



Photo K. Hirano

## Index

新規シンチレータ単結晶とそのバルク単結晶作製技術の開発 Ce:GAGG Ce:(La,Gd) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (Ce:La-GPS)、Eu:SrI <sub>2</sub> .....	吉川 彰	1
放射線量計測の基礎 (2) .....	細田 正洋	7
〔施設訪問記⑦〕 -メディポリス国際陽子線治療センターの巻- 南国の光あふれる施設 ~闘わないがん治療~ .....		13
電源ベストミックスを考える.....	町 末男	17
〔図書紹介〕 マンガ ボクたち私たちが考える放射線.....		18
〔サービス部門からのお願い〕 平成26年度「個人線量管理票」のお届けについて .....		19

# 新規シンチレータ単結晶と そのバルク単結晶作製技術の開発

Ce:GAGG Ce:(La,Gd)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (Ce:La-GPS)、Eu:SrI<sub>2</sub>



吉川 彰\*

## 1. はじめに

放射線検出器は、陽電子断層撮像装置 (PET) や X 線コンピュータ断層撮影 (X 線CT) に代表される核医学装置や、空港の手荷物検査機等に代表されるセキュリティ機器、石油や鉱物資源探査装置、電子部品の非破壊検査装置、原子炉放射線モニタリングなど、広汎な分野に応用されている。これは、放射線を紫外～可視光に変換する“シンチレータ”と、その光を電気信号に変換する“受光素子”とから成っており、非破壊検査装置の性能はこの放射線検出器部分の性能に大きく依存する。

シンチレータはこの様に市民社会の安全・安心を支える応用を持ち、結晶材料分野において、半導体結晶や圧電結晶に次ぐ大きな市場規模を有する。最初に工業化された Tl:NaI は 1948 年に Hofstadter<sup>1)</sup> によって発見された。1973 年の BGO の発見以降、X 線 CT や PET などの医療画像装置の開発や欧州原子核研究所 (CERN) の Large Hadron Collider (LHC) の Compact Muon Solenoid (CMS) における高精度カロリメータ用のシンチレータの要請なども密接に関わりながら Tl:CsI<sup>2)</sup>、BaF<sub>2</sub><sup>3)</sup>、CdWO<sub>4</sub><sup>4)</sup>、CeF<sub>3</sub><sup>5)</sup>、PbWO<sub>4</sub> (PWO)<sup>6),7)</sup>、Ce:Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (GSO)<sup>8)</sup>、Ce:Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (LSO)<sup>9),10)</sup> などの新しいシンチレータ結晶<sup>11)</sup> が開発されて来た。欧米を中心に膨大な研究費を投じた開発競争が行われる中、日本人研究者も常に

その存在感を示し続けて来た。しかしながら、全ての要請を満たす理想的なシンチレータは開発されておらず、最近でも PET 装置などの医療画像装置や、非破壊検査装置、高エネルギー物理分野など様々な応用分野における小型化・高精度化のため、密度・応答速度・発光量などの点でこれまで以上の性能を持つシンチレータの開発に対して精力的な挑戦がなされている。

本稿では、新規シンチレータの設計方法とそのバルク結晶作製技術開発に関して具体例を示しながら報告する。

## 2. シンチレータ開発における発光中心の 選択と母結晶の設計

### 1.1 シンチレータ

シンチレータの役割は  $10^{5-6}$  eV のエネルギーを持つ単独の放射線を数 eV のエネルギーを持つ複数の光子に変換することであり、放射線をシンチレータに当てると、この光子のエネルギーに対応した波長の光が得られることとなる。

1895 年のレントゲンによる X 線の発見により、人類は放射線や放射性物質の存在を認識した。レントゲンは、放電管に数千ボルトの電圧をかけて陰極線の実験を行っていた際、偶然に放電管を厚い紙で覆っているにもかかわらず近くにおいてあった蛍光物質が発光している現象を発見し、放電管から目に見えないが物

\* Akira YOSHIKAWA 東北大学金属材料研究所／東北大学未来科学技術共同研究センター／株式会社 C&A

質に対する透過力をもった何かが発していると結論づけ、これをX線と名付けたとされる。この蛍光物質がシンチレータであるので、シンチレータはそのシンチレーション現象により、人類に放射線および放射性物質の存在を教えてくれた物質とも言える。

## 1.2 発光中心の選択

シンチレータに求められる重要なパラメータとして、発光量、密度、蛍光寿命、エネルギー分解能等があるが、例えば、陽電子断層撮影(PET)においては、放射線(PETの場合はガンマ線)の数え落としを減らし、患者の絶対被曝量を低減させたいといったことから、近年のシンチレータ特性への要求として、特に“高速応答”がある。そのためには、シンチレータの蛍光寿命が短くなる必要があるが、同じ発光中心を用いる場合、蛍光寿命を短くすればするほど発光波長は短波長化する<sup>12)</sup>。

$$\Gamma = \frac{1}{\tau} \propto \frac{n}{\lambda_{em}^3} \left( \frac{n^2+2}{3} \right)^2 \sum_f | \langle f | \mu | i \rangle |^2 \dots \quad (1)$$

ここで、 $\Gamma$ は遷移確率、 $\tau$ は蛍光寿命、 $n$ は屈折率、 $\lambda_{em}$ は発光波長、 $f$ は終状態、 $i$ は始状態、 $\mu$ は双極子演算子である。

シンチレータに用いられる発光は、A. 添加物のないワイドバンドギャップ材料におけるIntrinsic (self-activated) な発光と、B. 添加物を用いたワイドバンドギャップ材料におけるExtrinsic (activated) な発光、とAとBの混合型のような位置づけに当たるC. 直接遷移型のワイドバンドギャップ半導体のエキシトン発光とに大別される。

AのIntrinsic (self-activated) な発光は、添加物のないワイドバンドギャップ材料のホスト自体からの発光であり、 $\text{PbWO}_4$ 、 $\text{CaWO}_4$ 、 $\text{CdWO}_4$ などの“Self-trapped exciton発光”(STE発光)と、 $\text{BaF}_2$ の短寿命成分に代表される“Core-Valence発光”(CVL)とが挙げられる。 $\text{BaF}_2$ は蛍光寿命の短い成分としてSTE発光も有することが知られている。

Bの添加物を用いたワイドバンドギャップ材

料におけるExtrinsic (activated) な発光は、更に5つに分類される。①代表格はCe:LSO、Ce:GSOなど、最先端のPET用シンチレータで用いられている“3価の希土類イオンの5d-4f遷移に伴う発光”である。これはパリティ許容遷移で、且つ、スピン許容遷移であるため、発光量が多く、蛍光寿命が短いという、応用面からとても好ましい特徴を有する。② $\text{Eu}^{2+}$ を賦活剤として用いるシンチレータは“2価の希土類イオンの5d-4f遷移に伴う発光”に分類される。この発光はパリティ許容遷移だが、スピン禁制遷移であるため、Ce系に比して蛍光寿命はやや長めである。③ $\text{Tl}^+$ や $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Bi}^{3+}$ などを賦活剤として用いるシンチレータは“6s 6p-6s<sup>2</sup>遷移に伴う発光”に分類される。この発光はパリティ許容遷移、スピン禁制遷移だが、スピン軌道相互作用で補償されるため、蛍光寿命は①よりは長いものの、②よりも短い。④パリティ許容遷移で、且つ、スピン許容遷移の発光として、“電荷移動状態からの遷移に伴う発光”も挙げられる。近年、Ybの電荷移動状態からの遷移に伴う発光が話題となった。⑤蛍光体として用いられている $\text{Tb}^{3+}$ や $\text{Eu}^{3+}$ 、 $\text{Pr}^{3+}$ などのシンチレータは“3価の希土類イオンの4f-4f遷移に伴う発光”に分類される。これはパリティ禁制遷移で、且つ、スピン禁制遷移であるため、蛍光寿命は長寿命である。

Cの直接遷移型のワイドバンドギャップ半導体のエキシトン発光は以下の3つに分類される。

①無添加の $\text{ZnO}$ や $\text{PbI}_2$ などで観察される“ワニエ励起子による発光”、② $\text{Ga:ZnO}$ 、 $\text{In:ZnO}$ など、添加物を介して再結合が行われる“添加したイオンを介した電子と正孔の再結合に伴う発光”、③量子効果が顕著になるサイズのナノ結晶からのエキシトン発光。

従来、シンチレータは放射線の侵入長を考えた時、ある程度以上の大きさが期待されるため、量子効果が顕著になるような小さなサイズの物質を対象とした研究はあまり盛んではなかったが、最近のナノ領域への集中的な

研究費の投入により、近年は③の研究に関する報告も大幅に増加している。

### 1.3 母結晶の設計と探索

母結晶は発光中心が入りやすいものを選ぶことが原則となる。ガンマ線やX線用であれば、有効原子番号の高いものが格子を構成する元素であるのが好ましい。一方、中性子用であれば、<sup>6</sup>Li、<sup>10</sup>Bといった中性子に対する散乱断面積の大きな元素で格子を構成するのが望ましい。なお、母結晶は発光波長において透明であることは必須である。

探索に我々が用いる方法論は以下の流れとなる。

#### ①まずは情報収集と設計

- (a) 母結晶候補となる酸化物・フッ化物のリストアップを行なう。
- (b) 上記リスト中の物質が含まれる相図をデータベース (Phase Equilibria Diagrams (CD-ROM) : The American Ceramic Society) から検索し、化合物候補を絞りこむ。
- (c) 物性が有望な材料で、融点が高過ぎる、もしくは調和溶融組成から少しずれているものなど、融液成長が難しいものに関しては、Bond-Valence-Sumなどからの推測に基づき、同種異種原子価置換を試み、溶融組成、融点の調整を行なう。

#### ②μ-PD法による単結晶試作<sup>13)</sup>

- (a) 推論により候補とした母結晶組成において比較的早めの速度での結晶成長を試み、その際の必要な熱量の変動から最適組成を検討する。変動が大きい場合は調和溶融組成からずれていると判断し、粉末X線回折法を用いた分析や走査型電子顕微鏡 (SEM) の反跳電子像 (BEI) の観察と合わせて最適組成を決定する。
- (b) 同種の結晶を種結晶とするのが好ましいが、入手困難な場合は結晶構造が近く、構成元素も近い結晶を種結晶とする。不可能な場合はIr, Pt, W等を種結晶として、

まずは結晶を作製し、そこから種結晶を切り出す。

- (c) 種結晶は優先成長方位、熱膨張係数などを考慮し、方位を選定する。
- (d) 結晶化率100%になるまで作製し、添加物の偏析等をチェックする。
- (e) 特性評価用に、添加物の比率を変えた試料を準備する。

#### ③光学特性の評価

光学評価は、試験片を寸法、2×2×10mmの板状に加工・光学研磨し、まずは透過率測定を行う。次に、Photoluminescenceによる発光波長、蛍光寿命の測定を行う。シンチレータ用結晶の場合は更にX線励起のRadioluminescence発光波長の測定を行い、γ線励起のRadioluminescenceによる発光量特定、蛍光寿命の測定を行う。

②、③は常にフィードバックを掛け合いながら、迅速スクリーニングを執り進める。

## 3. Ce:GAGGシンチレータの開発

Ce:Gd<sub>3</sub>(Al,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (Ce:GAGG)単結晶<sup>14),15)</sup> (図1)は高い化学的安定性を有し、発光量56,000photon/MeV、エネルギー分解能4.6~6.2%という優れたシンチレーション特性を示す上に、発光波長が520nm (図2)という長波長発光のため半導体受光素子との相性が良く、コンプトンカメラや食品放射線モニタ等に用いられ始めている。波高値スペクトルを図3に示す (Shaping timeは2 ms。Fe-55の波



図1. CZ法作製2インチ径GAGG単結晶

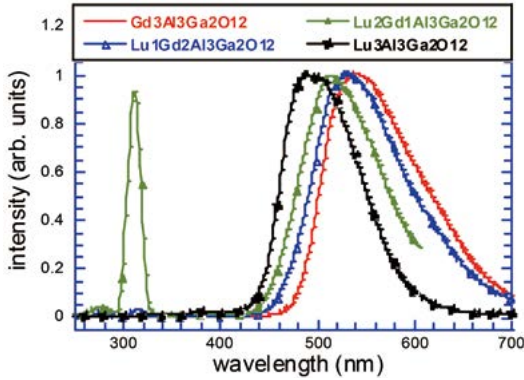


図 2. Ce:(Gd,Lu)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>単結晶のX線励起の発光スペクトル

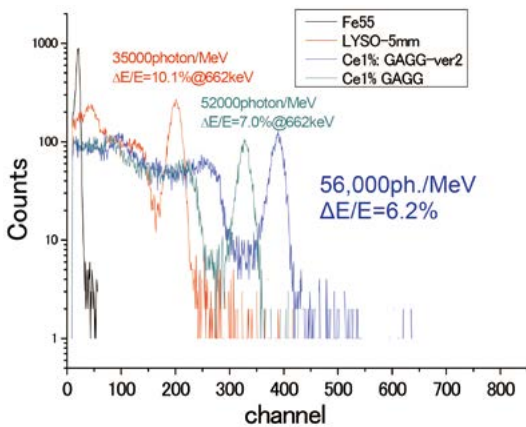


図 3. Ce:Gd<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>単結晶の波高値スペクトル (@662keV)

高値で補正。APD Hamamatsu S8664-55使用。各波長でのQE は 80%@520nm, 70%@420nm)。ただし、蛍光寿命が90~170nsと他のCe系シンチレータに比して長いいため timing resolutionが悪く、PET等に用いられることはなかった。しかしながら、近年、添加剤の工夫により、発光量をあまり損ねることなく蛍光寿命を早くする (~40ns) ことに成功しつつあり、timing resolutionが向上しているため、PET等の観点からも興味深い材料となりつつある。

#### 4. Ce:(La,Gd)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (Ce:La-GPS)シンチレータの開発

Ce:Gd<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (Ce:GPS) は30,000ph/MeVとい

う高発光量と6% (@662keV) という高エネルギー分解能を持つシンチレータである<sup>16),17)</sup>が、非調和溶融組成であるため融液成長ができず、溶液からの結晶成長が必須となり、バルク単結晶を得ることが難しい。そこで我々はGdのサイトに可視域での吸収も発光もないLaを置換することで、構造の安定化を試みた(図4)。

La-GPS<sup>18),19),20)</sup> は高い化学的安定性を有し、高発光量 (40,000ph/MeV)、高エネルギー分解能 (4.4%)、短い蛍光寿命 (45~50ns) に加え、高温においても発光量の劣化が無いことから、資源探査応用の観点から興味を持たれている。発光波長は370nmであり、光電子増倍管とも相性が良い。図5にLa-GPS単結晶のX線励起の発光スペクトルを、図6に波高値スペクトルを示す (Cs-137からのガンマ線 (662 keV) で励起。PMTはR7600-200。Shaping timeは2μs)。

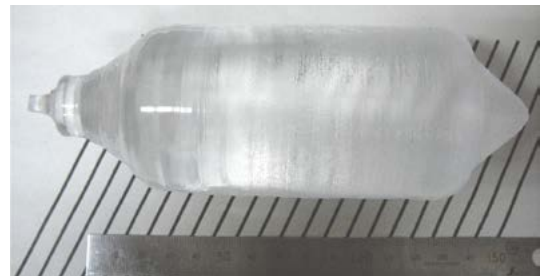


図 4. CZ法作製 2 インチ径La-GPS単結晶

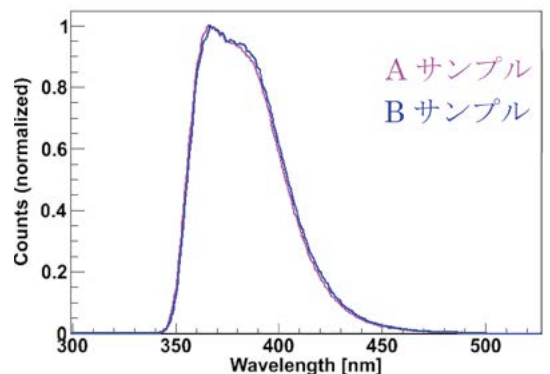


図 5. La-GPS単結晶のX線励起の発光スペクトル。(top : A, bottom : B)



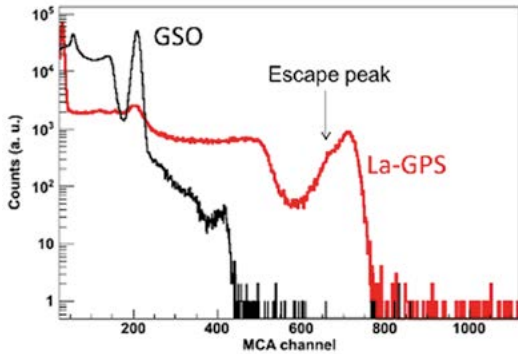


図 6. La-GPS単結晶の波高値スペクトル (@662keV)

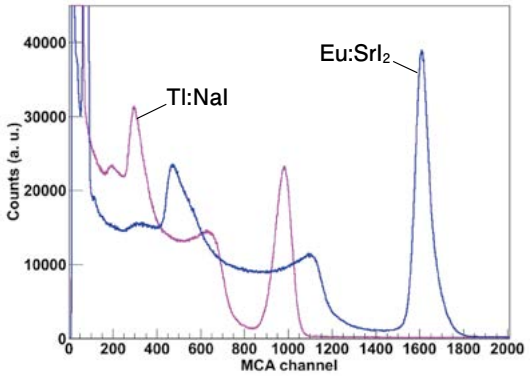


図 8. Eu:SrI<sub>2</sub>単結晶の波高値スペクトル (@662keV)。

### 5. Eu:SrI<sub>2</sub>シンチレータ単結晶作製技術の開発

Eu:SrI<sub>2</sub>結晶はガンマ線に対して80,000ph/MeV以上の発光量、3%台のエネルギー分解能を示すことから世界中で精力的に研究が行われている<sup>21),22),23)</sup>。しかし、Eu:SrI<sub>2</sub>結晶は高い吸湿性を示すことから、これまで密封型ブリッジマン法等の限られた方法でしか単結晶育成が行われていない。我々はチャンバー着脱型マイクロ引下げ ( $\mu$ -PD) 法を独自開発し、Eu:SrI<sub>2</sub>結晶のEu添加濃度の最適化を行うことで発光量、エネルギー分解能の改善に挑戦した<sup>24)</sup>。また、バルク結晶作製技術の開発も行い、1インチ径に関しては封缶技術も確立した(図7)。波高値スペクトルを図8に示す。発光量78000±2000光子/MeV。エネルギー分解能4.4±0.2% (FWHM, 662keV)。

更なる大型化にも挑戦し、世界で初めて2インチ化にも成功した(図9)。

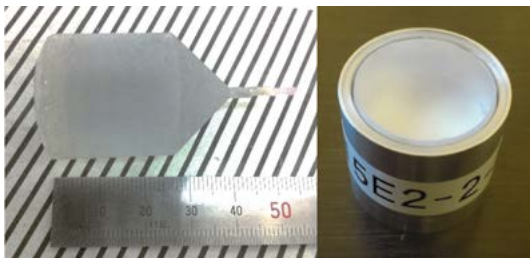


図 7. 1インチ径Eu:SrI<sub>2</sub>単結晶(as grown : 左)とEu:SrI<sub>2</sub>単結晶の封缶品(右)

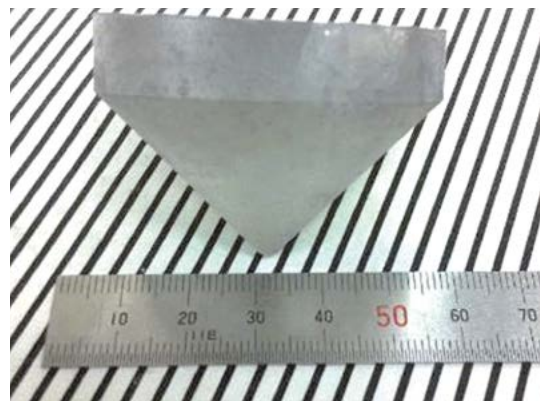


図 9. 2インチ径Eu:SrI<sub>2</sub>単結晶

### 6. まとめ

新規シンチレータの設計方法とそのバルク結晶作製技術開発に関して具体例を示しながら報告した。シンチレータ結晶の開発には、必要特性を踏まえつつ、発光中心の選択、母結晶の設計等を同時に検討しながら行うことになる。ガンマ線用途では透明のバルク体が必要となるため、特性が優れているのみならず、バルク単結晶作製が可能であることも必須となる。基礎研究ではこの事実を軽視されがちであるが、新物質は使われて初めて材料と呼べるので、新物質開発の時点から斯様な視点を持つことも肝要である。

斯様な条件下、酸化物ではCe: (Gd,RE)<sub>3</sub>(Ga,Al,Sc)<sub>5</sub>O<sub>12</sub>等のマルチコンポーネントガー

ネット、パイロクロア型構造を持つCe: (Gd, RE)<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>等がガンマ線用として開発された。Ce:Gd<sub>3</sub>(Ga,Al)<sub>5</sub>O<sub>12</sub>は東北大学を中心に開発が行われ、製品化されている。

また、微量添加することで欠陥準位に捕獲されるエネルギーを減らし、発光量を有しつつ、蛍光寿命を50ns以下と高速化させることなどが成功しつつある。

北海道大学やウクライナのグループ等がパイロクロア型構造を持つCe:Gd<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>等が高い発光量と高温での安定性を有するシンチレータであることを見出した。融液成長が難しいとされたが、東北大学がGdのサイトをLaで置換する工夫を行い、融液成長に成功し、製品化されている。

Eu:SrI<sub>2</sub>はローレンツリバモアや東北大学を中心に結晶作製技術の開発研究が行われ、製品化されている。

## Reference

- 1) R. Hofstadter, Phys. Rev. 74 (1948) 100.
- 2) R. Hofstadter, Nucleonics 6 (5) (1950) 70.
- 3) J.B. Czirr, E. Catalano, Nucl. Instr. & Meth. A143 (1977) 487.
- 4) E. Sakai, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-34 (1) (1987) 418.
- 5) W.W. Moses, S.E. Derenzo, Nucl. Instr. & Meth. A 299 (1990) 51.
- 6) V. G. Baryshevski et al., Nucl. Instr. & Meth. A 322, (1992) 231.
- 7) M. Kobayashi, M. Ishii, Y. Usuki, H. Yahagi, Nucl. Instr. & Meth. A 333, (1993) 429.
- 8) K. Takagi, T. Fukazawa, Appl. Phys. Lett. 42 (1) (1983) 43.
- 9) C.L. Melcher, U.S. Patent No. 4,958,080, 1990.
- 10) C.L. Melcher, J.S. Schweitzer, Nucl. Instr. & Meth. A314 (1992) 212.
- 11) A. Yoshikawa, V. Chani and M. Nikl, ACTA PHYSICA POLONICA A 124 (2013) 250-264
- 12) Dorenbos, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A486 (2002) 208
- 13) A. Yoshikawa, M. Nikl, G. Boulon, T. Fukuda, Opt. Mat. 30 (2007) 6
- 14) K. Kamada, T. Yanagida, J. Pejchal, M. Nikl, T. Endo, K. Tsutsumi, A. Yoshikawa, Cryst. Growth & Design 11 (2011) 4484-4490
- 15) A. Yoshikawaa, Y. Fujimoto, A. Yamaji, S. Kurosawa, J. Pejchal, Y. Yokota, K. Kamada, M. Nikl et.al., Opt. Mat. 35 (11) (2013) 1882-1886
- 16) Kawamura, Kaneko et.al., IEEE Trans. on Nucl. Sci., 54 (2007) 1383
- 17) O. Sidletskiy et.al., Rad. Meas. 45 (2010) 365-368
- 18) A. Suzuki, S. Kurosawa, T. Shishido, J. Pejchal, Y. Yokota, Y. Futami, A. Yoshikawa, Appl. Phys. Express 5, (2012) 102601
- 19) S. Kurosawa, T. Shishido, A. Suzuki, J. Pejchal, Y. Yokota, A. Yoshikawa, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A 744 (2014) 30
- 20) A. Yoshikawa, S. Kurosawa, Y. Shoji, V. I. Chani, K. Kamada, Y. Yokota, Y. Ohashi, Cryst. Growth Des., 15 (4) (2015) 1642-1651
- 21) N.J. Cherepy, G. Hull, A. Drobshoff, S.A. Payne, E. van Loef, C. Wilson, K. Shah, U.N. Roy, A. Burger, L.A. Boatner, W-S. Choong, W.W. Moses, Appl. Phys. Lett. 92 (2008) 083508.
- 22) N.J. Cherepy, S.A. Payne, S.J. Asztalos, G. Hull, J.D. Kuntz, T. Niedermayr, S. Pimputkar, J.J. Roberts, R.D. Sanner, T.M. Tillotson, E. van Loef, C.M. Wilson, K.S. Shah, U.N. Roy, R. Hawrami, A. Burger, L.A. Boatner, W-S. Choong, W.W. Moses, IEEE Trans. Nucl. Sci. 56 (2009) 873-80.
- 23) E.V.D. van Loef, C.M. Wilson N.J. Cherepy, G. Hull, S.A. Payne, W- S. Choong, W.W. Moses, K.S. Shah, IEEE Trans. Nucl. Sci., 56 (2009) 869-72.
- 24) Y. Yokota, K. Nishimoto, S. Kurosawa, D. Totusuka, A. Yoshikawa, J. Cryst. Growth 375 (2013) 49-52.

## 著者プロフィール

昭和45年 浦和市 (現、さいたま市) 生まれ  
 平成2年 埼玉大学経済学部中退  
 平成6年 東京大学 理学部卒業  
 平成9年 東京大学大学院工学系研究科  
 博士課程中退  
 平成9年 東北大学金属材料研究所 助手  
 平成15年 東北大学多元物質科学研究所 助教授  
 平成23年 東北大学 金属材料研究所/  
 未来科学技術共同研究センター 教授  
 兼任した職  
 仏国 リヨン1クラウドベルナル大学 客員教授  
 伊国 ミラノ・ビッコカ大学 客員教授

結晶化学、固体化学、光物性を基盤として、酸化物、ハロゲン化物などの無機固体結晶の新物質開発を行っている。シンチレータ結晶の他、レーザー・非線形光学結晶や圧電結晶などの新物質開発およびそのバルク単結晶技術の開発を主な研究テーマとしている。

趣味: 空手、スキューバダイビング、スキー、サッカー等。

好きな言葉: つくれなければ価値はない

## 放射線量計測の基礎 (2)



細田 正洋\*

### 5. ドシメトリック量

ここでは、照射線量、カーマ、吸収線量について整理する。ICRU報告書85a<sup>10)</sup>では、他にもシーマと命名された量も扱われているが、我が国の(放射線防護に係る)制度設計では使われておらず実用上の利用も限られるため省略する。

#### 5.1 照射線量

現在は公式に使われることのない量であるが、最も初めに導入された線量である。ICRUによって1980年に報告された報告書33までの照射線量に関する歴史的背景についてはGreening<sup>1)</sup>や加藤<sup>9)</sup>によって整理されている。まずは照射線量に関する詳細な説明の前に、これらの文献を適宜引用しながら歴史的な背景について整理したい。国の放射線量計測に係るトレーサビリティは、今日においても実際上照射線量をベースとして行っているといえるので重要である。

1895年にビュルツブルグ大学のW. C. RöntgenがX線を発見して以来、多くの研究者によって放射線研究が行われた(ただし、J. J. Thomsonが電子を発見したのはX線発見の2年後のことである)。初期のX線や電子線研究は、気体の電離によって生じたイオンを電極に収集することで検出するといった方法であった。1908年にVillardは、照射線量の起源ともいえる、「0°C、760 mmHgで1 cm<sup>3</sup>の空气中に1 静電単位(e.s.u)の電荷を発生する総量」をX線の“量”の単位として提案した。当時の研究対象はX線のみであり、X線による生物効果を定量しなかったことが発端である。この量の中で定義物質として

空気が用いられているが、これは身近にある普遍物質と考えられたことに由来する。当時は、X線の空気に対する効果量を考えることが生物効果を考える上で重要であった。

1925年に第1回国際放射線会議(International Congress of Radiology: ICR)がロンドンで開催され、この場でX線の量と単位の導入に関する検討が行われた。また、この会議でICRUの前身である国際X線単位委員会と、ICRPの前身である国際エックス線ラジウム防護委員会が設立され、1928年に、X線の量と単位をどうするかが議論され、“X線の量の単位”としてr(レントゲン)が提唱された。しかし国によって単位rの決め方が異なったので、1938年にそれを統一し、初めて国際単位としての統一されたrの定義が示されることとなった。この頃の研究者はX線のみではなくRaから発生するγ線に対する生体への問題についても興味となっていたため、この単位はγ線の量にも適応された。1954年のICRU報告書7では、X線・γ線の“量”から“線量”となり、1956年のICRU報告書8ではX線・γ線の線量から照射線量へと短期間で改定が繰り返された。ここでいう照射線量は英語でexposure doseと表記されていたもので、電氣量を基本の物理量(空気の電離能)として定義されたものである。しかし、ICRUは後に線量を基本の物理量としてエネルギーとする方式に改めた(基本となる線量を照射線量から吸収線量に切り替えたということ)ので、exposure doseからdoseを削除し、単にexposureと呼ぶことにした<sup>12)</sup>。我が国ではexposure doseに対して

\* Masahiro HOSODA 国立大学法人弘前大学大学院 保健学研究科 医療生命科学領域 放射線生命科学分野・講師



もexposureに対しても“照射線量”という呼称を使い続けているので、このような背景を正しく理解することが困難になっている<sup>12)</sup>。さらにこのICRUではexposure doseの定義に“単位体積当たりの電離能”を使ってきたが、呼称を改めるにあたって定義を“単位質量当たりの電離能”に変更した<sup>12)</sup>。その上、国際度量衡委員会が単位系をSI単位系に切り替えたのを受けて、röntgenの単位名は残すものの、記号と定義を $1\text{ R} = 2.58 \times 10^{-4}\text{ C kg}^{-1}$ に変更した<sup>12)</sup>。exposure doseという量を廃し、新たにexposureという量を導入する形をとったのである<sup>12)</sup>。その後、電離性放射線の基本量と単位に関しては、1980年にICRU報告書33、1998年にICRU報告書60が刊行されており、多くの教科書には報告書60の定義が記載されている。2011年のICRU報告書85aでは、定義そのものの文章は報告書60と大きな違いはないが、定義物質が空気から乾燥空気へと修正された。exposure doseの定義には“標準状態の”という形容句がつくことが陰に陽に認められていた<sup>12)</sup>。しかし、exposureの定義に使われた空気にこの断りが明示されなかったことで、評価に必要な空気のW値が湿度依存であることに無頓着なデータ処理が続出したため、ICRU報告書85aではこのような変更がなされたのであった<sup>12)</sup>。今後は適宜教科書類も改訂されていくであろう。

原理的には、光子のエネルギーが高くなると陽・陰ミューオンの対生成や光核反応による荷電粒子の生成も起こりうるが、ICRUの体系はそのような高エネルギーの世界は対象外としている。照射線量は「乾燥空気の単位質量当たりに光子によって放出された電子・陽電子全てが乾燥空気中で完全に停止するまでに発生させた正負どちらかのイオンの平均全電荷量の絶対値」として定義される。つまり照射線量は、「着目する光子束の作用相手を乾燥空気とし、そこで生じるイオン対数の大小でもって、その光子群の作用能力の強さを判定するための基準にしよう」という量である。照射線量 $X$ は(3)式で表される。

$$X = \frac{dq}{dm} \quad (\text{C kg}^{-1}) \quad (3)$$

ここで、 $q$ は光子によって放出された電子・陽電子全てが乾燥空気中で完全に停止するまでに発生させた正負どちらかのイオンの平均全電荷量の絶対値、 $m$ は着目微小領域における乾燥空気の質量である。さらに、照射線量 $X$ は(4)式のように示される。報告書60では、照射線量は空気衝突カーマを空気のW値で電離密度に換算したものであると説明されていたが、報告書85aでは両者の関係が近似に過ぎないことが示された<sup>10), 13)</sup>。

$$X \approx \psi \cdot \left( \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} \right) \cdot (1-g) \cdot \left( \frac{e}{W} \right) = \psi \cdot \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right) \cdot \left( \frac{e}{W} \right) \quad (\text{C kg}^{-1}) \quad (4)$$

ここで、 $\psi$ はエネルギーフルエンス ( $\text{J m}^{-2}$ )、 $\mu_{\text{tr}}/\rho$ は質量エネルギー転移係数 ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ )、 $g$ は制動放射の割合、 $e$ は電気素量 ( $1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$ )、 $\mu_{\text{en}}/\rho$ は質量エネルギー吸収係数 ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ )、 $W$ は乾燥空気のW値である。現在、乾燥空気の電子に対するW値は $33.97 \pm 0.05\text{ eV}$ と高精度に求められている。

W値とは「荷電粒子の気体中における1イオン対生成当たりの平均消費エネルギー」を意味するが、多くの教科書類には「1イオン対を作るのに必要なエネルギー」のような記載が多い。これではW値は電離に必要なエネルギー（電離エネルギー）と同じ量であるとの誤解を生じさせる。荷電粒子が1イオン対を生成させるには物質中で電離が生じる必要があるが、物質中に入射した荷電粒子は必ずしも最初に電離をするとは限らず、励起によってエネルギーを失うし、制動放射によってエネルギーを失うかもしれない。このように荷電粒子は様々な過程を経てエネルギーを失うが、1つのイオン対は電離のみによって作られるので、W値は荷電粒子のイオン対生成当たりの“平均”消費エネルギーなのである。

照射線量の概念を図4<sup>8)</sup>に示す。この図から分かるように、定義中の平均全電荷量とは着目している微小領域 $dm$ 内の平均全電荷量ではなく、 $dm$ 内で発生した電子・陰電子が完全に停止するまでに（完全に停止した場所が $dm$ 外であっても）発生させる全電荷量の期待値である。また、照射線量の定義には、光子の相互作用によって発生した二次（以降）電

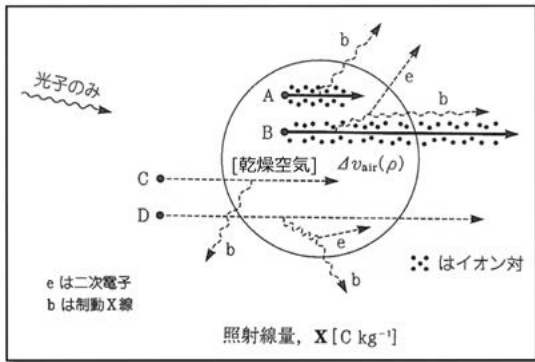


図4 照射線量の概念<sup>8)</sup>

子（光電子やコンプトン反跳電子など）による制動放射（図中の記号b）は含まれない。さらに、dm外で発生しdm内に入ってきた光子による電荷も含まれない（図中のC及びD）。さらに、前述のように高エネルギー領域でみられる光核反応による電荷生成も含まれない。

ICRU報告書85aにおける線量関連の記述の中で定義物質が乾燥空気と限定されているのは照射線量のみであるが、空気以外の物質中であってもそこに空気があると仮想的に考え、そこで発生したであろう二次電子が乾燥空気中で作り出すであろう電荷量を考えることで“水中”や“組織中”といった任意の媒質中の任意の位置での照射線量というものが測定・評価される。

国の計量に係るトレーサビリティ確立等において放射線量計測の一次標準を担っているのは国立研究開発法人産業技術総合研究所である。そこでは平行平板型自由空気電離箱を用いた照射線量の絶対測定が行われているが、この測定が実現できるのはX線管の加速電圧が30 kVから300 kVで発生したX線のエネルギー（最大エネルギーが30 keVから300 keV）とされている<sup>1)</sup>。これは、現実的に照射線量の絶対測定を可能とする計測上のX線のエネルギー範囲であり、照射線量の定義自体にはX線のエネルギーは限定されていないことに注意が必要である。さらに、照射線量の定義自体には、荷電粒子平衡の成立は関係がない。これも、平行平板型自由空気電離箱を用いて照射線量の絶対測定を実現させるために必要な計測上の条件にしかすぎない。

ICRUが報告書85aで行った照射線量の定義

に関する修正点の詳細は、レポート作成委員であった多田によって既に本誌で解説されている<sup>13)</sup>ので参照されたい。

## 5.2 吸収線量

照射線量と同様に吸収線量についても文献<sup>1,9)</sup>を適宜引用しながらまずは歴史的な背景から整理したい。1951年にICRU報告書6では、当時の研究・利用対象はX線のみでなくα線やβ線、中性子線が利用されるようになった。そこで、光子のみを対象としている照射線量のみでは不十分となり、線量を“吸収エネルギー密度”で表現することとした。その単位はerg g<sup>-1</sup>である。なお、1 erg = 10<sup>-7</sup> Jである。1954年のICRU報告書7で物質中における吸収エネルギー密度を“吸収線量”と命名し、その単位をrad (radiation absorbed doseの頭文字をとってつくられた) とした。ここで、1 radの定義は100 erg g<sup>-1</sup>である。1968年のICRU報告書11では、単位の国際単位系 (Le Système International d'Unités: SI) 化にともない、吸収線量のSI単位はJ kg<sup>-1</sup>であるとした。ただし、radは1980年のICRU報告書33までは併用が可能であった。2011年のICRU報告書85a<sup>10)</sup>に書かれている吸収線量の定義は、「物質の単位質量当たり放射線によって付与された平均エネルギー」である。吸収線量Dは(5)式で表すことができる。

$$D = \frac{d\epsilon}{dm} \quad (\text{J kg}^{-1}) \quad (5)$$

1975年の国際度量衡総会において、ICRUが導入した特別の単位グレイ (gray: 記号はGy) の使用が承諾され、現在でもGyが一般に使用されている。この特別名称は吸収線量の測定原理であるBragg-Grayの空洞理論としてよく知られている英国のL. H. Grayの功績を称えてつけられたものである。ただし、この単位グレイは吸収線量だけに使われるものではないことに注意する必要がある。吸収線量は定義式を見ても分かるように、空間的微分量であるので、物体の内部では、場の量（時空座標に一意に対応して値が決まる量）となる<sup>12)</sup>。ICRPでは人体臓器の線量値としてはその臓器についての平均値を使用することとしている<sup>12)</sup>。

また、光子線に対する吸収線量はエネルギー

フルエンス $\psi$ と質量エネルギー吸収係数 $\mu_{en}/\rho$ を用いて(6)式のように表すことができる。

$$D = \psi \cdot \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \quad (\text{J kg}^{-1}) \quad (6)$$

(6)式から分かるように、着目領域の単位断面積当たりに運ばれてきた光子エネルギー（エネルギーフルエンス）と物質の単位質量当たりどれだけの割合のエネルギーが真に物質に付与されるのか（質量エネルギー吸収係数）が分かれば吸収線量が評価できるということである。光子エネルギーに対する各種物質の質量エネルギー吸収係数として米国標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology: NIST）の推奨値<sup>14)</sup>が使われることが多い。荷電粒子の場合には、「各エネルギー成分のフルエンスと質量衝突阻止能の積の総和」で求められる。

定義を見ても分かるように、吸収線量は対象となる放射線の種類や物質が限定されていない。同じ放射線が入射しても作用相手の物質が異なることでその物質に付与するエネルギーが異なるため、吸収線量を表現する場合には、水吸収線量や組織吸収線量のように必ず作用物質名を付記する必要がある。

吸収線量の概念を図5<sup>8)</sup>に示す。この図を見て分かるように、吸収線量は荷電粒子による物質へのエネルギーの付与が着目領域内であれば、荷電粒子の発生がどこで起こったかは関係がない（この点は照射線量と異なる）。吸収線量に寄

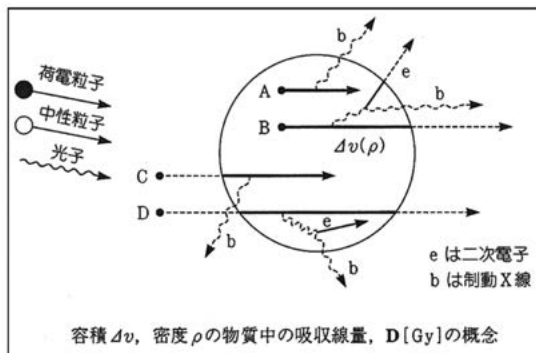


図5 吸収線量の概念<sup>8)</sup>。光子や中性粒子の場合には、A～Dは中性粒子や光子が物質と相互作用した結果発生した二次荷電粒子を意味すると考えればよい。図6も同様である。

与するエネルギーは以下の4通りに分けられる。

- ① 図中のAは着目領域内で荷電粒子が生じ、そのエネルギーは着目領域内で全て使い果たされている。
- ② BはAと同じように着目領域内で荷電粒子が生じているが、そのエネルギーは着目領域外で使い果たされている。この場合、着目領域外での使い果たしたエネルギー分は吸収線量には含まれない。
- ③ Cでは、着目領域外で生じた荷電粒子が着目領域内でエネルギーを使い果たされている。この場合には着目領域に入射する以前に失ったエネルギーは吸収線量には含まれない。
- ④ Dでは、Cと同様に着目領域外で生じた荷電粒子が着目領域内に入射し、着目領域外でエネルギーを使い果たされている。この場合には着目領域に入射する以前と着目領域外で出て失ったエネルギーは吸収線量には含まれない。

また、制動放射によって領域内で発生した制動X線が相互作用することでさらに発生した荷電粒子（電子）の物質へのエネルギー付与も吸収線量には含まれる（図中のD）。なお、核反応で生成される荷電粒子や核反応そのものによる“エネルギー付与”への寄与に関する議論については本稿では省略する。

放射線生物や放射線医学関連の学会発表において、“細胞への照射線量 (Gy)” や “患者への照射線量 (Gy)” との表現をよく聞くがこれは誤った使い方である。これは、“細胞に対する吸収線量が〇〇GyとなるようにX線を照射した”とか“患者のがん組織に対する吸収線量が〇〇GyとなるようにX線を照射した”という意味で使用していることは理解できるが、物理量としての照射線量の単位はC kg<sup>-1</sup>でありGyではない。線量に係る情報の伝達には、量の名称（またはそれと分かる記号）と数値及び使用している単位、の3点全てを揃えることが必要なのである。

### 5.3 カーマ

カーマ(kerma)の語源は、1959年のICRU報告書9に見るように「Kinetic Energy Released in Material」であり、邦訳として適当な用語がなかつ

たため“カーマ”とされた<sup>8)</sup>。加藤によれば<sup>12)</sup>、kermaは、光子についての線量として使われていたexposureをエネルギー量として表現し直すことを目的にRoeschが創出したkermを、中性子についての線量として60年代まで米国を中心に使われていた“衝突線量”をも吸収し、非荷電粒子線一般に使用できるpseudo-dose (擬線量)としてICRUが創出したものとのことである。ICRUは、擬線量 (線量擬きの量)と線量を併せてdosimetric quantities (我が国では「線量計測量」と訳されている)と呼んでいる。核の意味をもつドイツ語のkernとの混同を避けるためkermとはせずkermaとされたとGreeningの教科書には書かれている<sup>8)</sup>。1962年のICRU報告書10aでは、ReleasedからLiberatedへと変更になったが現在でもkelmaとはせず、kermaとして使用されている<sup>1)</sup>。中性子線や光子線は非荷電粒子線であるため、物質系に対するエネルギー付与は、高エネルギーの場合や核分裂などの核反応を除いて、物質系の構成要素である粒子との相互作用の結果生成される二次 (及び三次以降)荷電粒子線による電離や励起が原因である。非電離放射線の物質へのエネルギー付与過程を整理すると次の2段階に分けられる。

第1段階：非荷電粒子線のエネルギーが荷電粒子の運動エネルギーへと転移する。

第2段階：これらの荷電粒子線が電磁相互作用を介して物質にエネルギーを与える。

第2段階でのエネルギー付与は吸収線量でもって表すことができるが、第1段階でのエネルギー付与を考える上で必要な量としてカーマはICRUによって導入された<sup>1)、15)</sup>。つまり、「非荷電粒子線と物質との相互作用によって発生し、直接電離によって吸収線量に寄与するであろう荷電粒子のエネルギー総和」を知る上でカーマが必要な量である。

カーマはICRU報告書85a<sup>10)</sup>によって、「物質の単位質量当たりに入射する非荷電粒子によって微小領域内で発生した全ての荷電粒子の初期運動エネルギーの総和」として定義されている。実際には測定することができない量である。したがって、電離量から照射線量を求めカーマに換算している。カーマの定義式は(7)式で表される。

前述の導入経緯にあるように、カーマは非荷電粒子線を対象としているが、対象物質の選択には制限がない。したがって、吸収線量と同様にカーマを表現する場合、“空気カーマ”や“水カーマ”のように物質名を付記する必要がある。

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (\text{J kg}^{-1}) \quad (7)$$

カーマのSI単位は吸収線量と同じJ kg<sup>-1</sup>であり、その特別名称もGyである。また、カーマはエネルギーフルエンス $\psi$ と質量エネルギー転移係数 $\mu_{tr}/\rho$ を用いて(8)式のように表すこともできる。

$$K = \psi \cdot \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \quad (\text{J kg}^{-1}) \quad (8)$$

カーマの概念を図6に示す。図に示すように、カーマの概念は着目領域内で発生した二次荷電粒子のエネルギーのみを考えている (図中のA及びB) 点において非常に明解である。したがって、着目領域外で発生した二次荷電粒子のエネルギーは含まれない (図中のC及びD)。さらに、着目領域内で発生した二次荷電粒子が制動放射によってその後失われるエネルギーもカーマには含まれる。

非荷電粒子線と対象物質との相互作用によって発生した二次荷電粒子線の物質中でのエネルギー損失は、電離や励起による衝突損失と制動放射による放射損失とに分けられる。二次荷電粒子線の衝突損失のみを考慮 (放射損失が無視できるような場合)して修正したカーマを衝突カーマという。したがって、衝突カーマは「着目領域の単位質量当たり発生した二次荷電粒子のもつ運動エネルギーのう

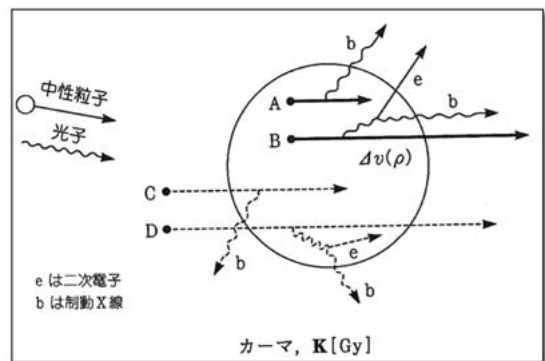


図6 カーマの概念<sup>8)</sup>

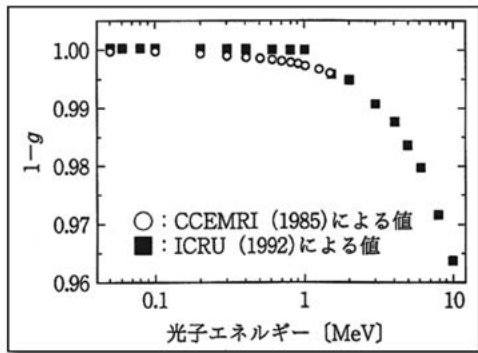


図7 光子エネルギーと空气中で発生する制動放射線との関係<sup>15)</sup>。図中のCCEMRIはThe Consultative Committee for Measurement Standards of Ionizing Radiations(国際度量衡委員会傘下の電離性放射線測定標準諮問委員会)の略である。

ち、物質へのエネルギー付与に関連する電離、励起のみによって失うであろうエネルギーの総量」を表しているの、荷電粒子平衡が成立するような条件下では吸収線量の近似量として用いられている。

光子エネルギーと空气中で発生する制動放射線との関係を図7に示す<sup>16)</sup>。この図では、光子によって空气中で発生した二次電子の運動エネルギーのうち、制動放射線として失われる割合 $g$ を $(1-g)$ として示したものである。光子線のエネルギーが高い程、同じ物質中であっても制動放射の影響が大きくなるのが分かる。環境中に存在する天然放射性核種から放出する $\gamma$ 線の実質的な最大エネルギーは<sup>208</sup>Tlの2.61 MeVである。図7から分かるように3 MeV程度の $\gamma$ 線エネルギーに対する $(1-g)$ の値は1%程度であり、したがって実環境中では制動放射は無視できるといえる。その結果、自然放射線場における放射線量計測では空気吸収線量と空気カーマはそれぞれの近似値として取り扱うことができる。

#### 5.4 各量の関係

これまで説明した各量の相互関係を図8に整理する。各量の関係性については前述の通りであるのでここでは詳細を省略するが、既に何度か出てきている荷電粒子平衡の概念<sup>17)</sup>について示す(図8)。荷電粒子平衡とは、「着

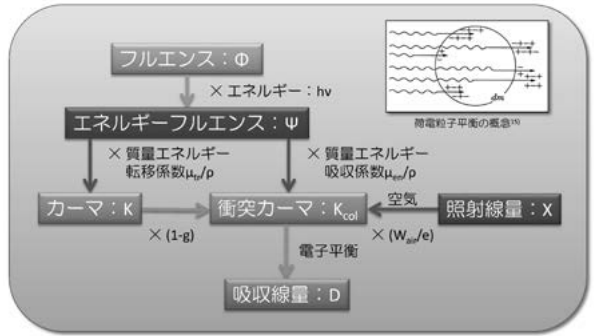


図8 各量の相互関係

目する領域において領域外から入射する荷電粒子(二次電子)が領域内での電離によって生成するイオン対数と着目する領域内から外へ出た荷電粒子が電離によって生成するイオン対数とが釣り合っている状態」をいう。媒質の密度の粗密には依存しないが、組成は均質、一様であることが条件である。

#### 参考文献

- 1) J. R. Greening著, 森内和之, 高田信久訳: 放射線量計測の基礎, 地人書館, 東京都(1993).
- 8) 森内和之: 放射線ものがたり, 裳華房, 東京都(1999).
- 9) 加藤和明: 放射線の量と単位に関するICRU勧告-その過去、現在および未来-, RADIOISOTOPES, 32: 127-134 (1983).
- 10) International Commission on Radiation Units and Measurements. Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (ICRU Report 85a-Revised). Journal of ICRU, 11 (1a):1-30 (2011).
- 12) 加藤和明: 私信(2015).
- 13) 多田順一郎: 電離性放射線の基本量と単位に関するICRUレポートの改訂②, FBNews. 419: 7-10 (2011).
- 14) J. H. Hubbell, S. M. Seltzer: Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (version 1.4), <http://physics.nist.gov/xaamdi>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2004), (2015年3月20日閲覧可).
- 15) 小田啓二: 連載講座「放射線防護に用いる線量概念について」第1回 物理量, 保健物理, 43 (1): 36-40 (2008).
- 16) 西谷源展, 山田勝彦, 前越 久: 放射線秘術学シリーズ 放射線計測学, オーム社, 東京都(2004).
- 17) 多田順一郎: わかりやすい放射線物理学 改訂2版, オーム社, 東京都(2011).





ー メディポリス国際陽子線治療センターの巻 ー



九州の南端にある指宿市は豊富な湯量に恵まれた指宿温泉や砂むし風呂、鹿児島湾、東シナ海からの新鮮な魚介類を堪能できる南九州でも有数の観光スポットです。この指宿市を一望できる高台にある医療とリゾートを融合させた施設、『メディポリス国際陽子線治療センター』を訪ねて参りました。

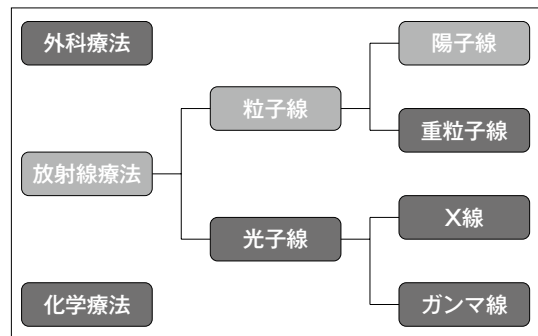
今回訪問したメディポリス国際陽子線治療センター（以下 センター）は、「メディポリス指宿」という「南九州から世界に向けて“光”を放つ医療」をコンセプトとした一大プロジェクトの基に開設され、センターではその一角となる先進医療を担い、陽子線による粒子線治療を行っています。「メディポリス指宿」の構想は、具体的には医療以外に「予防医学」、「こころのケア」および「創薬研究」の分野を柱として、展開しています。

なお、メディポリスの「メディ」は医学、「ポリス」は都市を意味し、医学の面から人間を心身ともに健康にするという「医療都市」を掲げた名称とのことです。

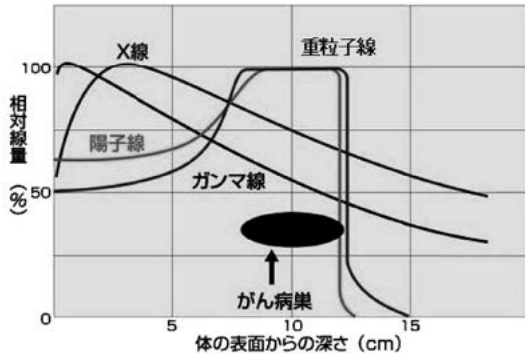
粒子線治療

がんの3大治療といえば「外科療法」、「化学(薬物)療法」および「放射線療法」がありますが、センターは陽子線治療に特化した医療機関となります。医療関係者の方々は粒子線治療についてご存知かと思いますが、振り返って粒子線治療について簡単に述べさせていただきます。

粒子線は、水素原子イオン（陽子またはプロトンとも言います）や炭素原子イオンなどの粒子の流れです。これらの粒子をシンクロトロンなどの加速器により光速近くまで加速し、がん病巣に向けて照射します。粒子線は、がん病巣のみに狙い撃ちできるため、まわりの正常組織への影響を最小限に抑えることが



主な放射線治療体系



上表は各線質の生体内での分布となります。体表面から10cmの深さにあるがん病巣付近に陽子線、重粒子線のピークが見られます。

可能です。米国では、80年代から陽子線を用いた治療が行なわれ、良好な治療成績が得られており、センターでも陽子線を用いた粒子線治療を行ないます。治療中は痛みや熱など何も感じる事はありません。

一般的にがん治療に利用される粒子線治療の特徴は、粒子線がブラッグピークというエネルギー放出の物理学的な特性を有しているため、がん細胞に対して集中的に致死的ダメージを与える事ができ、根本的ながん治療が可能であるという点にあります。

## 施設見学

施設見学の前にセンターのプロモーションビデオを編集部一行で視聴して予習した後、事務長の田中克孝様の御引率により施設見学させていただきました。センターは丘陵地帯に建てられているため、建屋正面にある駐車場から入ると地下1階となり、このフロアに3つの治療室、操作室およびシンクロトロン施設がゆったりとしたスペースに配置されています。広い廊下と仕切壁のない操作室により圧迫感が無く、きれいに整頓されており治療エリアとは思えない清潔な空間が我々を迎えてくれました。駐車場からセンター右側に

あるスロープ（もしくは階段）を登った入口が1階となり、ここに受付があります。受付エリアは吹き抜けで高い窓からメディポリスの広大な敷地を見下ろす事ができます。白基調であしらわれたエリアは採光も十分に取られており、こちらも清潔感があふれ、ホテルのロビーにいるような印象を受けました。

施設、設備のご説明を田中事務長から受けながら、センターにおける治療適応等について教えていただきました。陽子線治療適応の基本原則としては病期Stage I、IIという発生部位に局限し、転移していない部位が対象となっているそうです。但し、転移があっても原発巣や転移巣を治療することによって、患者のQOLが高まり、あるいは進行を抑える事ができると判断された場合も適用可能とされています。治療実績の多い部位は前立腺で、肝・胆管、肺と続いているそうです。また、早期発見が難しく身体の奥深くにあるすい臓がんを陽子線のメリット（ブラッグピーク）を活かして治療をしており、さらにこれまでに粒子線治療が困難な乳がんへの応用研究もされているとの事でした。

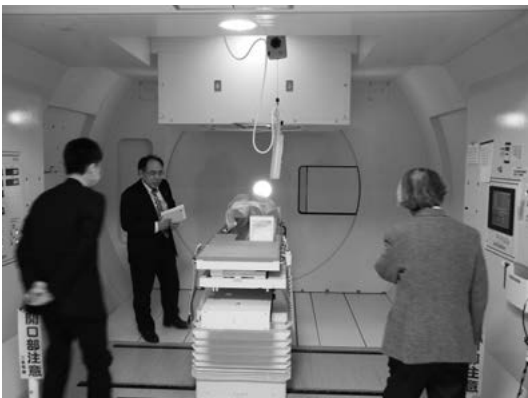
患者の立場からしてみると粒子線治療が自分にとって納得できる治療なのかどうか、治療費がいくらかかるのかが気になる所ですが、これについても説明をしていただきました。



センター 入口付近



治療室前



治療室内  
田中事務長(中央)より説明を受ける

適応可能かどうかについてはかかりつけ主治医からの紹介状や必要な資料を元にセンターの専門医によるセカンドオピニオンが行なわれます。つまり、患者が自分のがんを良く知り、自ら治療法を選択し納得した治療を受けるために主治医以外の専門医と相談し、その中で陽子線治療が最善と判断されれば適応となるとの事でした。陽子線治療ではなく、手術が最適となるケースもあるのでセカンドオピニオンが重要である事を教えていただきました。治療費については各種検査なども合わせて約300万円かかるそうです。かなり高額ではありますが、民間のがん保険(先進特約)に加入されていると陽子線治療費は保険でカバー出来るので安心との事です。

治療期間についてはがんの状態により同一部位でも違いはありますが、準備期間と合わせて前立腺がんの場合で5.6～8週間、肝・胆管がんでは2～7.6週間、肺がんの場合は2～8週間ほど掛かるそうで、照射は原則1日1回行なわれます。照射時間は1分～5分/回程です。このため通院による治療も可能です。しかし、ここは指宿市、九州の南端に位置しています。訪問当時では1,350名の治療実績が有り、そのうちの600名ほどが鹿児島県内から来られているそうです。近隣県以外から来られる場合、鹿児島空港からの移動ルートでリムジンバスを利用するとJR指宿駅まで95分程度。そこから「メディポリス指宿」までは車で12分程度。他方JR鹿児島中央駅からJR指宿駅までは特急利用で55分掛かり、それなりの距離があります。

そのため、遠方から来られる方のためにゆっくりと治療を受ける事ができるよう、文頭でも述べました『医療とリゾートの融合』の通り、「メディポリス指宿」敷地内には宿泊施設である、『指宿ベイテラス Hotel & SPA』がセンターに隣接しております。今回の施設訪問では拝見する事はできませんでしたが、リゾート滞在型医療として心と身体の癒しの時間を過ごせる施設となっています。

---

### 粒子線治療装置

---

治療室を見学させていただいたあと、陽子線の生成から治療室への照射ラインを形成する設備が設置されているバックヤードに移りました。工場を思わせる広い空間に複雑な機械が整列されて設置してあります。陽子線治療装置は高度の治療を行なうために以下の工程毎に様々な構成から成り立っています。

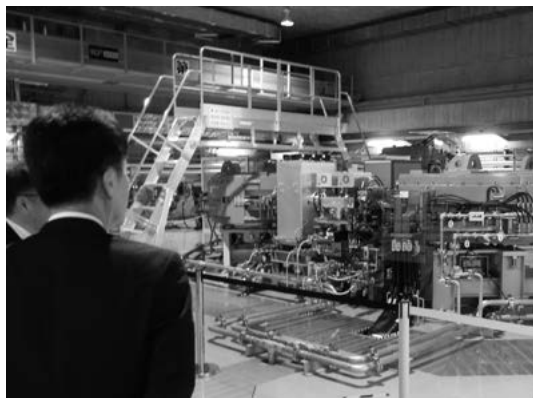
- ◇陽子線を生成し、初期加速を行なう入射系
- ◇陽子線をシンクロトロンに輸送するまで

の低エネルギービーム輸送系

- ◇治療に適合したエネルギーまで陽子線を加速するシンクロトロン系
- ◇照射室に効率良く輸送する高エネルギービーム輸送系
- ◇標的形狀に陽子線を成型する照射系機器（ビームライン機器）
- ◇陽子線の調整、運転管理、状態監視等を統括して司る制御系

日々の治療では安全で正確な照射ができる様にこれら機器が正常に稼動しなければなりません。このため、8名のメカ技術者の方が在籍され、保守サポートを実施されています。

なお、このバックヤードを含め治療室は放射線管理区域として設定されていますので、



シンクロトロン



高エネルギービーム輸送系  
(回転ガントリー)



前列中央右 菱川良夫センター長  
右隣 荻野尚センター長代理  
編集部一行 (前列中央左 中村 ほか編集委員 3名)

遮蔽能力は十分に考慮されている必要があります。そのため壁は最も厚い所で3.6mもあるそうで、建屋建設に使われたコンクリートはミキサー車7,800台分にも及んだそうです。

施設からの帰り道では、見事な円錐形の山容から別名“薩摩富士”とも言われる開聞岳(かいもんだけ)の姿を池田湖から眺めることができました。

最後に、お忙しい中、貴重なお時間をいただいたセンター長の菱川良夫医学博士、センター長代理の荻野尚医学博士に、また見学時に施設説明をしてくださいました事務長の田中克孝様にこの場を借り厚く御礼申しあげます。



池田湖から開聞岳を望む

## 電源ベストミックスを考える

元・原子力委員 町 末 男



11年の大津波で甚だ残念な福島第一原発の過酷事故が起こり、現在日本の全ての原発がとまっている。それを代替えるための、石炭、天然ガスの輸入に年間3兆6兆円が海外に流れ、日本経済の大きな負担となっている。安全を確認した原子力発電の早期再稼働が必要である。

力の比率は半分以下に下がり、福島事故前に比べても、7-9ポイント下がっている。一方、再生エネが増えている。これによって懸念されるのは電力の高コスト化である。日本企業の国際競争力が低下するのが心配である。経団連は供給安定性とコストの点から、原子力25%、再生エネ15%とする事を提言している。

### 電源のベストミックス

福島第一原発事故の前2010年に経産省が策定したエネルギー基本計画では電源の53%を原発で賄うというものであった。事故の後、状況は変わり、経産省は昨年から有識者会議で2030年の電源構成が如何にあるべきかを検討して来た。最近4月28日にその結論が発表された。

それによると、原子力20-22%、再生エネルギー22-24%、天然ガス27%、石炭26%、石油3%である。発電が安定しており、コストの安いベースロード電源（石炭・原子力・水力・地熱）の比率は56%である。これを踏まえて5月中旬に政府案が決定されると思われる。

### 発電コストの新試算—原子力は最低コスト—

また、経産省は電源別の発電コストを再試算し、4月に同会議に報告している。これによると、1kW・時当たり原子力が10.1円で最も安く、石炭12.3円、天然ガス13.7円、地熱19.2円、陸上風力21.9円、太陽光24.3円となっている。原子力はより厳しい安全基準に対応するため前回11年の試算8.9円より上昇した。

11年のエネルギー基本計画に較べると原子

### 世界の原子力発電は増えている

今年4月の原産大会で講演したIAEAの天野事務局長はいま世界30か国で443基の原発が運転されており、今後数十年間その数はエネルギー需要の増大温暖化防止に應えるため増加し続けると述べている。原発を持っている30か国の内13か国が新原発を建設中で、12か国が増設を計画中であるという。建設中の65基の内3分の2がアジア地域に集中している。特に多くの人口を抱え、発展のために多量の電力を必要とする中国とインドは現在65-70%の電力が石炭火力でつくられ、多量の温暖化ガスを排出している。そこで両国では、電力の安定供給、温暖化ガス削減の目的で原発を大幅に増やしつつある。

また、アラブ首長国連邦（UAE）、ベラルーシやトルコなどが初めての原発の建設を始めしており、ベトナム、バングラデシュ、ポーランド、カザフスタン、サウジアラビア王国などが初めての原発建設計画を進めている。

日本の「エネルギー基本法」は「安定供給」、「経済性」、「環境への優しさ」そして「安全」を基本的要件としている。

国際的動向、日本の経済とエネルギー安全保障、気候変動抑止、安全確保を合理的に考慮して、最適な電源構成が決定されなければならない。（2015年5月1日稿）



図書紹介

マンガ ボクたち私たちが考える 放射線

発行：学校法人島津学園 京都医療科学大学  
 定価：200円 2014年10月発行

この冊子は、2011年3月11日に起こった東日本大震災から始まる60ページからなるコミックです。福島第一原子力発電所から50km離れた町の中学校を舞台に、2年生の生徒たち男女4人が主人公の物語です。

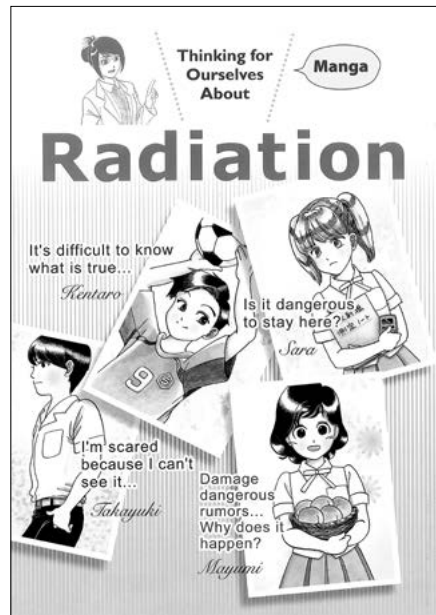
4月、新学期が5日遅れで始まり、続く余震や放射線への不安と向き合う生活が続きます。やがて“正しい情報を得ることが大切”と放射線について学び始めます。生徒たちが自ら放射線について調べ、授業の場で発表することにより、クラス全体で放射線の知識をお互いに共有していきます。そこから、それぞれ自分の考えを持ち、お互いの考えを尊重し合えるようになります。「知ること 学ぶことを続けていくこと…自分たちの大切な未来をつかむために…」という言葉で物語は締めくくられています。

表紙をめくると、まず「放射線について考えるきっかけをあなたに——」というメッセージが目に飛び込んできます。「マンガ」なのでとても読みやすく、放射線の基礎的な内容もわかりやすく書かれており、年齢を問わずに手に取りやすい一冊となっています。

また、この冊子は英語版も発行されています。 (長谷川 香織)



<日本語版>



<英語版>

サービス部門からのお願い

## 平成26年度「個人線量管理票」のお届けについて



平素より弊社のモニタリングサービスをご利用くださいますこと誠にありがとうございます。

平成26年度の「個人線量管理票」は、第4・四半期を含む計画使用期間（平成27年3月）のモニタの測定結果報告書出力時点で作成し、個人線量報告書と共にお届けしております。

この度、平成27年7月1日現在で「個人線量管理票」をお届けしていない方に対しては、返却されていない計画使用期間に「未返却」と表示させていただき、お届けする予定です。

お届けする時期は7月中旬を予定しております。

なお、使用期間の終了したガラスバッジがまだお手元にございましたら、早急にご返却くださいますようお願いいたします。

## 編集後記

● 風薫る新緑の季節、草木の緑は目の疲れを癒し、身も心にも安らぎを与えてくれる素晴らしい気候になりました。皆様はこの季節をどのように楽しまれていますか？私は長野県安曇野市に出向き、信濃大町を流れる高瀬川と北アルプスを望む安曇野盆地からの広大な景色を味わいながら、サイクリングをしてきました。本号が皆様のお手元に届く頃は、初夏を向かえ暑い日差しがふりそそいでいることと思います。

● 本号の巻頭は、「新規シンチレータ単結晶とそのバルク単結晶作製技術の開発」と題して東北大学金属材料研究所の吉川彰先生にご執筆いただきました。シンチレータの重要なパラメータである発光量、密度、蛍光寿命、エネルギー分解能等を考慮し3つの新材料について構成元素の設計と探索、試作、検証まで

の経緯を具体的に示していただきました。ここに至るまでの経緯には、かなりのご苦労があったものと思われます。

● 前号に引き続き、弘前大学の細田正洋先生から「放射線量計測の基礎」第2弾として、照射線量と吸収線量についてご執筆いただきました。フルエンス、カーマ等も踏まえ、各量に対して過去の文献を引用しながら歴史的背景を基に量の定義、単位の導入の経緯について詳しく触れられています。

● 鹿児島県指宿市にある「メディポリス国際陽子線治療センター」の施設訪問記を掲載しております。私共の訪問を快くお引き受けいただきました菱川センター長、荻野副センター長にあらためて心より感謝いたします。  
(五十嵐 仁)

## FBNews No.463

発行日／平成27年7月1日

発行人／山口和彦

編集委員／畑崎成昭 佐藤典仁 中村尚司 金子正人 加藤和明 五十嵐仁 加藤毅彦  
木名瀬一美 篠崎和佳子 長谷川香織 福田光道 安田豊 山瀬耕司

発行所／株式会社千代田テクノロ 線量計測事業本部

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4階

電話／03-3816-5210 FAX／03-5803-4890

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

印刷／株式会社テクノロサポートシステム

— 禁無断転載 — 定価400円(本体371円)