

2021年日本アイソトープ協会奨励賞 受賞者研究紹介

(五十音順, 所属は掲載時)

偏極中性子を用いたスピン流伝播の観測

南部 雄亮

Nambu Yusuke



1. はじめに

スピントロニクス研究において、スピン自由度の流れ、すなわちスピン流の生成と制御が重要な課題となっている。絶縁性の高い磁性体ではスピン流はマグノンの横成分によって伝搬されることは知られていたが、スピン流の伝搬方向を決めるマグノン歳差運動の回転方向（マグノン極性）を含めた直接検出はこれまでなされてこなかった。フェリ磁性絶縁体 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) は Gilbert 減衰項が既知の磁性体の中で最小であることからマグノンの高寿命が期待され、スピントロニクス研究に頻繁に利用されている。YIG を対象として、偏極中性子非弾性散乱によるマグノン極性の直接検出を行った¹⁾。

2. 方法

偏極中性子散乱実験にはフランス、Institut Laue-Langevin の熱中性子三軸分光器 IN20 を用いた。実験では偏極中性子実験に多用される水平散乱面直方向の中性子偏極ではなく、散乱ベクトル (Q) 方向を用いた。磁場も Q 方向に印加することで YIG の磁気モーメントを揃え、「カイラル項」測定を通したマグノン極性の観測を非弾性散乱領域において行った。

3. 結果及び考察

偏極中性子散乱実験の結果、YIG 中の主要な音響モードと光学モードにおいてマグノン極性が互いに

反転していること、それらの分散関係、強度及び極性が理論計算とほぼ完全に一致することを明らかにした¹⁾。YIG において、スピンゼーベック効果測定から明らかになった生成スピン流は、温度上昇に伴い室温付近から減少し始める温度依存性を示す²⁾。充分低温では音響モードのみが熱活性化されるが、昇温に従い光学モードがソフト化し、室温以上で熱活性化され始める。このとき、光学モードは音響モードと反対符号のマグノン極性を持つため、スピン流伝播が逆向きの競合を受ける。その結果、スピンゼーベック信号の減衰が引き起こされる描像が成り立つ。

4. 結論

スピントロニクス研究では、誘起されたスピン流を逆スピンホール効果によって電圧として観測する手法がこれまで一般的であった。今回初めて観測されたマグノン極性は、スピン流の伝播方向を決定しており、スピン流の安定化機構やスピントロニクス物質の開発・設計指針に欠かせない微視的情報である。スピン流伝播の運動量・エネルギー分解された情報がスピン流の温度変化の定性的理解に繋がった。

1) Y. Nambu, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **125**, 027201 (2020)

2) T. Kikkawa, *et al.*, *Phys. Rev. B.*, **92**, 064413 (2015)

(東北大学金属材料研究所, (国研) 科学技術振興機構 FOREST, 東北大学高等研究機構)

低酸素環境下における光子ならびに 重粒子放射線が与える生物効果の機構解明

平山 亮一

Hirayama Ryoichi



1. はじめに

放射線生物作用の発現は、放射線が生体を通過する際に連鎖的な3つの反応過程を経た最終結果である（図1）。最初は放射線の飛跡に沿って生体高分子を構成する原子・分子の電離と励起が起こる物理学的過程である。引き続き電離・励起が起きた生体高分子や水分子からラジカルが生成され、DNA等の細胞内小器官への障害を引き起こす化学的過程へ移行する。DNAの損傷は細胞死の主要因になるため生物に備わっている修復機構によって修復されることで細胞を死から救っている。損傷部位が誤って修復された場合は細胞死や突然変異の原因になる。細胞は人体を構成する基本単位であるため、複数の

細胞に放射線の影響が残ると体内の組織や組織同士の機能を損ない個体への影響として発現する。これらは生物学的過程と言われ、放射線が生体を通過して数分から数年単位で観察できるようになる。このような放射線生物作用は放射線の種類によって大きく異なってくる。ここでは重粒子線を使った放射線生物作用の特徴をX線やγ線等の光子放射線と比較して紹介する。

2. 放射線生物作用と酸素効果

放射線の生物影響は酸素によって増感されることが‘酸素効果’として古くから知られている。このメカニズムについては、酸素によるDNA損傷固定（酸化）や還元性ラジカルの中和反応と言った化学的過程での反応で説明されてきたが、私たちはDNA損傷修復プロセスを制御することで酸素効果の程度が大きく変化することを明らかにし、酸素効果のメカニズムに生物学的過程も重要な役割を示していることを見いだした。重粒子線による酸素効果は光子線よりも小さく、化学的過程や生物学的過程の役割も小さいことが分かった。

3. 重粒子線ではなぜ酸素効果が小さいのか？

重粒子線がもたらす酸素効果はなぜ小さいのか。その答えは重粒子線の物理学的過程にあった。重粒子線の飛跡に沿って原子・分子の電離と励起が高密度に生じるため、水分子由来のラジカルが近距離で生成し、直ちに両者が再結合することで酸素分子が形成される。そのため、低酸素環境下であっても重粒子線照射によって酸素が生成し、酸素存在下と同様の生物効果が現れることを実験的に証明した。

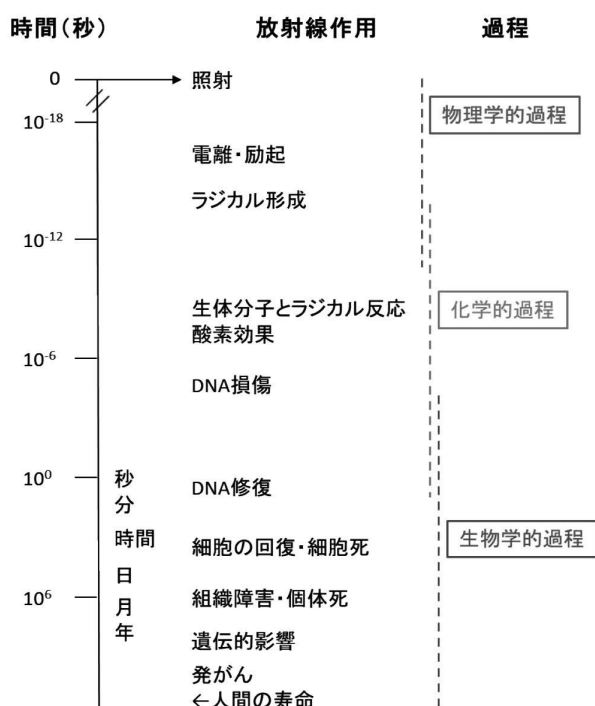


図1 放射線生物作用と時間経過

4. 結論

重粒子線生物作用の発現は光子線と比較すると空間的・時間的な物理学的過程が大きく異なり、その後の反応過程では両放射線の効果は更に異なったものになり、生体への影響となって現れる。重粒子線

特異的な生物効果は3つの反応過程を丁寧に説明していくことで理解が深まると考える。

((国研)量子科学技術研究開発機構 量子生命・医学部門 量子医科学研究所)

ナノクレイを利用した放射線治療用 3次元ゲル線量計の開発



前山 拓哉

Maeyama Takuya

1. はじめに

放射線治療の高度化により、がんの形状やその動きに合わせ、より生物効果の高い線質を用いた複雑な線量分布の形成が可能となっている。一方で、従来の電離箱を用いた測定を繰り返すことにより得られる3次元線量分布に対して、1回の照射で生体等価材料中での3次元の線量分布を評価できる手法の開発が求められている。また、がんの重粒子線治療では、線量の集中性が高く細胞致死効果の高い重粒子線（主として炭素イオン線）を病巣に集中的に照射する。効果的な治療法であるが、重粒子線に対するほとんどの物質の線量応答は線エネルギー付与（LET）を通して重粒子線のエネルギーに依存するため、その物理線量分布を正確に計測することは困難となっている。筆者らの研究グループは量子ビームが引き起こす特異的な化学反応とその位置情報を任意に制御することで、多彩な3次元化学線量計が作れるのでは？との着想のもと、研究に取り組んでおり、実際に、クレイナノ粒子をゲル化剤とし、鉄イオン（ Fe^{2+} ）のみから調製されるナノコンポジットフリッケゲル（NC-FG）線量計を提案し、その線量応答がLETに依存しないことを示した。

2. 方法

一般に、LETの増加に従う線量計の感度の低下

はターゲットの放射線分解生成物が密に生じることによる再結合反応の促進によって引き起こされる。ゲル線量計の化学反応メカニズムを制御しLET非依存の特性を付与するためには、(i) 再結合反応後の生成物に対して反応が進むようにすることと、(ii) 放射線誘起の酸化反応と還元反応を同時に進行させることの2つが必要になってくる。また、(iii) 反応後の生成物がゲル中に保持されることも必要となる。(i)、(ii)については、これまでの放射線化学研究において明らかになっている水溶液線量計を適用することで、達成可能であると容易に想定できるが、(iii)において化学線量計に多量に含めなければならないゲル化剤が反応機構の制御を困難にしまう。そこで、注目したのが、理化学研究所において研究されていたナノクレイを用いたゲル材料の研究である。筆者らの研究グループは、少量のナノクレイを添加するだけで線量分布の保持に必要な特性を持たせることや、無機ゲル化剤としてのナノクレイはゼラチン等の有機ゲル化剤に比べて、水分分解ラジカルとの低い反応性を有する利点を見出し、多種多様な3次元化学線量計の開発が可能となった。

3. 結果及び考察

開発したNC-FG線量計は1回の照射で、炭素線からアルゴン線の物理線量分布を良く再現する3次

元線量分布を測定できることが明らかになった。一方で、測定には数 100 Gy が必要となり、高感度化が必要となる。そこで、化学反応後の生成物の定量手法を従来の核磁気共鳴画像法や吸光光度法から蛍光光度法に変えることで、高感度化を試みた。直近では、NC-RFG (nanoclay-based radio-fluorogenic gel) においても、重粒子線の線量分布を再現可能な線量計を作成可能であることを見出している。

4. 今後の研究

今回は放射線治療用 3 次元ゲル線量計の開発として重粒子線の線量分布測定に向けた試みを取り上げた。これ以外にも、量子ビームが引き起こす特異的な化学反応を制御し、その反応量・位置情報を高感度・高分解能に取得したりできる新たな計測技術の開発は、放射線の生体影響の解明や、生体が受ける影響の度合いや治療効果（生物線量）を模した新奇的な 3 次元生物線量計の開発への展開も期待される。

(北里大学理学部化学科)

プロフィール



○南部 雄亮

昭和 54 年生まれ。平成 21 年京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻修了。博士(理学)。日本学術振興会海外特別研究員 (Johns Hopkins University), NIST 客員研究員時代に中性子散乱を始める。東京大学物性研究所助教、東北大学多元物質科学研究所助教を経て、平成 27 年東北大学金属

材料研究所准教授及び令和 2 年東北大学ディスティングイッシュトリチャー、現在に至る。科学技術振興機構、東北大学高等研究機構を兼務。専門は中性子散乱を主軸とした物性物理学研究。偏極中性子を用いた新しい散乱手法の開発に興味を持っている。

○平山 亮一

昭和 53 年生まれ。東海大学、東海大学大学院を経て平成 18 年千葉大学大学院修了 (学位:理学) 後、放射線医学総合研究所 (当時) に入所し、研究所の統合、組織再編により現職。専門は放射線生物学を軸とした粒子線治療生物学や放射線化学。趣味は地元「ちばら

き」の魅力を勝手に伝えること。香取神宮、あやめ、山車、伊能図、鰻等。

○前山 拓哉

昭和 57 年生まれ、平成 23 年東京大学大学院工学系研究科修了、博士 (工学) 取得、平成 23 年理化学研究所、特別研究員、平成 25 年基礎科学特別研究員、平成 28 年北里大学理学部化学科、助教、現在に至る。専門は、放射線誘起の化学反応を基にした線量計開発。これまでに重粒子、陽子、中性子、電子、X・γ線を用いて、新奇的な線量計開発に取り組んでいる。

