 237-245(2016).
- 5) Sankha Chattopadhyay, Sujata Saha Das, Luna Barua, A simple and rapid technique for recovery of <sup>99m</sup>Tc from low specific activity (n, γ)<sup>99</sup>Mo based on solvent extraction and column chromatography, Applied Radiation and Isotopes, 68 (2010) 1-4
- 6) 文部科学省原子力課, 原子力研究開発基盤作業部会「平成30年度「もんじゅ」サイトを活用した新たな試験研究炉に関する調査の概要」, 2019年8月30日
- 7) 文部科学省原子力課, 原子力研究開発基盤作業部会「原子力研究開発基盤中間とりまとめ」, 2018年4月
- 8) 日本メジフィジックス株式会社, ニュースリリース「<sup>99</sup>Moの自社生産プロジェクトに着手～<sup>99m</sup>Tc製品の更なる安定供給に向けて～」, 2019年3月29日





中川 恵一

東京大学医学部附属病院

コロナとがん

新型コロナウイルスの蔓延はひとまず落ち着いていますが、まだまだ、先は見通せません。

しかし、なぜ、こんなやっかいなウイルスが拡がったのでしょうか。

がんと人類は、周囲の環境を破壊しながら増殖を続ける点で似ています。がん細胞は患者の栄養分を横取りしながら増殖を続け、患部が手狭になると、別の臓器に転移しながら、ひたすらその数を増やしていきます。

人類も増え続けています。わが国は少子化に悩んでいます。世界的には人口爆発が進んでおり、現在の世界人口は77億人を超えています。私が生まれた1960年には約30億人でしたから、この60年で2.5倍以上に増えたことになります。

世界の人口増加は長い間、きわめて緩やかなものでした。しかし、18世紀の産業革命以降に増加のペースが加速し、20世紀に入ると人口は爆発的に増え始めました。国連の推定では19世紀末におよそ16億人だった世界の人口は20世紀半ばの1950年におよそ25億人となり、20世紀末にはおよそ60億人にまで急増、特に第二次世界大戦後の増加が顕著です。そして、今世紀中に100億を突破するとの予測もあります。

人口減少が問題となっている日本でも、東京圏の人口は増え続けており、日本人の3割近くがここに密集して生活しています。

こうした人口爆発と都市での人口密集、さらに急速に進んだグローバル化による地球規模の人の移動が、今回の新型コロナウイルスの蔓延の背景にあることは明らかでしょう。

がんは自分が生まれた患者の体の中でしか生きられない存在ですが、自分の増殖のために患者の栄養を奪いつくしてしまいます。末期のがん患者が痩せるのはこのためで、がんによる死亡は、栄養失調とそれに伴う炎症が

原因といえます。

人間も化石燃料を消費しながら人口を爆発的に増やし、母なる大地である地球の環境を悪化させています。

新型コロナウイルスの感染源はコウモリと考えられています。環境の変化によって、野生動物が本来の居場所を失い、人間との距離が近くなったことも動物からヒトへの感染ルートができる一因だと思います。

さて、このウイルスが怖いのは、感染力や致死率が高いだけではありません。感染しても8割方が軽症あるいは無症状ですむ反面、重症化する人も一定の割合でいる点です。このウイルスの「ロシアブルーレット」的な面が私たちを不安に駆り立てます。

さらに怖いのは、この病気で亡くなる場合、発症から死亡までが非常に早い点です。イタリアのデータでは平均でわずか8日間。日本中に衝撃を与えた志村けんさんの場合でも、発症から10日あまりで帰らぬ人となりました。

しかも、隔離された状態で治療が行われるため、家族や友人と最後の時間を過ごすこともかたがたありません。人生に、突然の終幕が降ろされることになるわけです。さらに、火葬場で故人の骨を捨てることも困難です。

つい最近まで元気だった人が数日で亡くなってしまいますので、「突然死」に近い経過とも言えるでしょう。

一方、がんによる死はこの対極にあります。がんは治らない場合でも、徐々に死に向かっていく病です。転移があっても完治はできないと言われても、多くの場合、年単位の時間が残されます。

また、がんの場合には、余命をふくめて、ある程度、先々のことを見通すことが可能ですから、残った時間を活用することもできます。

がんにおける「死の予見性」は死の恐怖と長く向きあうことを意味します。それでも、私は「がんで死にたい」と心から願っています。



# 図説 量子ビーム・放射線利用

## －第8回 何を今さら LET－

大洗研究所 特別研究員 岡田 漱平

### 1. はじめに

－linear energy transfer = LETか？－

「linear energy transfer (線エネルギー付与)」とか「LET」は、放射線防護、放射線化学、放射線生物学などいろいろな分野で広く使われている概念である。なので、さぞやしっかりした共通認識があるんだろうと思うと、実はそうでもない。放射線防護分野のバイブルとも言えるICRP (国際放射線防護委員会) の報告書 (Publication; 以下 'Publ.' と略す) だけをとっても、いつの時代のどこを読んだかによって話が違ってくるのだ。

そこで、Publ.1 (1958) からPubl.137 (2017) までの原著を読み、「linear energy transferとLETとは完全に一致している」と言い切れるのかどうか、「何を今さら」という感じもするが、調べてみた。そういう論旨だから、linear energy transferをLETと略すわけにはいかないので、「l.e.t.」と略記することにする。なお、原著の和訳に関しては、ICRP 勧告翻訳検討委員会 (日本アイソトープ協会が翻訳書を発行) によるものを参考にさせていただいた。

### 2. 阻止能 (stopping power) の定義

l.e.t.の概念は阻止能から導かれる。荷電粒子が物質中を距離 $dl$ だけ通過する際に失うエネルギーを $dE$ とすると、線阻止能 (linear stopping power)  $S$  (単に阻止能という場合もある) は、

$$S = dE/dl$$

と表される。

これは、荷電粒子に対して定義される概念なので、l.e.t.の話に入る前に、荷電粒子が物質とどのような相互作用をするのか見ておこう。

### 3. 荷電粒子と物質との相互作用

荷電粒子と物質との相互作用の素過程を、例によってファインマン図形で表したものを図1に示す。エネルギー損失に関わる素過程は次の6種類である。

- ①イオン化：荷電粒子が原子・分子を電離し、二次電子が放出される。
- ②励起：荷電粒子が原子・分子にエネルギーを与え励起状態にする。
- ③制動放射：荷電粒子が原子核のクーロン場によって減速され、失った分のエネルギーが光子の形で放出される (光子の出し入れが起こる)。
- ④弾性散乱：荷電粒子と原子核とのクーロン相互作用により、原子核に運動エネルギーが与えられる。
- ⑤核反応：荷電粒子が原子核を他の原子核へと壊変させる。
- ⑥チェレンコフ放射：誘電体中で荷電粒子の群速度が媒質中での光の速度を超えたとき光が放射される。

これらの素過程のうち、図1の①から④までのいろいろなエネルギーの失い方に応じて、線阻止能にも以下のように名前が付けられている。

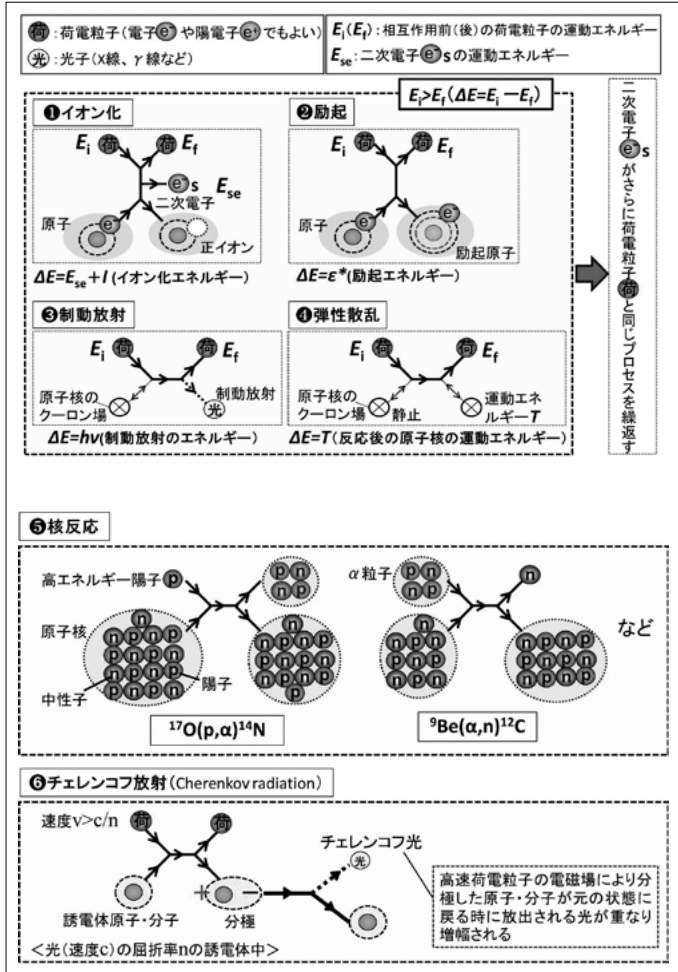


図1 エネルギー損失に関する荷電粒子と物質との相互作用の素過程。

$$S_{tot} = S_{col} + S_{rad} + S_{nuc}$$

$S_{tot}$  : 全線阻止能

(total linear stopping power)

$S_{col}$  : 線衝突 (電子) 阻止能

(linear collision (electronic) stopping power : ①②に相当)

$S_{rad}$  : 線放射阻止能

(linear radiative stopping power : ③に相当)

$S_{nuc}$  : 線核阻止能

(linear nuclear stopping power : ④に相当)

最後の $S_{nuc}$ は「核 (nuclear)」とは言っても、⑤の核反応のことではないので注意が必要である。

#### 4. さまざまな l.e.t. (linear energy transfer)

さて、ここからICRPの報告書 (Publ.) における記述の話に入る。ちょっとマニアックな感じもするが、Publ.1 (1958) からPubl.137 (2017) までのうち、l.e.t.とLETとの関係に言及している記述をまとめて表1に示す。

##### 4.1 限定を加えた l.e.t. ( $L_{\Delta}$ )

報告書の中で、阻止能の定義から説き起こして l.e.t.を明確に定義しているのはPubl.51 (1987) である。そこでは、阻止能のうち電子との衝突によるもの (図1の①と②)、すなわち $S_{col}$ のみに注目している。ただし、表1の左側の欄に示したように、エネルギー損失 $dE$ は $\Delta eV$  (カットオフエネルギー) より小さいものに限定している。そして、これを「線エネルギー付与あるいは限定線衝突阻止能、 $L_{\Delta}$  (linear energy transfer or

restricted linear collision stopping power,  $L_{\Delta}$ )」と呼んでいる。

同じ表中に示してあるように、 $L_{\Delta}$ は「限定を加えた線エネルギー付与 (restricted linear energy transfer)」とか「限定を加えたLET (restricted LET)」とも呼ばれるようになる。しかし、 $L_{\Delta}$ のことをLETと呼んでいる個所は定義の中のどこにもない。つまり、こういうことである。上の定義に従えば、『linear energy transferとは $L_{\Delta}$ であるが、 $L_{\Delta}$ がLETであるとは言っていない』。

表 1 ICRPの報告書の中でlinear energy transferとLETとの関係に言及している記述。

[ ]内はICRPの報告書の番号

linear energy transfer= $L_{\Delta}$	linear energy transfer= $L_{\infty}$	linear energy transfer=LET
<p>◆linear energy transfer or restricted linear collision stopping power, <math>L_{\Delta}</math>  <math>L_{\Delta}=(dE/d\ell)_{\Delta}</math>                      (dE is the energy lost by a charged particle in traversing a distance dℓ due to those collisions with electrons in which the energy loss is less than Δ)                      [ICRP Publ. 51 (1987)]</p> <p>◆linear energy transfer (<math>L_{\Delta}</math>) [15]                      ◆linear energy transfer <math>L_{\Delta}</math>[21]                      ◆restricted linear energy transfer, <math>L_{\Delta}</math>[58]                      ◆restricted LET, <math>L_{\Delta}</math>[123]                      ◆restricted linear energy transfer, LET<sub>200</sub> [123]                      ◆LET<sub>Δ</sub>=dE<sub>Δ</sub>/dx [127]</p>	<p>◆linear energy transfer (L or LET); <math>L=dE/d\ell</math>                      (dE is the mean energy lost by a charged particle owing to collisions with electrons in traversing a distance dℓ)                      ◆unrestricted linear energy transfer, <math>L_{\infty}</math> (often denoted linear energy transfer, LET or L)                      [ICRP Publ. 103 (2007)]                      [similar expressions in 116, 123, 127]                      ◆LET<sub>∞</sub> [4, 6, 9, 18]                      ◆linear energy transfer (LET<sub>∞</sub>) [9]                      ◆unrestricted linear energy transfer, L [60]                      ◆Linear energy transfer or linear collision stopping power, L [74]                      ◆unrestricted LET, <math>L_{\infty}</math> [92, 116, 123]</p>	<p>◆the average energy deposited along the track of the particle per unit length depends on the type of particle and its energy and is called the linear energy transfer (LET) of the particle                      ◆“low-LET” radiation (e.g., x or gamma rays); “high LET” radiation (e.g., alpha particles, protons and recoil nuclei from neutrons, heavy ions)                      [ICRP Publ. 60 (1990)]                      ◆linear energy transfer (LET) or ‘linear energy transfer, LET’ [2, 4, 18, 41, 58, 59, 60, 62, 88, 90, 92, 96, 108, 118, 120, 123, 131]                      ◆‘radiation of low LET’ or ‘low-LET radiation’ &amp; ‘radiation of high LET’ or ‘high-LET radiation’ [42 Pubs. from 4 to 131]</p>

#### 4.2 限定を加えないℓ.e.t. ( $L_{\infty}$ )

前述のPubl.51のℓ.e.t.の定義の最後には、  
 $L_{\infty} = S_{col}$   
 と書かれている。この意味は、 $L_{\Delta}$ の定義において、 $\Delta$ が $\infty$ （無限大）、すなわちカットオフエネルギーのような制限を設けない場合、線エネルギー付与は線衝突阻止能と同じになる、ということである。表1の真中の欄に示すように、この $L_{\infty}$ については、Publ.103 (2007) に詳しい定義があり、そこには「linear energy transfer ( $L$  or LET)」と書かれている。また、同じ報告書の中には、「unrestricted linear energy transfer,  $L_{\infty}$  (often denoted linear energy transfer,  $L$  or LET)」という記載もある。つまり、限定を加えないℓ.e.t.は $L_{\infty}$ であり、それは、「linear energy transfer,とも $L$ ともLETとも言う」のである。

また、古くは、 $L_{\infty}$ のことをLET<sub>∞</sub>と表していた時代もあった。 $L_{\Delta}$ に比べて、 $L_{\infty}$ の方が歴史が長いようである。これらの記述に従えば、こういうことになる。『linear energy transferは $L_{\infty}$ のことであり、 $L_{\infty}$ はLETとも言う』。

#### 4.3 一般化されたLET

ICRPの報告書の中には、特に $L_{\Delta}$ や $L_{\infty}$ のような明確な定義をしないで、LETを一般化して説明している個所が散見される。その代表的なものが、日本の現行法令が準拠している1990年勧告 (Publ.60) に記載されている (表1の右欄)。すなわち、LETとは「粒子飛跡に沿って単位長さあたりに沈着する平均エネルギー」であるという「説明」である。

この一般化されたLETについては、表1の右欄に示すように、「linear energy transfer = LET」と解釈できる表現が、多くのPubl.の中に見られる。また、「低LET放射線 (radiation of low LETあるいはlow-LET radiation)」「高LET放射線 (radiation of high LETあるいはhigh-LET radiation)」という表現についても同様である。この表現については、Publ.60の中に次のような説明がある。『飛跡1 μmあたり数事象を生ずるような疎電離性の放射線は“低LET”放射線 (たとえばX線またはガンマ線) として知られているのに対し、飛跡に沿って密に電離を生ずる放射線は“高LET”放射線 (たとえばアルファ粒子、陽子、中性子に

よる反跳核、重イオン)として知られている。』  
 ところが、である。上で陽子は高LET放射線だと言っているのに、Publ.103 (2007)には「組織中の電離密度に関しては、高エネルギー陽子は低LET放射線(10keV/ $\mu$ mより非常に小さい平均LET値を持つ)とみなすことができ」という記述がある。少数の報告書を読んだだけでは全体を論ずることができないことを示す例のひとつである。

### 5. X線は低LET放射線？荷電粒子でもないX線に何故LETという言葉が？

ところで、元来LETは荷電粒子に対して定義された概念である。それなのに、何故、非荷電放射線である光子や中性子に、低LETとか高LETという名前が付いているのか？

これもまた、ICRPの報告書を隅まで読まないとわからない。実はPubl.4 (1953-1959)とPubl.6 (1959-1962)に、LETの定義に関わる「荷電粒子」に対する説明としてまったく同じような記述がある。「the energy loss per unit distance of the charged particles originally set in motion by electromagnetic radiation or neutrons, or of the charged particles which originate in radiation sources (alpha-rays, beta-rays, etc.)」。つまり、LETを定義する「荷電粒子」とは、「電磁放射線(X線や $\gamma$ 線のこと)または中性子によって運動をはじめた荷電粒子、または放射線源から発生した荷電粒子( $\alpha$ 線、 $\beta$ 線など)」のことですよ、と言明しているのである。この「…によって運動をはじめた」という文言によって非荷電放射線と荷電粒子さらにLETが繋がるわけである。と

ところが、ICRPの報告書では、この後、この文言が省略されてしまったため、「なんで非荷電放射線のくせに…」というギモンが出てくるのである。

それでは、非荷電放射線からどうやって荷電粒子が生まれるのか、見ていこう。

### 6. 光子と物質との相互作用

図2に、X線や $\gamma$ 線などの光子と物質との相互作用のうち、エネルギー損失に関する素過程をファインマン図形で示す。素過程には、①コンプトン散乱、②光電吸収、③対生成、④光核反応がある。また、②に引き続いて②>④オージェ電子放出や②>⑥特性X線放出も起こる。

以上からわかるように、①からコンプトン電子、②から光電子とオージェ電子、③から電子と陽電子、④から陽子などの荷電粒子が

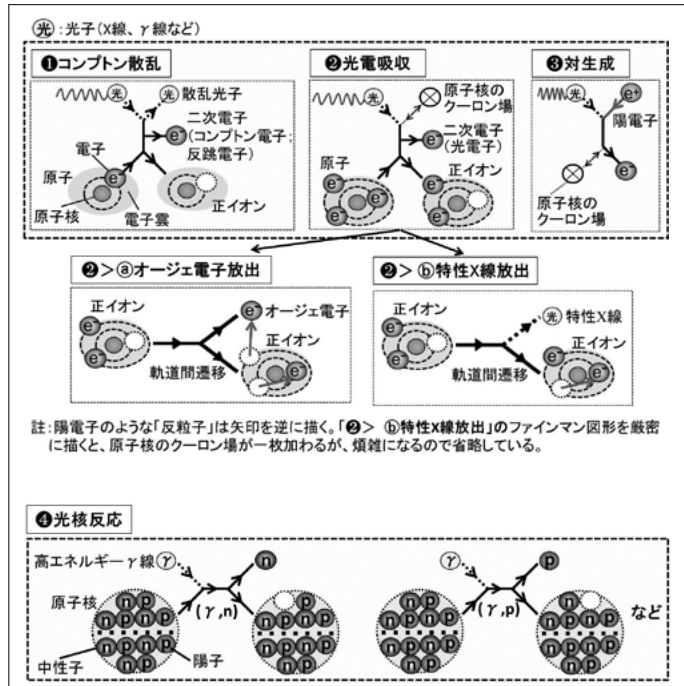


図2 エネルギー損失に関与する光子と物質との相互作用の素過程。



生まれ、これらがLETに寄与していくことになる。

### 7. 中性子と物質との相互作用

図3に、中性子と物質との相互作用のうち、エネルギー損失に関与する素過程をファインマン図形で示す。素過程には、①弾性散乱、②非弾性散乱、③中性子捕獲、④核変換、⑤核分裂がある。

これらの素過程のうち、①から反跳核、④から陽子、重陽子など、⑤から核分裂片などの荷電粒子が生まれる。

ところで、図3では、中性子が反応する相手として原子核が描かれている。これは、中性子が電荷を持たないため、「中性子には原子核しか見えない」からである。すなわち、中性子は電子とも原子核のクーロン場とも相互作用せず、原子核の核力とのみ相互作用するため、電子などは無関係なものとして省いてあるのだ。

しかし、これだと「荷電粒子が生まれる」ということが視覚的にわかりづらいし、そもそも、中性子の照射場に原子核が裸でいるわけではない。そこで、中性子と水素原子との散乱を例にとって、実態はどうなのかをファインマン図形にしてみた(図4)。中性子は電荷を持たないがスピンを持っていて、水素の原子核(陽子)のスピンと磁氣的相互作用はするから、スピンも描き込んである。

水素原子では陽子の周りに電子1個が「電子雲」として存在している。そこに中性子が入射してきた陽子を弾き飛ばすと、陽子は反

跳陽子として放出されるが、電子雲は、たぶん、取り残されるであろう。そして、核を失った「電子雲」はもはや「雲」ではありえず、1個の電子として実体化するのではないか。つまり、終状態には、散乱中性子と反跳陽子、そして電子が残るのである。

中性子の検出に反跳陽子が使われる理由も、原子炉材料の中性子照射の模擬に陽子ビームが使われるわけも、そして中性子が高LETと呼ばれるわけも、これでスッキリするのではないだろうか。

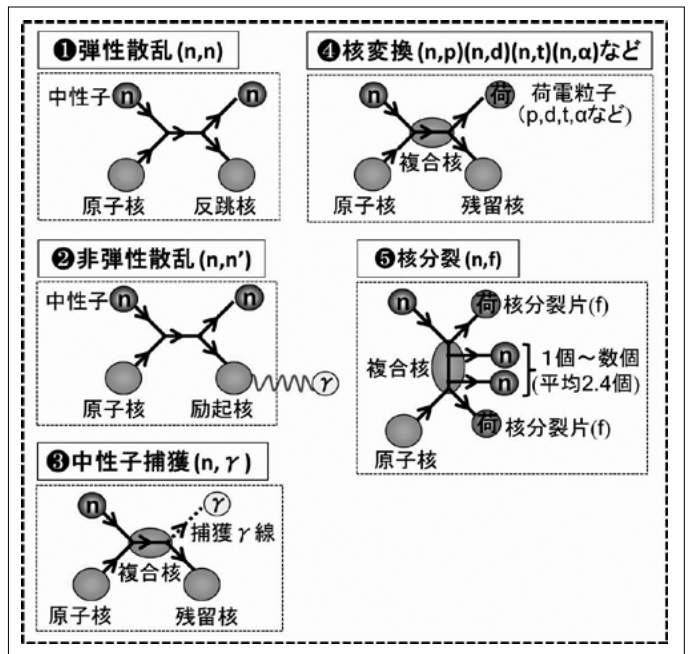


図3 エネルギー損失に関与する中性子と物質との相互作用の素過程。

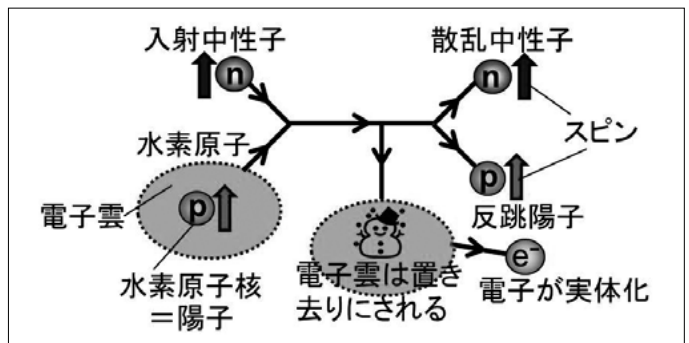


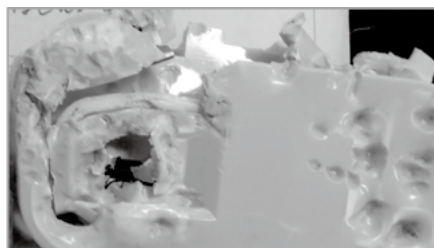
図4 中性子と水素原子との散乱のファインマン図形(試論)。

## ご使用期間中にガラスバッジが 破損した場合の取り扱いについて

ご使用いただいておりますガラスバッジに破損等の何らかの異常が認められた場合の取り扱いについて、取扱説明書（弊社ホームページ <https://www.c-technol.co.jp/monitoring/>でもご覧いただけます。）等でご案内しておりますが、このたびは、次のような具体的な例をご案内させていただきます。

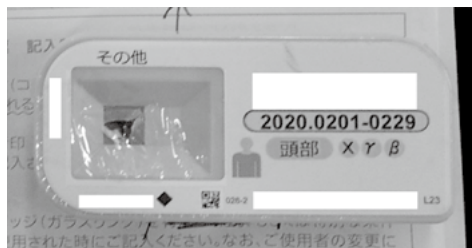
以下のような破損が発見された場合は、当該ガラスバッジの使用を中止し、弊社までご連絡いただきガラスバッジの再発行の手続きをしていただくようお願いいたします。

### 動物によりガラスバッジが噛まれてしまった例



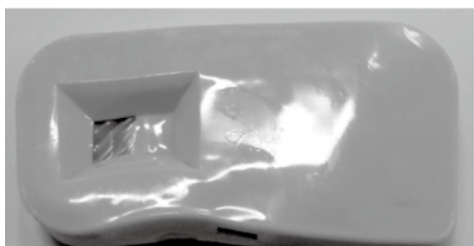
表面のラベルは剥がれ、ガラスバッジの表面に歯型がついて、ケースが破損しています。衝撃により内部のガラス素子も破損していることがあります。

### $\beta$ 線測定用の窓部が破損した例



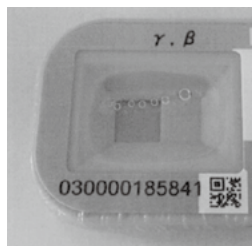
上の写真では、 $\beta$ 線測定用窓部分のシュリンクフィルム（透明なフィルム）および内側のケースに穴が開き破損しています。 $\beta$ 線の測定結果に影響がある場合があります。

### 洗濯して乾燥機に入れてしまった例



ガラスバッジのケースが熱で変形しています。上の図ではラベルがはがれてしまっています。ケースの変形により内部のガラス素子も破損している可能性があります。

### $\beta$ 線測定用窓部に水等の液体が入り込んだ例



上の写真のように $\beta$ 線測定用窓部に水等の液体で満たされてしまっています。なお、わずかな水滴、くもりや結露程度であれば、問題ありませんので継続してお使いください。

### そのままご使用いただいて問題ない場合

以下のような破損であれば測定結果に影響はございませんので、ガラスバッジをそのままご使用いただけます。

ガラスバッジのシュリンクフィルム（透明なフィルム）がはがれてしまった場合

セロハンテープなどで留めてそのままご使用ください。

ご使用者の氏名が書かれたラベルがはがれてしまった場合

ラベルがはがれてもご使用者様を特定し、測定・報告することが可能です。  
ガラスバッジの平らな面にシールなどを貼り付け、名前を書いてご対応ください。



クリップ部分が外れてしまった場合

クリップ部分をガラスバッジ本体に再装着してご使用ください。

ガラスバッジをそのまま使用していいのかわからない場合も弊社までご連絡いただき、ご相談ください。

## 令和2年度放射線安全取扱部会年次大会 (第61回放射線管理研修会) 開催中止のご連絡

放射線安全取扱部会では、新型コロナウイルス感染拡大防止のためこれまでに収集した情報を基に、年次大会開催の可否について慎重に検討を重ねて参りました。

参加者の皆様及び実行委員会委員の健康と安全を最優先に考慮した結果、今年度熊本県熊本市で開催予定であった年次大会を来年度へ延期することといたしました。

年次大会としては中止いたしますが、部会総会関係（事業報告・計画、各支部・各委員会報告等）及び放射線安全管理技術の情報交換の場を確保するためのポスター発表等はwebでの開催を予定しております。詳細は日本アイソトープ協会ホームページにてご確認ください。

(<https://www.jrias.or.jp/seminar/cat11/>)

【連絡先】（公社）日本アイソトープ協会放射線安全取扱部会事務局

〒113-8941 東京都文京区本駒込2-28-45

Tel. 03-5395-8081 Fax. 03-5395-8053

E-mail [gakujutsu@jrias.or.jp](mailto:gakujutsu@jrias.or.jp)

サービス部門からのご願い

## 測定依頼票のご記入のお願い

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。

ガラスバッジ・ガラスリングを測定依頼される際は「測定依頼票」に返却される線量計の個数のご記入をお願いいたします。

線量計をお届けする際に同封しております「お届けのご案内」の「測定依頼票」部分を切り離し、**ガラスバッジ・ガラスリングの返却個数とコントロール線量計がある場合はコントロールの個数も含め、ご記入をお願いします。**(X線用ガラスバッジには、コントロールはありません)

お客様のご理解とご協力をよろしくお願ひ申し上げます。

返却個数(コントロールガラスバッジ・ガラスリングを含む)記入欄 (X線用ガラスバッジには、コントロールガラスバッジはありません)		
ガラスバッジ	ガラスリング	ご担当者印
5 個	3 個	

## 編集後記

- 弊社ガラスバッジを御利用いただいております医療機関にお勤めの皆様、医療機関へ資機材納品される各企業の皆様、施設内で消毒作業に常時従事されている皆様、必要な医療物資を製造していただいている各企業の皆様、それぞれの職場へ向かうために必要な交通インフラを維持いただける各企業の皆様、新型コロナウイルスに最前線で立ち向かっていらっしゃる全ての皆様に、この編集後記誌面を借りまして御礼申し上げます。誠にありがとうございます。皆様の健康と安全をお祈り申し上げます。
- 東京医療保健大学 東が丘・立川看護学部看護学科 講師 堀田昇吾氏、東京医療保健大学 名誉教授 草間朋子先生より「放射線診療(業務)従事者指定に関するガイドライン-看護職者-」をご紹介いただきました。ガイドラインが広く普及し、最前線で活躍される看護師の職場安全環境が向上される事を祈念いたします。
- 昨今、弊社へ放射線防護衣を着用した不均等被ばく時における線量計の適切な装着位置・個数に関するお問い合わせ

- をせをいただいております。代表的な被ばく状況を例に線量計の具体的な装着方法をご紹介いたしました。
- 2019年1月に解説後、2回目のご紹介。河村委員より「<sup>99</sup>Moの準国産化に向けた取り組み」について最近の動向を踏まえて、具体的な取り組みをご紹介いたしました。
- 中川恵一先生のコラム「コロナとがん」を編集委員として事前に拝読させていただいた際に真っ先に飛び込んできた最終行の一文に驚き、拝読するにつれ、私も予見性のある死を希望したいと考えました。同時に、予見性に耐え得る心の強さの鍛錬を開始せねばと覚悟いたしました。
- 弊社大洗研究所岡田淑平アドバイザーより第8回目の連載記事を掲載いたしました。
- 楽しみにしていたオリンピックがない2020年8月夏ではございますが、楽しみは1年後にございます。万全な状態で楽しめるよう、どうぞ皆様ご自愛いただき健康第一でお過ごしくださいませ。今後とも変わらぬ御支援の程よろしくお願ひします。(廣田 盛一)

## FBNews No.524

発行日/2020年8月1日

発行人/細田敏和

編集委員/新田浩 小口靖弘 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 高橋英典 中本由季 廣田盛一 四方田章裕

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

https://www.c-technol.co.jp/

印刷/株式会社テクノサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円(本体364円)