



Photo Kiranori Kirano

Index

エネルギーの将来「スピントロニクス」の挑戦……………	家田 淳一	1
RI治療病室の動向と展望……………	東 達也	6
〔コラム〕 24th Column 【フィルムからガラスへ】……………	中川 恵一	11
図説 量子ビーム・放射線利用 －第9回 放射線測定は考古学である（その1）－ ……	岡田 漱平	12
ガラスバッジ担当事務所の電話番号の設置と ガラスバッジお問い合わせ専用フリーダイヤルの変更……………		16
FBNews 新編集委員のご紹介……………		16
〔新刊紹介〕 「放射線施設廃止の確認手順と放射能測定マニュアル」……………		17
「FBNews」総合目次 その48 (No.517～528)……………		18
〔サービス部門からのお願い〕 測定依頼票が見当たらないときは…?……………		19

エネルギーの将来 「スピントロニクス」の挑戦



家田 淳一*

1. はじめに

昨今のように、ヒト・モノの移動が特に制限されると、日常生活でも電子機器を介した情報伝達の占める割合がおのずと大きくなる。私たちの身の回りにある電子機器は、その名のとおり、「電子」がもつ電気力をコントロールして使っている。だがその裏で、情報処理に莫大なエネルギーが費やされ、その負担が急速に増大していることに気づくことは少ない。もし、現在の技術のまま、まったく省エネルギー対策がなされない場合、情報関連だけで2030年には年間42PWh、2050年には 5,000PWhと、現在の世界の総消費電力の約24PWhを大きく上回るとも予測されている^[1]。すなわち、技術進歩なしでは情報関連だけで世界の全てのエネルギーを食い尽くしてもまだ不足するという恐ろべき事態が迫りつつある。「センサー 1 兆個の社会が到来する」ともいわれる将来、その電源をどうやって確保するか。この課題は、私たちの生活を維持する上で実に重要なテーマだ。そこで、電子の隠れた特徴「スピン」を活用する技術に注目が集まっている。スピンの性質を解き明かすとともに、その有用性を見出し、情報化社会に貢献するための研究が進められている^[2, 3]。

本稿では、このスピンを利用する技術「スピントロニクス」が、将来のエネルギー利用にもたらすと期待される技術進歩の可能性について紹介する。

2. スピンを使うエレクトロニクス

2.1 スピントロニクスとは

電子機器利用の母体となるエレクトロニクスは、

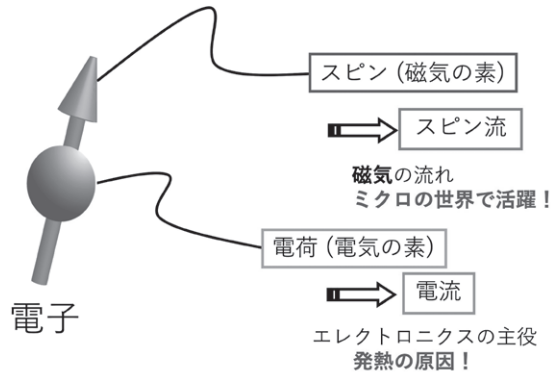


図1 電子のもつ性質「電荷」と「スピン」

両者をハイブリッドに利用するのがスピントロニクスである。

前世紀に花開いた量子力学の知見を基礎とし、半導体を中心とした固体物理学の成果に立脚している。それは、固体中の電子の流れ、つまり電流を制御し情報通信に応用する技術であり、現代社会に必須の基盤を提供する。個々の電子は、素粒子として電荷（電気素）のみならず固有のスピン角運動量（磁気素）をもっている（図1）。本稿の主題となる「スピントロニクス」とは、エレクトロニクスと磁気工学が微細加工技術により結びついたナノテクノロジーの新しい科学技術分野であり、次世代エレクトロニクスの実現に向け重要な役割を担うと考えられている^[4]。

2.2 電流とスピン流

その主役となるのが、スピン角運動量の流れ「スピン流」だ。電流は導体に電池をつなげば簡単に作ることができる。一方、スピンは元来量子力学と共に見出されたものであり、アップとダウンの「向き」をもつ。スピン流の利用には、その向きを

* Jun'ichi IEDA 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究主幹

そろえる「一手間」が要る。この一手間を見出し、スピン流を電流と同様に利用可能にすること、すなわち「スピン流の創出と制御」がスピントロニクスの主要な研究テーマとなる^[5]。

2.3 どのようにスピン流を作るか

スピンは磁性の源でもある。スピンの向きがそろった物質は一般に「磁性体」と呼ばれ、その一部、例えば鉄やコバルトなどは電気伝導性をもつ。このため、磁性体を選びそこに電流を流せばスピン流を作り出すことができる。ここまでは一見すると簡単だが、問題はその後である。このように作り出したスピン流は磁性体の外に出たとたん消えてしまう儚い存在なのだ。例えば図2のように、磁性体である鉄と磁性をもたない銅を接合させて電流を流すと、鉄で生じたスピン流は銅に入るとスピンの向きの支えを失い、わずか数百ナノメートルの距離（スピン拡散長）の間に消失してしまう。このため、長年スピン流の利用には大きな障壁が存在していた。

この壁に風穴を開けたのが、20世紀末に急速に進化した微細加工技術だ。「数百ナノメートルしか流れないのなら、その範囲に収まるように素子を小さくして利用すればよい」という発想の転換がスピンの利用に現実味を与えたのである。これが、本節の冒頭に述べたエレクトロニクスと磁気工学の融合したナノテクノロジーという説明の所以である。

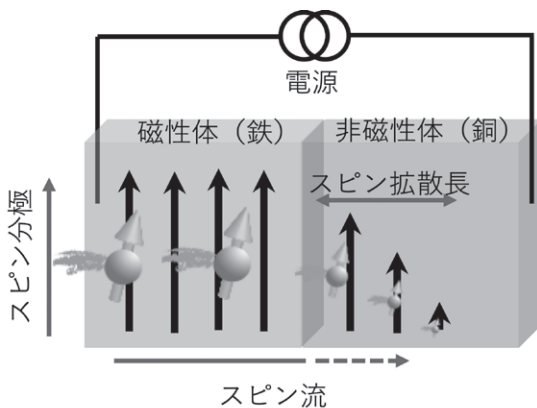


図2 磁性体を使ったスピン流の生成

磁性をもつ鉄で生じたスピン流(スピン分極した電流)は、非磁性体の銅ではスピン拡散長の範囲のみ流れる。

3. スピントロニクスの応用事例

では、スピン流を使うと具体的に何ができ、どのようなメリットがあるのだろうか。まずはそれを概観してみよう。

3.1 磁気センサー応用

スピン流がもたらした具体的な製品例は、ハードディスクドライブ (HDD) のデータを読み出す磁気センサー、通称「磁気ヘッド」、への応用が挙げられる。ここに、スピン流の伝導性が磁性体の磁化方向に依存して変化する性質が用いられている。従来技術に比べ磁気へ書き込まれたデータの読み出し感度が飛躍的に向上し、HDDの小型化と大容量化が実現した。ジョブズがポケットに1,000曲を入れることができたのも、実はこの技術があつてこそであった。この磁気ヘッドの革新的な機能向上を可能とした「巨大磁気抵抗効果」(Giant-Magneto-Resistance, GMR) の発見に対し、2007年のノーベル物理学賞が与えられている。ちなみに、基礎物理現象としてのGMR原理の発見(1988年)から製品化(1998年)までが短期間に行われたことも、驚きをもって迎えられた。ここでは、磁性金属薄膜を数原子層レベルで積層させる微細加工技術が、先ほどのスピン流を利用するための「一手間」に該当している^[6]。

現在GMRを含めた磁気抵抗効果は、HDDのようなデータストレージ用途のみならず、集積回路で働く磁気抵抗ランダムアクセスメモリ (Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM) へと応用の範囲を広げている。通常の半導体メモリでは、電源オフで情報が消えてしまう(揮発性)ため、情報を保持するため待機電力の供給が必要となる。この電力消費が発熱の一因となり、巨大な計算機施設に電子機器が集積するスパコンやデータセンターなどでは、高熱による機器の誤作動を防止するための冷却装置が計算機施設と同規模のサイズで必要となっており、この冷却のためにさらに余計なエネルギーを消費している。一方、MRAMでは磁気へ情報を格納することで情報の「不揮発性」を有し、電気回路の発熱とそれに伴う電力消費を大幅に削減できるようになる。

3.2 磁化操作技術への応用

ユニークな事例をもう一つ紹介する。電流が運

ぶのは電荷であるのに対し、スピン流が運ぶものは角運動量である。角運動量をもった「回転」が流れていくイメージである。角運動量の時間変化はトルクであるから、スピン流によって磁性体の磁化にトルクを与えることができる。HDDやMRAM等の磁気記憶素子では、微小な磁性体の磁化方向に1ビットの情報を対応させる。十分な量のスピン流（角運動量）を流し込むことで磁化の方向を回転し、1ビットの情報を書き換える。これが、「スピン注入磁化反転」という新しい磁化操作技術である。磁性体のサイズがおよそ百ナノメートル以下の領域で、電流磁界による従来方式を凌駕する磁気データの書き込み能力が実証された。この原理となる「スピントランスファートルク」(Spin-Transfer Torque, STT) もまた、スピントロニクスの研究開発を力強く駆動する推進役を果たしてきた。現在、読み出しに磁気抵抗を、書き込みにSTTを利用するMRAMが市場に登場し、そのチップ応用が盛んに行われている。

これらの事例からわかることは、微細加工技術によって、スピン流は磁化状態を読み出す磁気センサーや磁化状態を直接操作する手段を与え、しかも機器の小型化や省エネルギー技術として製品化に役立てられ日常環境で利用されているという点である。つまり、スピンはもう身の回りで活躍し始めている。

4. 研究分野の動向

4.1 研究の目的

スピントロニクスの狙う目的は、現在、「磁性体の制御」と「エネルギー変換」の二項目に集約される。前者は高効率で高機能な磁気メモリ素子や論理回路などの開発に必要な要素技術であり、すでに製品化に向けた世界的規模の競争が行われている。後者はセンサー応用や排熱の有効利用、また将来的には微弱なエネルギーで駆動される機器への給電方法として期待が持たれており、基礎研究段階の成果が積み上げられている状況だ。

4.2 国内外の動向

近年の研究開発動向としては、我が国の内閣府革新的研究開発プログラムImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現」や、フ

ランス原子力・代替エネルギー庁（CEA）が中心となって定めた欧州17ヶ国86拠点の研究開発ロードマップなどに見られるように、電子機器の「省エネルギー」対策に重点が置かれている^[7, 8]。また、文部科学省科学研究費（新学術領域研究）「ナノスピン変換科学」等、我が国独自の基礎研究の蓄積により、スピンを介したエネルギー変換に基づく「創エネルギー」へ研究の芽が育ってきた。国際的にもこの視点は新しく、我が国が世界をリードしている。一方、将来のセンサーネットワークの給電や、宇宙・深海等のフロンティア探索、災害時の電源確保といった様々な社会ニーズへの活用を見据えた取り組みは、基礎研究段階でも現状ではほぼ手つかずの状態にある。

4.3 研究の課題

では、そこで求められる技術的な課題とは、どういったものであろうか。それは、スピン流を用いた磁性体の制御とエネルギー変換を、「高効率」かつ「汎用性」と「多機能性」をもって実現することとなる。そのために必要となるのが、スピン流現象に関する1)物理現象の探求、2)測定手法の開発、3)新規材料の探索の三要素だ。スピントロニクスの研究現場では、これらの各要素におけるブレークスルーがたびたび起こることで互いを刺激し合い、分野の発展が促される好循環が続いてきた。さらに、これらの発展を牽引するような具体的な応用先を新たに創り出すことも大変重要な課題となる。

5. スピントロニクスの進展

さて、これまでスピントロニクスの社会的意義について駆け足で紹介してきた。本節では、以上の応用を支える基礎研究の現状について、やや専門的になるが少し触れてみたい。

5.1 スピン流現象の探求

物理現象の探求という側面では、スピン流の生成手法が次々に実証されてきた。物質中のスピン軌道相互作用による「スピンホール効果」および「エーデルシュタイン効果」。磁化運動による「スピン起電力」および「スピンポンピング」。熱による「スピンゼーベック効果」。流体渦による「スピン流体発電」。いずれの生成機構の発見にも日本

人研究者が深く携わった点は特筆すべきである^[3]。

また、スピン流の担い手も、伝導電子のスピンにはじまり、現在は磁性絶縁体のスピン波励起（マグノン）や表面弾性波（フォノン）など角運動量を運ぶ固体中の様々な素励起（量子力学的な振動）にまでその概念が拡張され、角運動量変換に基づく一般原理の構築が進められている。このようなスピン流を媒介とした変換現象をエネルギーの相互変換と捉えることでこれまで個別に考えられてきた学術分野間に新しいリンクが生まれつつある。

5.2 スピン流測定手法の開拓

測定手法の開拓という点では、スピンホール効果の逆過程である「逆スピンホール効果」の果たした役割が極めて大きい。白金やビスマスのような重金属では、スピン軌道相互作用というスピンの依存した特殊な磁場が働き、スピン流を電流に変換する。この現象を巧みに使うことで、これまでその存在に触れることができなかつたスピン流を電気測定という精度の高い確立した手法で分析することができるようになった。現在スピン流の検出法として世界中で広く活用されている本手法も、我が国発の独創的な成果である^[9]。

5.3 新規材料探索・設計

材料探索の流れは、微細加工で先行する半導体に磁性を導入する努力と、磁性金属を微細加工する方向が並行して進められ、それらの組み合わせからなるハイブリッド構造や表面・界面の制御が追求された。その後、スピン流の舞台は前述の磁性絶縁体を取り込み大きく拡大した他、スピン流の変換材料としてトポロジカル物質を含むスピン軌道相互作用の大きな物質の開発が進んだ。最近では、人工知能（AI）による材料探索が実施され、安価な鉄鋼材でもスピン変換が可能であることが実証されるなど新手法への関心が高まっている^[10]。

5.4 新しいデバイス応用事例

以上のような展開を集約することで、全く新しいデバイス応用が可能となる。例えば、熱を外部刺激として磁性体に注入し、スピン流を生成する（スピンゼーバック効果）。そこで生じたスピン流をスピン軌道相互作用の大きな金属薄膜（スピンホール材料）で電流に変換する。この結果、スピンを介して熱から電気へのエネルギー変換、通称「スピン熱電発電」が実現される（図3）。こ

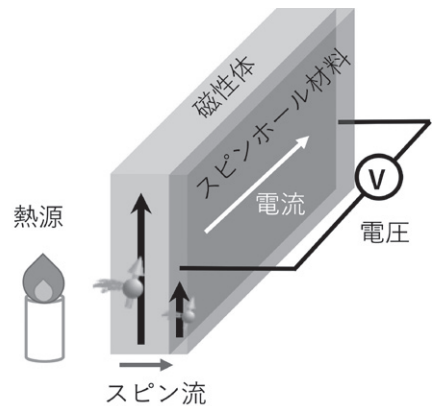


図3 スピン熱電発電の模式図

熱源からの外部刺激で磁性体中に生じたスピン流は、白金等のスピンホール材料に流入後、スピン拡散長程度の厚みを通る間に奥行き方向の電流に変換される。出力電圧は奥行き方向の長さに比例し、大面積が有利となる。

で、磁性体は塗布技術によって様々な素材に成膜することができ、可塑性・大面積化・生産コストといった既存熱電技術の抱える課題を解決する新しいアプローチとして注目を集めている。

6. スピントロニクスへの挑戦

最後に、未来に向け、スピントロニクスの射程を大きく伸ばす可能性について考えてみる。

6.1 原子力とスピントロニクス

「物理学は越境する」と物理学者の和田昭允はその著書に記した。スピントロニクスの進展と併走してきた身として、いま心に思い描くのは、スピントロニクスの原子力分野への越境である。我が国が先端を走るスピントロニクス研究に、原子力分野のテーマを取り込むことでさらなる研究の地平が切り開かれる。このような構想の下、両研究分野の交流が活性化し、20世紀に基礎的量子科学として勃興した原子力分野が再びその輝きを放つようになる。また、スピントロニクスも全く新しい研究フェーズへと進む。まだ始まって間もない試み^[11]ではあるが、将来的に創出が予想されるアウトカムイメージを、以下列挙する。

6.2 宇宙探索・深海探査への展開

宇宙探査用電源には広く太陽光発電が用いられるものの、太陽光の届かない木星以遠や粉じん環境に置かれる火星表面での探査には熱電発電型の

原子力電池以外の選択肢はない。通常 α 線のみを放出する元素 (^{238}Pu) が用いられているが、スピン熱電発電であればより長寿命を有し存在比が大きい他の放射性同位元素を熱源として利用できるようになる。また、深海は宇宙開発と並ぶ人類のフロンティアの一つである。周囲を海洋に囲まれた我が国にとっても、海底資源の探索や地震・津波対策としての海底地図の作成には、深海探査艇のより長時間の活動を支える電源の確保が必要となる。このため、太陽光発電の使えない深海領域でスピンによる放射線の電源利用が見込まれる。

6.3 原子力施設等への展開

使用済み核燃料や放射性廃棄物は長期に渡り放射線を放出し続けている。このエネルギーを安定的な供給源として捉え、スピン熱電発電でこれを監視盤用など施設保守電源として活用する。この他にも、防災用や災害時の電源確保、放射線や中性子線量計などの開発、安全性が十分担保された上での医療分野やウェアラブル機器での電源利用、将来的な系統電源への放射線で駆動されるスピン熱電発電の展開が考えられる。

7. まとめ

「はじめに」で述べたように、近い将来、情報通信量の爆発的な増大と、それに伴う情報機器の消費電力需要増が大きな懸念となりつつある。一方、半導体の微細化が限界に近づき、エレクトロニクス技術の性能向上に陰りが見えてきた。これに対し、スピン流で動作するMRAMは、待機電源を大幅に削減するチップの開発を強力に後押ししている。また、スピンを介したエネルギー変換が、これまでにないエネルギー利用法を導くと期待される。

これまでスピントロニクスは、基礎と応用、理論と実験、測定と材料が絡み合い、磁気特性、電気特性、光学特性などの個別に議論されていた物理量がナノ領域において強固に結びつくことによって、量子物性物理学のフロンティアを押し広げてきた。分野の垣根を取り払うことで発展してきたともいえる。新しい研究成果の応用を通じて、既存技術では難しかった省エネおよび創エネデバイスの開発を促し、より高度化するデータ社会を

持続可能な形で実現することがスピントロニクスの果たす社会的な役割と考えられる。

参考文献

- [1] 低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1) - IT 機器の消費電力の現状と将来予測 - (科学技術振興機構2019年3月)
- [2] 齊藤英治, 村上修一「スピン流とトポロジカル絶縁体-量子物性とスピントロニクスの発展-」(共立出版2014年).
- [3] 前川禎通, 堤康雅「スピントロニクス (シリーズ 21世紀の物性)」(日本評論社2019年).
- [4] 「実用化迫るスピントロニクス チップ性能向上の壁に挑む」(日本経済新聞電子版 科学&新技術 2019年3月15日付).
- [5] 文部科学省科学研究費補助金 (特定領域研究)「スピン流の創出と制御」2007年度~2010年度. http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/hojyo/chukan-jigohyouka/1316710.htm
- [6] 前川禎通, 家田淳一「巨大磁気抵抗効果 (GMR) からトンネル磁気抵抗効果 (TMR) へ」日本物理学会誌65, p.324 (2010).
- [7] 内閣府革新的研究開発プログラムImPACT「無充電で長期間使用できる究極のエコIT機器の実現」2014年度~2018年度. <http://www.jst.go.jp/impact/program/04.html>
- [8] B. Dieny et al., "Opportunities and challenges for spintronics in the microelectronics industry" Nature Electronics 3, 446-459 (2020)
- [9] 齊藤英治「スピン流を組み込み、物理学を書き換える」基礎科学ノート, 19 No.1 (2011) p.2. <https://asrc.jaea.go.jp/kisonote/kagaku/34kagaku/34interview.pdf>
- [10] Y. Iwasaki et al., "Machine-learning guided discovery of a new thermoelectric material" Scientific Reports 9, 2751 (2019).
- [11] 放射線に負けない熱電発電の実現に向けて (原子力機構プレス発表2020年8月). <https://www.jaea.go.jp/02/press2020/p20082802/>

著者プロフィール

平成17年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)
科学技術振興機構研究員(東北大学)、東北大学金属材料研究所金属物性論研究部門助教を経て、平成22年日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター研究員。平成25年同スピン-エネルギー変換材料科学研究グループ研究副主幹。平成30年同研究主幹、現在に至る。専門分野は、物性理論・スピントロニクス。

RI治療病室の動向と展望



東 達也*

1. 始めに

核医学分野は近年新時代を迎え、診断中心の時代から、PET/SPECT核種による診断と治療用核種への置換による核医学治療あるいは標的アイソトープ治療 (Targeted Radioisotope Therapy/TRT) がセットになった「theranostics」の時代に移行しつつある。また従来TRTには β 線核種 (^{131}I , ^{89}Sr , ^{90}Y) が用いられてきたが、近年 α 線核種を標識したTRT製剤が臨床応用された。 α 線TRTは高い治療効果が特徴で、2016年我が国でも塩化ラジウム223 (^{223}Ra) 製剤 (商品名ゾーフイゴ) が保険承認された。 ^{223}Ra 製剤は世界初の α 線TRT製剤として前立腺がん骨転移に臨床応用され、従来の類似TRT製剤の塩化ストロンチウム ^{89}Sr では達成出来なかった予後の延長を示し、欧米で2013年保険承認後、ブロックバスター薬 (1千億円規模の売り上げを誇る製剤) となった。国内でも ^{223}Ra は承認翌年2017年には国内治療件数年間4,000件超と従来国内では主流のTRTであった甲状腺癌の ^{131}I 治療に匹敵する件数に達した¹⁾。今後も拡大を予想されるTRTだが、治療場所の確保が重要となる。医療法ではTRT薬剤投与に必須の場所が定められ、放射線管理区域 (外来では診療用放射性同位元素使用室、入院では放射線治療病室/RI治療病室) が必要とされる。放射性ヨウ素 ^{131}I による甲状腺がん

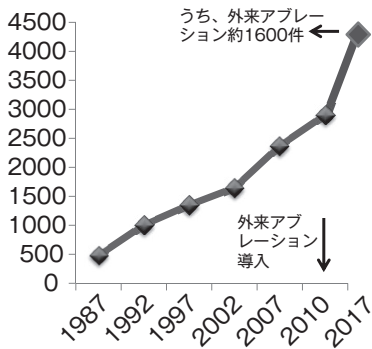
TRTではRI治療病室入院が必須で、国内では施設不足に長年悩まされてきた。本稿ではRI治療病室の最新動向と今後の展望を中心に示す。

2. 甲状腺がんTRTの動向

現状、入院RI治療病室利用の大半は ^{131}I による甲状腺がんTRTが占めている。甲状腺がんは高齢化社会到来に伴い患者数が増加し、 ^{131}I によるTRT治療件数が増大している²⁻⁴⁾ (図1)。 ^{131}I によるTRTは入院が原則であったため、RI治療病室での入院需要が高まり、2010年頃には年間3,000件程度まで増加し、その後も高止まりが続いている²⁾。ところが、国内では厳しい放射線管理規制とこれに適合する施設の高額な建設・管理・維持補修費用のため、RI治療病室新設が多くの医療機関で見送られ、また甲状腺がんTRTは医療経済上不採算で、人材不足の医療分野であるため、2003年の包括医療費支払制度 (DPC) の導入、2004年の独立行政法人制度導入により、多くの医療機関で病院建て替えの際に既存のRI治療病室を廃止するという状況が続き、2002年まで全国188床程度で推移していたRI治療病室は、2015年135床まで減少した²⁾。日本核医学会などの活動等により、また一部の医療機関でのRI治療病室を新設する動きにより、2017年の調査ではRI治療病室数は全国で157

* Tatsuya HIGASHI 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 分子イメージング診断治療研究部 部長

¹³¹I治療数は年々増加



全国の実稼働入院ベッド数と入院治療数との比較

年	2002	2007	2010	2015	2017
実稼働ベッド数	188	158	138	135	157
治療数/ベッド数	8.8	13.1	21.0	22.7	18.1

(→ 一年365日約52週間のうち、診療実稼働は年末年始、ゴールデン・シルバーウィーク、お盆の6週を除いて約46週間。一般に¹³¹I内用療法は入院期間とクールダウン期間合わせて2週間必要。したがって、入院RI病室は年間最大23件の治療可能と推定。)

入院施設のアンケート調査結果 2008 2009 2010 2012 2017

内用療法までの平均待機時間	4.4ヶ月	4.9ヶ月	5.2ヶ月	5.0ヶ月	3.6ヶ月
---------------	-------	-------	-------	-------	-------

(東ら.核医学2016;53:27-43. 小泉ら.核医学2017;54:579-586.阿部ら.核医学2019;56:107-116.より改変 2-4)

図1 甲状腺がん¹³¹I治療総数(入院+外来)とRI内用療法入院病室の状況

床までやや回復した。

甲状腺がん診療分野では2010年国内診療ガイドライン第1版が刊行され⁵⁾、TRTは明らかな転移のない症例での再発予防としての少量¹³¹I投与による「アブレーション」(残存甲状腺組織の破壊)と、明らかに転移のある症例での大用量¹³¹I投与による「治療」の2種類に大別された。同じく2010年厚生労働省通知(医政指発第1108第2号)発出により¹³¹I退出基準が緩和され外来での1,110MBq投与が可能となり、残存腫瘍の可能性を持つ患者の治療が¹³¹Iによる外来アブレーションTRTとして増加、2017年には約1,600件に達した(図1)。2014-2015年に甲状腺がんに対する分子標的治療薬が複数国内導入され、治療対象として「内用療法不応」が定義され⁶⁾、進行した転移性甲状腺がんに対して漫然と¹³¹Iによる入院治療が継続されることが減り、入院TRTの件数はやや緩和された⁴⁾。

しかし、依然としてRI治療病室不足は深刻である。2017年日本核医学会調査では、年間に全例4,500件、入院にて2,850件程度の治療が行われ、国内RI治療病室数は157床、一病床あたり年間18件の治療が全国平均で行わ

れている⁴⁾。本治療は1件の治療あたり病床占拠期間が約2週間程度で、計算上年間36週間は分化型甲状腺がん治療でベッドが占拠される。年間52週間の内、年末年始2週、ゴールデンウィーク2週、シルバーウィーク、お盆等を勘案すると年間46週となり、国内では他治療に病床を割く余裕が10週程度と十分ではない(図1)。さらに国内診療ガイドラインが2019年改定(第2版)され、TRTは「アブレーション」と「治療」の2種類に加えて、「補助療法」(画像診断で確認出来ないが、残存腫瘍があると考えられる患者での補助療法)という分類が追加され、入院での大用量治療が推奨されることとなった⁷⁾。この改定により、従来国内での1,110MBq外来「アブレーション」の対象症例はほとんどが「補助療法」として3,700MBq入院治療に移行することが推定され、今後入院での「補助療法」が増加し、RI治療病室の不足に拍車がかかると懸念されている。2020年には全国アンケートで¹³¹Iを中心とするTRTの見送り症例に関する調査結果が報告された⁸⁾。RI治療病室の不足の解消もふくめたTRT環境改善の必要性が改めて痛感された。

3. 関連する政策と診療報酬制度

TRTの必要性に関しては国や厚生労働省も認めており、2018年厚生労働省健康局長通知「がん診療連携拠点病院等の整備について」が発出され、がん診療連携拠点病院の指定要件として「核医学治療」診療体制の提供が制定された。一方、この要件は情報提供、紹介体制の整備のみであり、RI入院病室の設置までは必須化されていない。現在国内でRI入院病室を保有しない都道府県は茨城、滋賀、奈良、和歌山、佐賀の5県あり、都道府県がん診療連携拠点病院51病院のうち、RI入院病室を保有するのは35病院（69%）、同じく地域がん診療連携拠点病院（高度型）14病院のうち保有はわずか1病院（7%）、地域がん診療連携拠点病院325病院のうち保有はわずか31病院（10%）のみにとどまっており、TRTの国内均てん化は不十分である（2019年日本核医学会調べ）。日本核医学会健保委員会では都道府県がん診療連携拠点病院や地域がん診療連携拠点病院（高度型）でのRI入院病室の設置必須化等を求めて厚労省健康局などに陳情を重ねており、今後の進展を期待している。

日本核医学会健保委員会ではRI治療病室の不足解消のため、厚労省保険局医療課等に陳情し、診療報酬制度の改正に向け、下記2点を要望している。①医療技術評価提案として「放射線治療病室管理加算の増点」。医療法に定める放射線治療病室/RI治療病室には、密封線源と非密封線源を用いる病室があるものの、診療報酬上両者は区別されず、放射線管理の容易な前者の実情に合わせた低い診療報酬となっており、後者の増点を求めている。すなわち、医療法施行規則などで厳しい規制の管理下にあり、排気排水設備の設置、汚染防止のための管理区域の設定、監視モニターの設置、汚染物の廃棄施設の設置などの初期投資に加え、排気排水設備、監視モニターの

運転、フィルター交換、汚染物の引き取り費用などの維持費用も高額な費用の必要な非密封線源治療病室では、放射線治療病室管理加算を増点すべきと訴えている。また、②医療技術評価提案として「放射線治療の薬剤料の節立て」も要望している。現在の診療報酬請求体系では、DPC対象病院で出来高算定できる放射線治療の項目に薬剤料の節がないため、多くの医療機関でTRT薬剤、とりわけ放射性ヨウ素¹³¹Iの薬剤費が十分請求できず、医療機関の持ち出しになっているため、節の新設を訴えている。2020年の改定では①②ともに反映されなかったが、今後も厚労省への陳情、相談を継続していく予定である。

4. 新しいTRTとRI治療病室

近年TRT開発が盛んとなり、新規β線TRT製剤やα線製剤の国内導入が間近に迫っている。近く導入予定のβ線核種ルテチウム¹⁷⁷Lu（半減期6.6日）標識TRT製剤について述べる。¹⁷⁷Lu標識ペプチド受容体放射性核種治療（Peptide Receptor Radionuclide Therapy/PRRT）薬である¹⁷⁷Lu-oxodotreotide製剤（商品名ルタセラ）は、2016年の「ルテチウム-177標識ソマトスタチンアナログ（¹⁷⁷Lu-DOTA-TATE）注射液を用いる内用療法の適正使用マニュアル（第2版）」に基づいて神経内分泌腫瘍を対象とした国内I/II相試験を終え、すでに富士フィルム富山化学より2020年8月国内製造販売承認申請が出されて早期の承認が期待されている。本TRTは管理区域内での投与後24時間滞在が必要とされるが、厚生労働科学研究費補助金（地域医療基盤開発推進研究事業）細野班研究の検討により、RI治療病室以外の「具体的な放射線防護及び汚染防止措置等にて特別な防護措置等を講じた病室（一般個室）」での一泊入院が厚労省医政局との合意のもと適正とされており、本対象疾患は希少疾患でもありRI治療病室不足への影

響は少ないと考えられる。次に¹⁷⁷Lu標識転移性Prostate Specific Membrane Antigen (PSMA/前立腺特異的膜抗原)前立腺がん治療薬である¹⁷⁷Lu-PSMA-617製剤について述べる。ノバルティスファーマ関連企業ENDOCYTE社が2018年開始、2021年終了予定の米国Phase III試験VISION Studyが実施中で、治験終了予定、早期承認と観測され、国内でも治験準備が進められ、退出基準制定のため細野班研究にノバルティス社が参加予定である。現状で本TRTでは管理区域内での投与後数日間の滞在が必要とされる公算であり、対象疾患が患者数の多い前立腺がんであることを考慮すると国内RI治療病室環境への影響は大きいと考えられる。今後の検討課題であり、慎重に注視していきたい。

また、国産TRT製剤として国内初治験となる、我々放医研と国立がん研究センター、日本メジフィジックス社で共同開発を進めている⁶⁴Cu-ATSM（半減期13時間）は難治性脳腫瘍を対象として第一相治験中であり、早期承認を目指し順調に治験進行中であるが、本TRTでも管理区域内での投与後1泊程度の滞在が必要とされている。現状「特別な防護措置等を講じた病室（一般個室）」での一泊入院が可能と判断され、今後厚労研究細野班にて検証予定である。本対象疾患が希少疾患であることを考慮するとRI治療病室不足への影響は少ないだろう。

次に新規 α 線TRT製剤につき述べる。 α 線製剤に関してはその体内飛程が β 線核種に比し短くマイクロメートル単位であり、一旦体内に投与されると放出放射線の防護が不要であるため、²²³Ra製剤と同様に今後の新規 α 線製剤では退出基準上ほとんど外来投与で問題ないものと推定される。一方、一部 α 線製剤、とくに抗体製剤の場合に体内血中濃度が高い状況が数日続く可能性があるため、半減期の長い²²⁵Ac（半減期10日）の場合には臨床治験実施の際にはRI治療病室を利用し

て排泄物の残留放射線測定が必須と当局から要求される可能性もある。しかし新規 α 線TRT製剤の国内RI治療病室環境への影響は軽微であると考えられる。

国内での新規 α 線TRT製剤開発はアスタチン²¹¹At製剤（半減期7.2時間）の開発がJSTのOPERA研究「安心安全スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出/QiSS」などを通じて進められ、大阪大学でのアスタチン²¹¹At-Na製剤による難治性甲状腺がん治療と量研機構と福島県立医大の共同研究による²¹¹At-MABG製剤による悪性褐色細胞腫治療の2つが先行、2021年に第一相臨床試験が開始される予定である。これらはすでに厚労研究細野班の検討により入院は不要と推定され、希少疾患が対象であること、またアスタチン²¹¹Atの核種製造が可能な中型サイクロトロンを保有する施設が国内には少ないことから、国内RI治療病室環境への影響は軽微と考えられる。アクチニウム²²⁵Ac標識PSMA-617製剤は対象疾患が転移性前立腺がん非常に症例の多い疾患であり、注意を要する。2016年には²²⁵Ac標識PSMA-617製剤の臨床使用例がハイデルベルク大学から報告され、進行した前立腺がんにおいて全身骨・内臓転移症例が完全寛解を示すなど高い治療効果を示したことから注目され、また²²⁵AcTRT製剤の臨床治験も海外では複数開始され、国内でも近く臨床現場で利用されるものと予想される。現状²²⁵Ac製造は²²⁹Thを用いたジェネレーター抽出法が中心で世界的に供給不足状態にあるため、大量製造可能な新規製造法の開発競争が世界的に進んでいるが、国内では量研機構がサイクロトロンを用いた²²⁶Raへのプロトン照射による²²⁵Ac製造法にて成果を挙げ⁹⁾、現在、AMED「医療研究開発革新基盤創成事業CiCLE」にて日本メジフィジックス社との共同で「セラノスティクス概念を具現化するための創薬拠点整備を伴う、抗体等標識治療薬（アルファ

線)とコンパニオン診断薬の開発」研究を進め、2019年9月千葉県袖ヶ浦市に²²⁵Ac製造を中心としたサイクロトロン施設「CRADLE棟」が竣工し、国内でも本格的に²²⁵Ac製造が可能となりつつある。上記¹⁷⁷Lu-PSMA-617製剤と同様、今後の細野班研究での退出基準制定の検討課題であり、国内RI治療病室環境への影響につき注視していきたい。

一方で、医療法上のRI管理区域における年間の放射性同位元素の種類ごとの最大貯蔵数量および最大使用許可数量の制約は厳しく、退出基準の制約の少ない α 線TRT製剤においても、国内RI治療病室環境への影響では検討すべき課題が多い。多くの医療機関では診断用放射性同位元素に加え、TRT用の放射性同位元素を合わせて最大貯蔵数量および最大使用許可数量を上限ぎりぎりまで設定しており、これらは施設が保有するRI排水貯水槽のサイズに多くの場合依存する。つまり、大きな貯水槽を新設しない限り、新規のTRT製剤の導入を図るためには従来使用していた診断用あるいはTRT用の放射性同位元素の最大使用許可数量を削減する必要がある。今後続々と登場する新規TRT製剤の導入では大きなネックとなると考えている。貯水槽新設を含めた、高額な建設・管理・維持補修費用を考慮すると、大きな発想の転換が必要ではないだろうか。我々放医研では、 α 線TRTの速やかな国内導入を図る観点から、RI治療病室の要件を再検討し、適切な放射線防護及び汚染防止措置を講じた上でより簡易・より安価な「トレーラーハウス型・移動式病室設備」を α 線TRT専用の管理区域として用いるという方策を着想、特許申請し(特願済:2020-025584)、その設計に着手した。実設備製造後には、科学的な根拠に基づき安全性を実地検証し、医療法の下で安全基準・利用要件などの策定を進め、監督省庁である厚生労働省との協議を進めていきたい。

「theranostics」と α 線TRTの核医学新時代を迎え、治療効果が高く患者さんに優しい核医学診療をいち早く国民の皆様にお届けできるよう、関係団体、諸機関の皆様には引き続きご協力を賜りたい。

参考文献

- 1) 日本アイソトープ協会医学・薬学部会 全国核医学診療実態調査専門委員会. 第8回全国核医学診療実態調査報告書. RADIOISOTOPES, 67, 339-387 (2018)
- 2) 東達也ら. RI内用療法の将来展望と提言. 核医学 53巻1号(2016年).
- 3) 小泉潔ら. 甲状腺癌の放射性ヨウ素内用療法におけるRI治療病室稼働状況の実態調査報告(第4報). 核医学 54: 579-586, 2017.
- 4) 阿部光一郎ら. 甲状腺癌の放射性ヨウ素内用療法におけるRI治療病室稼働状況の実態調査報告(第5報). 核医学 56: 107-116, 2019.
- 5) 日本内分泌外科学会・日本甲状腺外科学会編. 甲状腺腫瘍診療ガイドライン2010年版. 金原出版. 東京. 2010.
- 6) 伊藤研一ら. 放射性ヨウ素治療抵抗性の局所進行性、再発・転移性分化型甲状腺癌に対する分子標的薬治療の適応患者選択の指針. 内分泌甲状腺外会誌 31: 310-313, 2014.
- 7) 日本内分泌外科学会・日本甲状腺外科学会編. 甲状腺腫瘍診療ガイドライン2018. 日本内分泌・甲状腺外科学会雑誌. 第35巻増刊号2018年12月25日発行.
- 8) 森博史ら. 全国アンケートを用いたRI内用療法(核医学治療)見送り症例の実態調査報告. 核医学 57: 39-46, 2020.
- 9) Nagatsu, K., Suzuki, H., Matsumoto, M., Fukada, M., Minegishi, K., Tsuji, A., Higashi, T., Zhang, M. (2019). A Production Challenge of Ac-225 from RaCO3 Target Activated by Vertical Beam. Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences 50(1), S14. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jmir.2019.03.045>.

著者プロフィール

1964年大阪生まれ。1989年京都大学医学部卒業、1998年京都大学医学博士修得。1998-2000年ミシガン大学医学部核医学科研究員。2000年京都大学医学部附属病院放射線部。2007年滋賀県立成人病センター研究所。2016年より量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所・分子イメージング診断治療研究部部長。専門は腫瘍核医学診断・治療。腫瘍PET診断、甲状腺癌を中心とした核医学治療の診療・研究を経て、現在はQST放医研にて新規の核医学治療薬、とくに α 線放出核種などを用いた核医学治療の開発研究に従事。2002年日本核医学会賞。2019年久田賞金賞(Annals of Nuclear Medicine論文賞)。2020年第2回日本オープンイノベーション大賞・日本学術会議会長賞。



中川 恵一

東京大学医学部附属病院

フィルムからガラスへ

ガラスバッジによる

個人放射線被ばく線量の測定

2011年3月の東日本大震災による東京電力(株)福島第一原子力発電所事故により、福島を中心としたその周辺地域が放射性同位元素で汚染される事態となりました。そのため、住民への放射線被ばくによる健康影響が心配されるようになり、福島県や県内市町村では、従来から病院や原子力発電所で使用されているガラスバッジなどの個人線量計を住民に配布して、被ばく線量を測定できるようにしました。住民向けの個人線量計には、ガラスバッジのほか帰還住民用の電子線量計(D-シャトル)などが用いられ、その結果、各自治体では住民の被ばく線量を早期に把握することができ、住民の健康影響への不安を取り除く一助となりました。

私も病院の仲間たちと「チーム中川」を構成して福島(とくに飯舘村)を幾度となく訪問し、健康不安を解消するお手伝いをしてきました。ガラスバッジやD-シャトルの測定結果は住民の方々の不安を取り除くうえで大変重要なものでした。

放射線は福島の事故によってマイナスのイメージが色濃くなりましたが、本来は、私の携わっている医療分野をはじめ、工業・農業・科学など広く安全に利用され続けています。私の勤務している大学病院でも、もちろんガラスバッジを使っています。業務で放射線を取り扱う場合、放射線業務従事者として被ばく線量の測定を行うことが義務付けられていますが、ガラスバッジの結果を毎月確認することで、「安心」して働くことができます。

被ばく線量の測定サービスは、今を遡ること60年以上も前に、「フィルムバッジサービス」として、始められました。本誌を発刊する株



図1 フィルムバッジ



図2 ガラスバッジ

式会社千代田テクノルでも、フィルムは2000年ごろまで、測定材料の主流として使用されてきました。その後、線量計の材料はフィルムから「ガラス」にかわり、現在私たちが使用している「ガラスバッジ」へと進化してきました。

約40年もの実績があったフィルムからガラスへの変更には一企業にとってはとても大きな決断だったと思います。その先見の明には、正直、脱帽です。

2016年1月に、国際原子力機関(IAEA)の総合規制評価サービス(IRRS)において、我が国の原子力規制委員会は、「放射線モニタリング(環境放射線・個人線量)を行うサービス提供者が実施する放射線モニタリングの品質保証」に関して勧告を受けました。これを受けて、原子力規制庁は、放射線モニタリングの品質保証の向上を目的に、個人線量の測定機関に対する認定制度を2019年から開始しています。

放射線の安全利用のためにも、放射線業務従事者の「安心」のためにも、ガラスバッジの更なる進化に大いに期待しています。

図説 量子ビーム・放射線利用

—第9回 放射線測定は考古学である(その1)—

大洗研究所 特別研究員 岡田 漱平

1. はじめに—放射線測定体系を俯瞰する—

放射線を利用するにも防護するにも、その基本となる技術は放射線測定である。この測定体系は多岐にわたっており、しかも複雑に入り組んでいる。本稿では、体系全体に共通のテンプレートをを用いて個々の測定原理を説明することにより、全体像を俯瞰することに挑戦してみたい。

なお、本稿執筆にあたっては、教科書、論文、特許申請書、カタログ類など多くの文献を参考にさせていただいた。文献リストについては、これをすべて掲載すると紙面が尽きてしまうのでご容赦いただきたい。ただし、本稿の図表は、これら多くの文献から測定原理のエッセンスを抽出・整理し、筆者が独自

に作成したものである。図は、あくまで原理説明のために単純化したイメージであることを、予めご了解いただきたい。

2. 放射線測定は考古学である

図1に、上に述べた「共通のテンプレート」の考え方を示す。放射線測定とは、放射線という「刺激」に対して測定器受感部である吸収体が「応答」することから始まる。ただし、最初の応答は目に見えないので、「読み出し系」によって「目に見える応答」に変換し、その結果を放射線の物理量に換算して答えを出すというものである。

これは、あたかも、遺跡の埋蔵物を発掘し、これを分析することによって過去の出来事を推定する考古学のようなものである。

この図からわかるように、測定プロセスの各パーツは、モジュール化されてテンプレートの中に収められているので、以下では、各種の測定原理をモジュールの組み合わせとして説明していく。図表の中の①、②、③・・・⑧は図1の各モジュールに相当する。

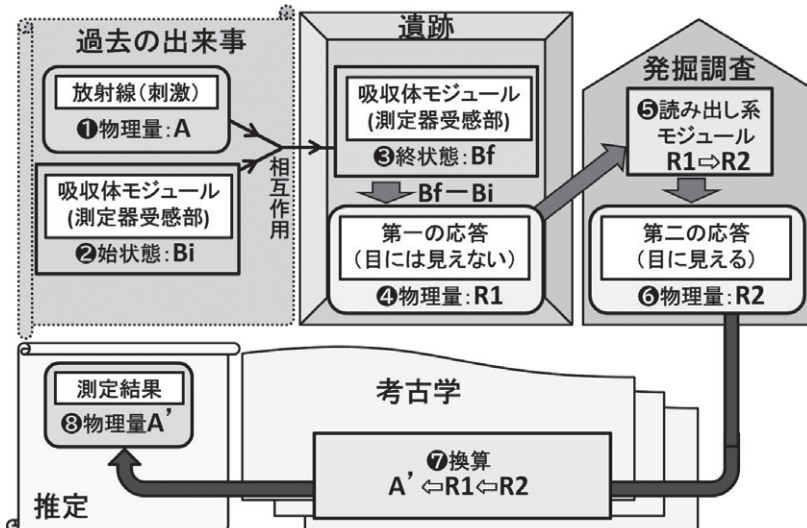


図1 個々の放射線測定プロセスの原理を放射線測定体系全体に共通の考え方で説明するテンプレート(考古学に譬えている)。

3. 気体の電離作用を利用する

を利用する測定法の原理を図2、3及び表1に示す。

気体の電離作用（電子・正イオン対の生成）

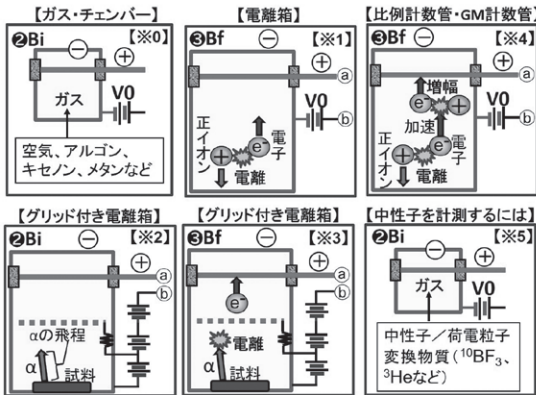


図2 気体の電離作用を利用する測定法の吸収体モジュールのイメージ図。

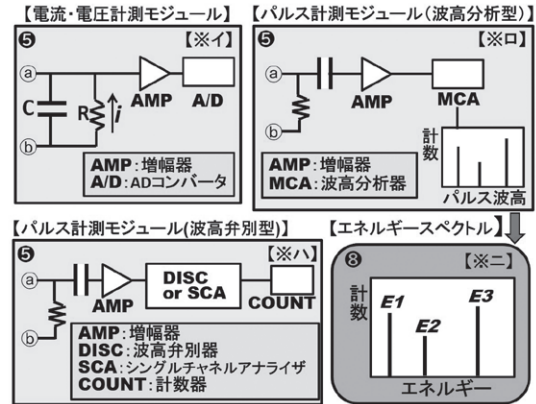


図3 気体の電離作用を利用する測定法の読み出し系モジュールのイメージ図。半導体の電離作用を利用する測定法と共通。

表1 気体の電離作用を利用する測定法の各モジュールの機能。

測定器名	ガス・チェンバー【図2参照】	対象放射線	原理的にはすべての電離放射線【特に適合する放射線がある場合は文中の()内に記載】
①	電流型(電流型電離箱) パルス型(グリッド付き電離箱、比例計数管、GM管)		$A = \Delta E$ (吸収エネルギー) $A = E/($ 量子エネルギー) $\& N/($ 量子個数)(入射量子の種類別にそれぞれ)
②			【※0】函体に空気などの気体を封入し、函体と芯線との間に高電圧 V_0 を印加する。 【※2】グリッド付き電離箱では、函体と芯線との間にグリッドが挿入され、芯線との間にさらに高い電圧が印加される。 【※5】中性子を計測するには、コンバータ(中性子/荷電粒子変換物質)のガスを封入する。主に比例計数管で使われる。
③	電流型電離箱 グリッド付き電離箱 比例計数管 GM管		【※1】放射線の電離作用で電子・正イオンの対ができ、電荷 Q が電極に集められる。電圧 V_0 は二次電離も再結合も起こらない程度に印加されているため Q は放射線がガス中で失ったエネルギー ΔE に比例する。 【※3】電離によって生成した電子はグリッドまで到達すると芯線に向かって加速されパルス的に電荷が収集される(パルス電荷量 $Qp \propto E$)。(α, β) 【※4】 V_0 を大きくしていくと、最初の電離(一次電離)で生じた電子が加速され、衝突した気体分子をさらに電離(二次電離)して合計電荷量は増幅される(ガス増幅)。 V_0 をさらに大きくすると三次、四次と電離が起こり電子数が連鎖的に増大する(電子なたれ)が、初期電離量と増幅されたイオン対の数との間の比例関係は保たれ、収集される電荷量(パルスの大きさ)と初期電離量(入射量子のエネルギー)は比例する。したがって、入射量子のエネルギーの弁別が可能。(X, γ, β, α, n) 【※4】さらに V_0 を大きくすると電子なたれが一層激しく起こり、上記の比例関係は崩れる。したがって、エネルギーの弁別はできないが、パルスが大きく高感度になる。(X, γ, β, α) (n : He 入りのものは速中性子にある程度の感度あり)
④	電流型電離箱 グリッド付き電離箱 比例計数管 GM管		$R1 = Q/e$ (Q :電離電荷、 M :電子・正イオン対数、 e :素電荷) $R1 = Qp/($ 1回の量子入射による収集電荷量) $\& Np/($ パルス発生回数)(量子の種類別にそれぞれ) $R1 = Qp/($ 1回の量子入射による収集電荷量) $\& Np/($ パルス発生回数)(量子の種類別にそれぞれ) $R1 = Np/($ パルス個数)
⑤	電流型電離箱 グリッド付き電離箱 比例計数管 GM管		電流・電圧計測モジュール(図3※イ) パルス計測モジュール(波高分析型)(図3※ロ) パルス計測モジュール(波高弁別型)(図3※ハ)[パルス波高を弁別] パルス計測モジュール(波高弁別型)(図3※ハ)[ノイズの計数をカット]
⑥	電流型電離箱 グリッド付き電離箱 比例計数管 GM管		$R2 = I$ or $R2 = V (=R)$ $R2 = [Hp/($ パルス波高) $] vs. Cp/($ パルス計数) $]$ $R2 =$ 弁別されたパルス波高値 Hd に対するパルス計数 Cd $R2 = Cp/($ パルス計数)
⑦	電流型電離箱 グリッド付き電離箱 比例計数管 GM管		$\blacklozenge N = Q/e \leftarrow Q = C \int i dt \leftarrow V(t) \blacklozenge \Delta E = WN$ (W :ひとつの電子・正イオン対をつくるのに要する平均エネルギー) $\blacklozenge D =$ 校正定数等 $\times (\Delta E/m_0) (S_M/S_G)$ [m_0 :ガスの質量、 S_M :計測器近傍物質の質量阻止能、 S_G :ガスの質量阻止能](Bragg-Grayの空洞原理による) $\blacklozenge H_p(d) = D \times$ 換算係数 $\blacklozenge H^*(d) = D \times$ 換算係数 $\blacklozenge [Ei vs. Ni] \propto [Qp vs. Np] \propto [Hp vs. Cp] (Ei \propto Qp)$ $\blacklozenge Ni \propto Np \propto Cd$ (弁別された Ei に対して)(弁別された $Ei \propto$ 弁別されたパルス波高値 Hd) $\blacklozenge H^*(10) = Ni \times$ 換算係数 \times 校正定数等(弁別された Ei に対して) $\blacklozenge Ni \propto Np \propto Cp \blacklozenge H^*(10) = Ni \times$ 換算係数 \times 校正定数等(入射量子のエネルギー Ei は既知なものとして)
⑧	電流型電離箱 グリッド付き電離箱 比例計数管 GM管		$D, H_p(d), H^*(d)$ エネルギースペクトル $[Ei vs. Ni]$ $Ni, H^*(10)$ (弁別された Ei に対して) $Ni, H^*(10)$ (Ei は既知として)

- ◆ ΔE (吸収エネルギー): 入射放射線全体が吸収体の中で失ったエネルギー。
- ◆ E (量子エネルギー): 入射放射線の1個の量子が最初に持っていた運動エネルギー。
- ◆ $H_e(d)$: 個人線量当量, $H^*(d)$: 周辺線量当量; $d=10\text{mm}$ のとき「1cm 線量当量」という。他に $d=3\text{mm}, 70\mu\text{m}$ 。これらは測定可能な「実用量」とされている。吸収線量等から実用量を求めるには入射量子のエネルギー値を使って換算を行う。エネルギー値が既知でない場合はなんらかの近似が必要である。
- ◆ 本稿では空間線量を、近似値も含め $H^*(10)$ と記載。
- ◆ 校正定数等: [装置に固有の補正係数(温度補正など)] \times [標準またはリファレンスに対する校正定数]
- ◆ 換算係数: 線量を1cm線量当量などの実用量に換算するための定数。換算の際の線量としては照射線量、空気カーマ、吸収線量があるが、本稿では記述を簡単化するために吸収線量 D で代表させる。(以下の表も同様)

表2 半導体検出器における各モジュールの機能。

測定器名	半導体検出器【図4参照】	対象放射線	X, γ, β, α , 重荷電粒子, n (コンパータと組合せて) 【特に適合する放射線がある場合は文中の()内に記載】
①	電流モード	$A = \Delta E$ (吸収エネルギー)	
	パルスモード	$A = E$ (量子エネルギー) & N (量子個数) (入射量子の種類別にそれぞれ)	
②	【基本形】		
③	【※0】Si などのp型半導体の層)とn型半導体の層)を接合したものに逆バイアス電圧を印加すると(ⓐ)を+側、(ⓑ)を-側、(ⓐ)と(ⓑ)の間には伝導帯にほとんど電子が存在しない電気抵抗の大きな領域(空乏層)ができる。		
	【※1】◆ここに電離放射線が入射すると、そのエネルギーによって価電子帯の電子が伝導帯に押し上げられ、電子と正孔の対ができて電流が流れる。◆p型半導体の表面に伝導電子を与えるドナー型の不純物を拡散させてn型の層を形成、あるいはn型の表面に電子を受け取るアクセプタ型の不純物を拡散させてp型の層を形成したものを拡散接合型と呼ぶ(α)。◆p型半導体の表面にLiを拡散させn型の層をつくり、加熱しながら逆バイアス電圧をかけてn型層で余ったLiをp型層にドリフトさせて電気的に中和しi層(intrinsic region; 空乏層に相当)を形成したものをLiドリフト型と呼ぶ(X, γ, β)。		
	【※2】中性子を計測するにはコンパータを付設する。 【いろいろなタイプ】		
	【※3】n型半導体の表面を化学処理して薄い酸化層をつくり、その上に金などのメタルを蒸着すると、酸化層はp型の働きをする(β, α , 重荷電粒子)。		
	【※4】n型のHPGe(高純度ゲルマニウム)結晶の一方の面にLiを熱拡散させてn層を、もう一方の面にBイオン注入でp層をつくり、両者の間全体が空乏層になるまで逆バイアスをかける(+は高ドープすなわち不純物濃度が高いことを表す)(γ)。		
	【※5】内部境界があるため外部境界がなくても作動。		
	【※6】①は絶縁性のi型半導体(空乏層に相当)。 【※7】②(低キャリア濃度)は放射線あるいは光の吸収層、③は電子の加速層となり、電子なだれを起こさせる。 【※5,6,7】フォトダイオード(PD)は放射線検出器としても使われる。また、光検出器として読み出し系にも使われる。		
④	電流モード	$R1 = Q/e = Ne$ (Q : 電離電荷, N : 電子・正孔対数, e : 素電荷)	
	パルスモード	$R1 = Qp$ (1回の量子入射による収集電荷量) & Np (パルス発生回数) (量子の種類別にそれぞれ)	
⑤	電流モード	電流・電圧計測モジュール(図3※1)	
	パルスモード	パルス計測モジュール(波高分析型)(図3※1) あるいは パルス計測モジュール(波高弁別型)(図3※1)[パルス波高を弁別]	
⑥	電流モード	$R2 = i$ or $R2 = V/(R)$	
	パルスモード	【波高分析型の場合】 $R2 = [Hp(\text{パルス波高}) \text{ vs. } Cp(\text{パルス計数})]$ 【波高弁別型の場合】 $R2 = \text{弁別されたパルス波高値 } Hd \text{ に対するパルス計数 } Cd$	
⑦	電流モード	◆ $N = Q/e = Q = CV = \int idt \leftarrow V(t)$ ◆ $\Delta E = \epsilon N$ (ϵ : ひとつの電子・正孔対をつくるのに要する平均エネルギー) ◆ $D = \text{校正定数} \times (\Delta E/m_s) (S_M/S_S)$ [m_s : 半導体の質量, S_M : 近傍物質の質量阻止能, S_S : 半導体の質量阻止能] (Bragg-Grayの空洞原理による) ◆ $H_e(d) = D \times \text{換算係数}$ ◆ $H^*(d) = D \times \text{換算係数}$	
	パルスモード	【波高分析型の場合】◆ $[Ei \text{ vs. } Ni] \propto [Qp \text{ vs. } Np] \propto [Hp \text{ vs. } Cp] (Ei \propto Qp)$ 【波高弁別型の場合】◆ $Ni \propto Np \propto Cd$ (弁別された Ei に対して) (弁別された $Ei \propto$ 弁別されたパルス波高値 Hd) ◆ $D = N \times \text{換算係数} \times \text{校正定数}$ 等, $H_e(d) = N \times \text{換算係数} \times \text{校正定数}$ 等, $H^*(d) = N \times \text{換算係数} \times \text{校正定数}$ 等 (弁別された Ei に対して)	
		電流モード	$D, H_e(d), H^*(d)$
⑧	パルスモード	【波高分析型の場合】エネルギースペクトル $[Ei \text{ vs. } N]$ 【波高弁別型の場合】 $D, H_e(d), H^*(d)$ (弁別された Ei に対して)	

4. 固体の電離作用を利用する

半導体素材における電離作用(電子・正孔対の生成)を利用する測定法(半導体検出器)の原理を図4及び表2に示す。

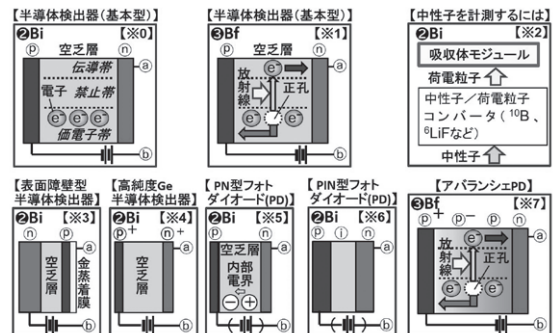


図4 半導体検出器の吸収体モジュールのイメージ図。

5. 半導体デバイスの特性を利用する

半導体デバイスが放射線に対して示す特性変化（酸化膜での電子・正孔対の生成に起因）を利用する測定法（MOSFET線量計及びDIS線量計）の原理を図5、6及び表3、4に示す。

<この稿続く>

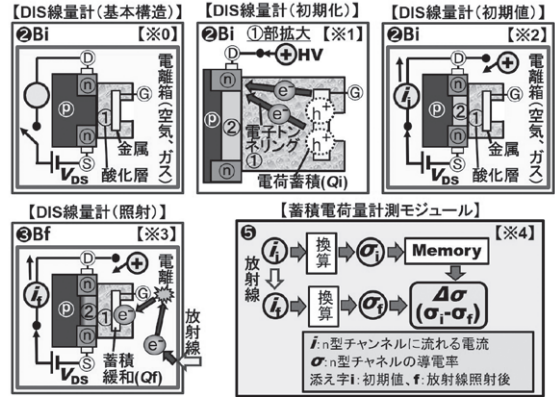


図6 DIS線量計の吸収体モジュール及び読み出し系モジュールのイメージ図。

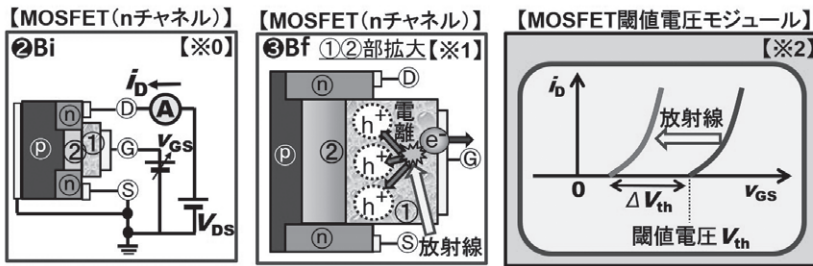


図5 MOSFET線量計の吸収体モジュール及び読み出し系モジュールのイメージ図。

表3 MOSFET線量計における各モジュールの機能。

測定器名	MOSFET 線量計 [図5参照]	対象放射線	X, γ, β, n(コンバータと組合わせて)
①	A=ΔE(吸収エネルギー)		
②	【※0】◆④(ゲート)の引き出し部の金属と①の酸化膜と②の半導体(もともとは④層)が MOS(金属/酸化膜/半導体)構造になっていて、FET(電界効果トランジスタ)を形成している。◆ゲート電位 V _{GS} がゼロであれば、①(ドレイン)と③(ソース)の間は①→②→③となっていて電流は流れない(①→②は逆方向だから)。◆V _{GS} がある電圧(閾値電圧 V _{th} という)以上になると、④はプラスに帯電し、①(酸化膜=絶縁体)がコンデンサーの働きをして②の部分はマイナスに帯電する。◆①と③の間に「①→②(反転層という)→③」という n 型のチャンネルができ、電流(I _d)が流れる。		
③	【※1】◆①の酸化膜に放射線が入射すると電離が起こり電子・正孔対が発生する。◆電子は移動度が大きいので酸化膜外に速やかに取り除かれるが、正孔は①の酸化膜中のトラップに捕獲され固定正電荷(h ⁺)を形成する。◆このため①→②→③のチャンネルの抵抗が低くなる(コンデンサーの原理から、②がよりマイナスに帯電する)。		
④	R1=Q(①の酸化膜中のトラップに捕獲された正電荷量)⇒「①→②→③」チャンネルの抵抗減少		
⑤	【※2】閾値電圧 V _{th} が負方向にシフトする。		
⑥	R2=ΔV _{th}		
⑦	◆ΔE∝Q ∝ ΔV _{th} ◆D(吸収線量)∝ ΔE×校正定数等 ◆H _b (d)=D×換算係数×校正定数 ◆H [*] (d)=D×換算係数×校正定数		
⑧	D, H _b (d), H [*] (d)		

表4 DIS線量計における各モジュールの機能。

測定器名	DIS(Direct Ion Storage)線量計 [図6参照]	対象放射線	X, γ, β, n(コンバータと組合わせて)
①	A=ΔE(吸収エネルギー)		
②	【※0】◆DIS(Direct Ion Storage)線量計は、④がフローティングゲートになった MOSFET が電離箱の中に収められた構造をしている。◆④は電離箱内の気体に対してオープン。 【※1】◆④(ドレイン)に高電圧(+HV)を印加すると、トンネル効果によって④から①に電子が流れ、この結果④には正電荷が蓄積する(Qi)。◆④はプラスに帯電し、①(酸化膜=絶縁体)がコンデンサーの働きをして②の部分はマイナスに帯電する。◆①と③(ソース)の間に「①→②(反転層)→③」という n 型のチャンネルができる。 【※2】◆この状態で①と③との間に流れる電流量を測定する(I _i :初期値)。		
③	【※3】◆電離箱に放射線が入射すると、器壁で発生した電子がガス分子を電離し、この電離で生じた電子が④に集められ、すでに蓄積していた正電荷を緩和する(Qi⇒Qf)。◆このため n 型チャンネルの導電率が変化し、①と③との間に流れる電流量も変化する(I _i となる)。		
④	R1=ΔQ=フローティングゲート④の蓄積正電荷量の減少(Qf-Qi)⇒n チャンネル(①→②→③)の抵抗増加。		
⑤	【※4】n型チャンネルの電流変化から導電率の変化Δσを求める。		
⑥	R2=Δσ		
⑦	◆ΔE∝ΔQ∝Δσ ◆D(吸収線量)∝ ΔE×校正定数等 ◆H _b (d)=D×換算係数×校正定数 ◆H [*] (d)=D×換算係数×校正定数		
⑧	D, H _b (d), H [*] (d)		

ガラスバッジ担当事務所の電話番号の設置と ガラスバッジお問い合わせ専用フリーダイヤルの変更


この度、ガラスバッジ担当事務所の電話番号が2020年8月より変更となりました。
また、ガラスバッジお問い合わせ専用フリーダイヤルの番号が変わります。
お手数おかけいたしますが、電話番号のお控え等ご訂正くださいますよう、お願い申し上げます。

■ ガラスバッジ担当事務所

担当事務所	TEL/FAX	担当都道府県
札幌事務所	TEL : 011-206-6801 FAX : 011-200-2030	北海道
仙台事務所	TEL : 022-727-9572 FAX : 022-727-9574	青森県・岩手県・宮城県・秋田県・山形県・福島県
東京事務所	TEL : 03-3816-5210 FAX : 03-5803-4890	茨城県・栃木県・群馬県・埼玉県・千葉県・東京都・神奈川県・新潟県・山梨県・長野県
名古屋事務所	TEL : 052-220-6722 FAX : 052-220-6721	富山県・石川県・福井県・岐阜県・静岡県・愛知県・三重県
大阪事務所	TEL : 06-6369-1566 FAX : 06-6368-2057	滋賀県・京都府・大阪府・兵庫県・奈良県・和歌山県・鳥取県・島根県・岡山県・広島県・山口県・徳島県・香川県・愛媛県・高知県
福岡事務所	TEL : 092-262-2235 FAX : 092-282-1256	福岡県・佐賀県・長崎県・熊本県・大分県・宮崎県・鹿児島県・沖縄県

※FAX番号に変更はございません。

■ ガラスバッジお問い合わせ専用フリーダイヤル

 **0120-506-997** (平日9:00~17:00)

上記フリーダイヤルへおかけいただきますと音声案内が流れます。
音声案内にしたがい、お問い合わせください。

FBNews 編集委員のご紹介



原 明 (はら あきら)

この度、FBNewsの新編集委員に任命されました営業統括本部の原です。1974年から46年間に亙り、主に放射線計測器の輸入、開発、販売の業務に携わってきましたが、線量計測には、なぜか縁がありませんでした。浅学非才の身、編集委員ですが、一読者として、読者目線で、皆様に喜んでもらえるFBNewsをお届けしたいと、考えています。よろしくお願ひ申し上げます。



五十嵐 仁 (いがらし ひとし)

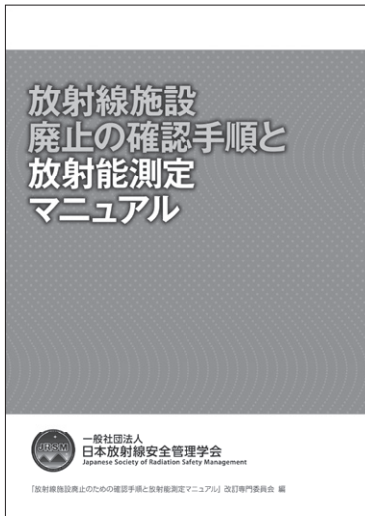
この度、新編集委員としてFBNewsに携ることになりました医療機器技術課の五十嵐仁と申します。弊社が輸入販売しているがんの放射線治療装置、治療計画装置の設置、保守等をメインに、QA・QCも含めた放射線治療の分野を担当していますので、この方面からも情報発信出来ればと思っております。宜しくお願ひ申し上げます。



藤森 昭彦 (ふじもり あきひこ)

この度、新たに編集委員として活動させて頂くことになりました原子力事業本部の藤森と申します。以前、電力会社で放射線管理に関する業務などに携わっていました。この経験などを活かしつつ、ふと目にとまり、皆様に興味をもって読んで頂けるような誌面づくりを目指して参りたいと思ひます。どうぞよろしくお願ひいたします。

新刊紹介



放射線施設廃止の確認手順と 放射能測定マニュアル

編者 「放射線施設廃止のための確認手順と放射能測定マニュアル」改訂専門委員会

定価 8,000円+税

書籍コード ISBN978-4-9909689-0-8

2020年6月27日発行

本欄の読者の皆様は、放射線管理に携わる者として、「放射線施設の廃止」という言葉にどのようなイメージをお持ちだろうか。「ものすごく大変そう」「苦労話を聞いたことがある」「自分の職場を『廃止』するなんて…」私にとってはそのような印象の、よくわからないができるだけ考えたくない話だった。そのため、いざ実際に自分が部分廃止を実行せねばなら

なくなった時、まず始めたことは本書の前身の2007年版マニュアルを座右に置き、「何をやるのか」「どうやって進めるのか」「必要な手続きは何か」等を調べることだった。

本書は、第1章「概要」、第2章「手順」から始まる。様々な提出書類の見本も掲載されていて大いに参考になるが、さしあたって何から始めたらよいか不安な場合は、「2.2 廃止のための事前準備」から読むことをおすすめする。普段の管理業務でもなじみのある単語が多く、いつもの業務を続けている中で、「今日からできる準備は何か」が見えてくることと思う。

廃止措置とは「放射線管理をしなくてもよい空間に戻すこと」であり、除染と汚染検査・評価が作業の大半を占める。本書では、第3章から第8章まで、様々な対象物ごとに除染方法、汚染検査の方法、測定器の選定方法などが、具体的に細かく解説されている。2007年版にはなかった「放射化物の評価方法」の章もあり、現場の写真が豊富に掲載されているため、管理者にとっても、はつりやコア抜きに携わる作業員にとっても、大変参考になる。

第9章には除染作業で出る大量のRI廃棄物・放射化物の処理方法と注意点が解説されている。また、廃止措置には足場掛け・高所作業・クレーン操作などの有資格作業も多く、普段の管理業務ではなじみのない法令も遵守しなければならない。そのため事業所内の他部署との連携も必須であり、第10章「その他の管理」には、それらの情報がまとめられている。

科学的な根拠に基づき「これで今後の放射線管理は不要となりました」と自信をもって言い切る判断を、主任者が1人で下すことはなかなか難しい。本書はそのための拠り所として十分な事例と経験に基づいて執筆されており、廃止措置について系統立って解説されたガイドブックとして頼るに足るものである。当面は廃止の予定はない施設の管理者の方も、とりあえず本書を座右に置いて、「放射線施設の廃止」という言葉のイメージを「ものすごく大変そう」から「こうやればいいんだ」に変えておいてはいかがだろうか。

(聖マリアンナ医科大学 アイソトープ研究施設 廣井 朋子)

[FBNews]総合目次 その48(No.517~528)

Table of contents for FBNews No.528, organized by issue number (2020 1.1 No.517 to 2020 12.1 No.528). Each entry includes the article title, author, and page number.

サービス部門からのお願い

測定依頼票が見当たらないときは…？

平素より弊社のガラスバジジサービスをご利用くださいまして誠にありがとうございます。

測定依頼の際に同封をお願いしております「測定依頼票」は、「お届けのご案内」の右側部分にございます。ミシン目で切り離してご使用ください。

「測定依頼票」を紛失されたときは、次回分の「測定依頼票」をコピーし、ご使用期間を当該期間に訂正してご使用ください。「測定依頼票」の再発行は行っておりません。

コピーなどの方法が取れないお客様は、メモ用紙にご使用期間、返却モニタ個数を記入し、測定依頼してください。お客様のご理解とご協力をよろしくお願いいたします。

測定依頼票

ガラスバジジ (ガラスリング) の測定を依頼します。

事業所名 千代田テクノロ診療所

部署名 放射線科

担当名 千代田 太郎

電話番号 03-1234-5678

ご使用期間 **2021年1月1日～2021年1月31日**
2020年12月1日～2020年12月31日

※測定依頼される際には、返却されるガラスバジジ(ガラスリング)の個数をご記入くださいますようお願いいたします。

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

返却個数を記入してください

担当印をお願いします

編集後記

●2020年の主役は、1年前には全く想定の外にあった「コロナ禍」であった。オリンピック・パラリンピックを延期に追い込み、国際政治にまで影響が及び、しかもまだ終息の兆しも見えていない。悟ったことは「コロナとは“共生”するしかない」ということである。

“コロナ”とは大きさ100nmのウイルスである。細菌もそうであるが、ウイルスも多種多様である。人間は、自分たちにとっての都合で、害鳥/益鳥、害虫/益虫などと分類するが、ウイルスにも害/益の2分ができるのであろうか？

今度のコロナはヒトに重篤な肺炎 (COVID-19) をもたすが、マウスには無害な存在だという。ウイルスなしにヒトは生きていけないという専門家も居るという。戦後暫く経つまで日本人はお腹に回虫を“飼って”いた。回虫駆除の成功が花粉症を生むことになったとする学説もある。例えばは良くないかも知れないが、気になる悪さをしようがしまいが、我々はウイルスと共生する運命にあると腹を括るべきなのである。

そして、放射性汚染というものは“見つかったとき (量

の多寡に拘わらず) 直ちに除去すべきもの”と条件反射的に考える“きれいな好き日本人”の性向についても、これをきっかけに、“待てよ”と立ち止まって考えてみて欲しいと希うものである。我々は有害ウイルスを含め、様々なリスク要因と共存せざるを得ないのである。

- 想像力と創造力は、国家企業の別を問わず、指導者に求められる重要な資質である。我々はそこに望みを託して日々を生きていると言って良い。中川恵一先生のコラムではCTC社のフィルムからガラスへの切り替えの決断を称えているが同感である。
 - 本号で、岡田アドバイザーが「放射線測定は考古学である」とする興味深い考察を披瀝されている。これに呼応するように家田淳一先生の「エネルギーの将来、スピントロニクスの構想」を掲載できたことを嬉しく思っている。
 - 恐ろしく先がよく見えない1年であったが、来る年はそれが“思い出話”として笑って過ごせるような“良い年”となることを願って止まない。
- 読者の皆様、1年間お付き合い戴き有り難うございました。(加藤和明)

FBNews No.528

発行日/2020年12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 原明

五十嵐仁 藤森昭彦 高橋英典 中本由季 廣田盛一

発行所/株式会社千代田テクノロ

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/03-3252-2390 FAX/03-5297-3887

<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)