

## 第 70 回放射線科学研究会聴講記

標記研究会は 2019 年 10 月 25 日（金）午後 1 時から 5 時半までサンエイビル 3 階 電子科学研究所講義室において、新井康之氏（ONSA 奨励賞受賞講演、京都大学医学部附属病院）、今岡達彦氏（量子科学技術研究開発機構）、西尾勝久氏（日本原子力研究開発機構）、小野田忍氏（量子科学技術研究開発機構）、森下和功氏（京都大学）の 5 名の講師をお招きして開催した。座長は前半 2 件を、児玉靖司氏（大阪府立大学）が、後半 2 件を奥田修一 ONSA 専務理事が務めた。なお、講演会終了後、講師の先生を囲んで技術交流会が行われた。

## 1. (ONSA 奨励賞受賞講演)

## 医療の現場で用いられる放射線～骨髄移植の前処置における実態と工夫

京都大学医学部附属病院 血液内科 新井康之

この度 ONSA 奨励賞を受賞された新井講師の講演は、血液内科医として取り組まれている急性骨髄性白血病 (AML) や急性リンパ芽球性白血病 (ALL) の治療としての骨髄移植に関する話題であった。疫学調査によれば、白血病は固形がんに比べると、発生頻度は高くないが若年層でも発生し、明白な原因が不明という特徴がある。は、急性白血病に有効な治療法と導入されており、その際に移植適患者に、全身放射線照射 (TBI) をベースに、大量化学療法を加えた前処置が用いられる。これは腫瘍細胞を根絶させるために必要な処置であるが、そのままでは骨髄細胞が枯渇してしまうので、提供者 (ドナー) からの造血幹細胞を移植するというのが、この治療法の枠組みである。これでドナー由来造血幹細胞が生着し、新規造血機能が働くようになれば治療は成功といえるが、実際には、AML に対するさい帯血移植を受けた患者の 5 年生存率は 50% でしかない (図 2)。



図 1 講演中の新井講師

生存率を下げる主な原因は、再発と合併症である。そこで、この生存率を上げるためにはどのような前処置が最適かを探ることにした。具体的には、放射線量の違いや抗がん剤との組み合わせの違いで、生存率にどのような影響が現れるのかについて、日本造血細胞移植学会のレジストリーデータ (総件数 45,000) を元に解析した。例えば、AML に対するさい帯血移植において、前処置をこれまでの CY (シクロフォスファミド) /TBI の組み合わせに対し、大量シタラビンを組み合わせた HDCA/CY/TBI を用いて強くした場合、治療成績が改善されることが分かった (図 2)。一方、同じ AML に対して、骨髄移植、あるいは末梢血幹細胞移植をした場合には、先の前処置の効果が逆転し、HDCA/CY/TBI と比べて、CY/TBI の組み合わせの方が生存率がよい結果となった (図 3)。この傾向は、別の白血病である ALL でも見られた。すなわち、HDCA の組合せにより前処置を強くして生存率が改善されるのは、さい帯血移植だけに見られる現象であることが分かった。すなわち、移植片が何かによって、前処置を変える必要があることが明らかになった。現在これらの解析結果をもとに、日米共同研究による解析を進めている。一方、データベースを用いたコホート研究には、必ず交絡因子が存在するため、今後は機械学習を用いてデータベースから最適治療を選択するという研究も重要と考えられる。今後、機械学習により移植リスク因子が明らかにできるようになれば、造血幹細胞移植のさらなる進展が期待される。

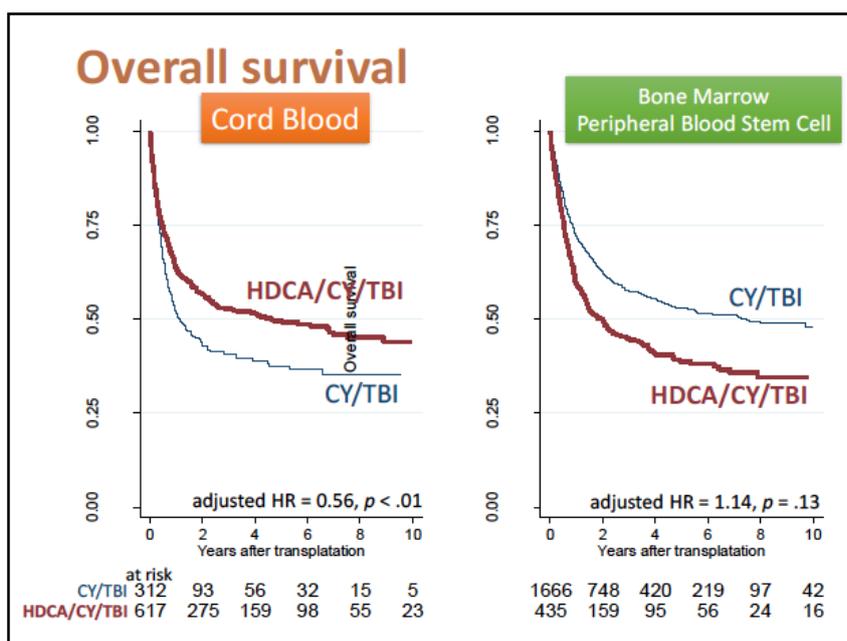


図2 急性リンパ性白血病における、移植片毎の、前処置による全生存率の比較を示す。左側が臍帯血、右側が骨髄・抹消血幹細胞移植のデータ

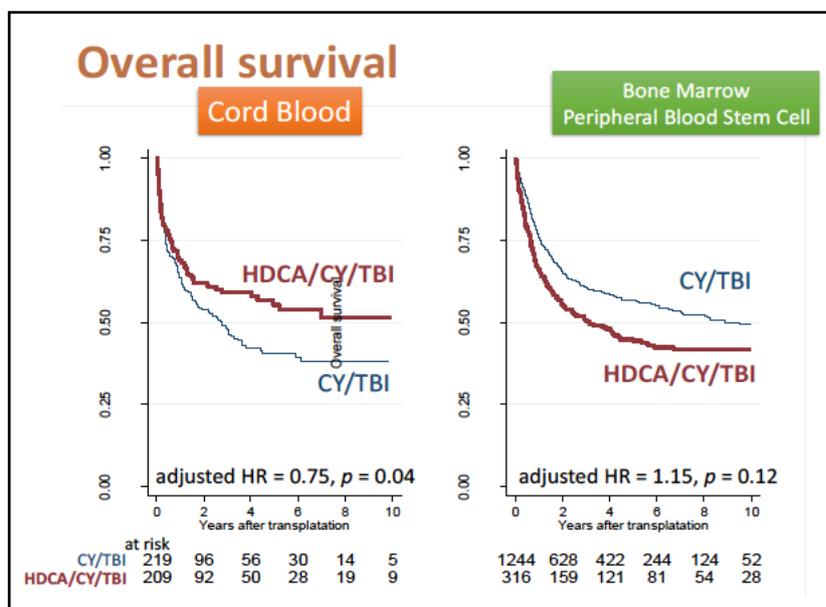


図3 急性リンパ性白血病における、移植片毎の、前処置による全生存率の比較を示す。左側が臍帯血、右側が骨髄・抹消血幹細胞移植のデータ

(児玉靖司 記)

2. 放射線によるがんリスクと動物実験

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 今岡達彦

本講演は、今岡達彦講師による放射線による生物影響に関する最新知見を含めた専門家の共通認識とされる研究成果についての解説から始まった。この点に、学生も含めた私たち聴衆が理解しやすいようにという今岡講師の細やかな気遣いを感じた。放射線による生体影響には、しきい値のある確定的影響としきい値を想定しない確率的影響がある。前者は、一定以上の細胞が働かなくなることが原因となるためにしきい値が存在する。一方、後者は、DNA 損傷の修復誤りによる DNA 変異が原因と考えられており、どんなに低い線量でもある確率で変異が生じるために、しきい値が想定されない。そこで、放射線防護では、がんリスクの直線-しきい値無し (LNT) モデルが採用されている。しかしながら、DNA 変異ができてからがんができるまでは長い潜伏期間があるため、変異の数がそのままがんリスクの大きさと比例関係になるかどうかということには議論がある。一方、最新の原爆被爆者調査では、被ばく線量が 0~100mGy の集団だけを解析しても、線量によるがんリスク増加は有意であり、また、被ばく線量とがんリスクの関係が、女性では線量の一次式、男性では二次式になることが報告されている。今岡講師は、前半の放射線被ばくとがんリスクの話題について、次のようにまとめた。放射線被ばくとがんリスクの関係に LNT モデルが仮定される根拠は、①DNA 損傷と変異が低線量・低線量率で線量に比例すること、②疫学研究においてがんリスクは 100-200mGy 以上では線量に比例することにある。また、疫学研究は結果の信頼性を評価しながら解釈することが重要である。



図 1 講演中の今岡講師

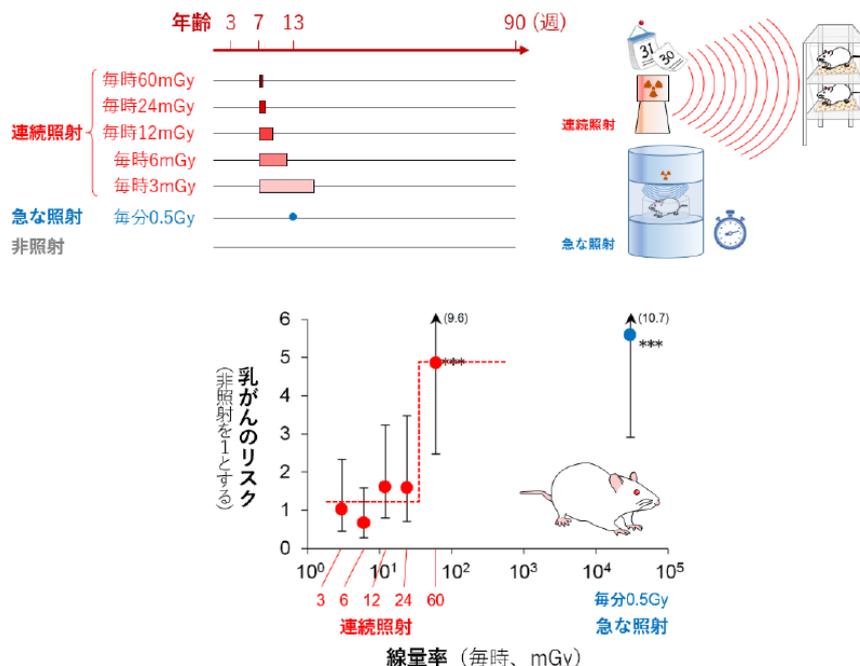


図 2 累積線量 4Gy を様々な線量率 (3~60mGy/h) で照射した際のラット乳がんのリスク

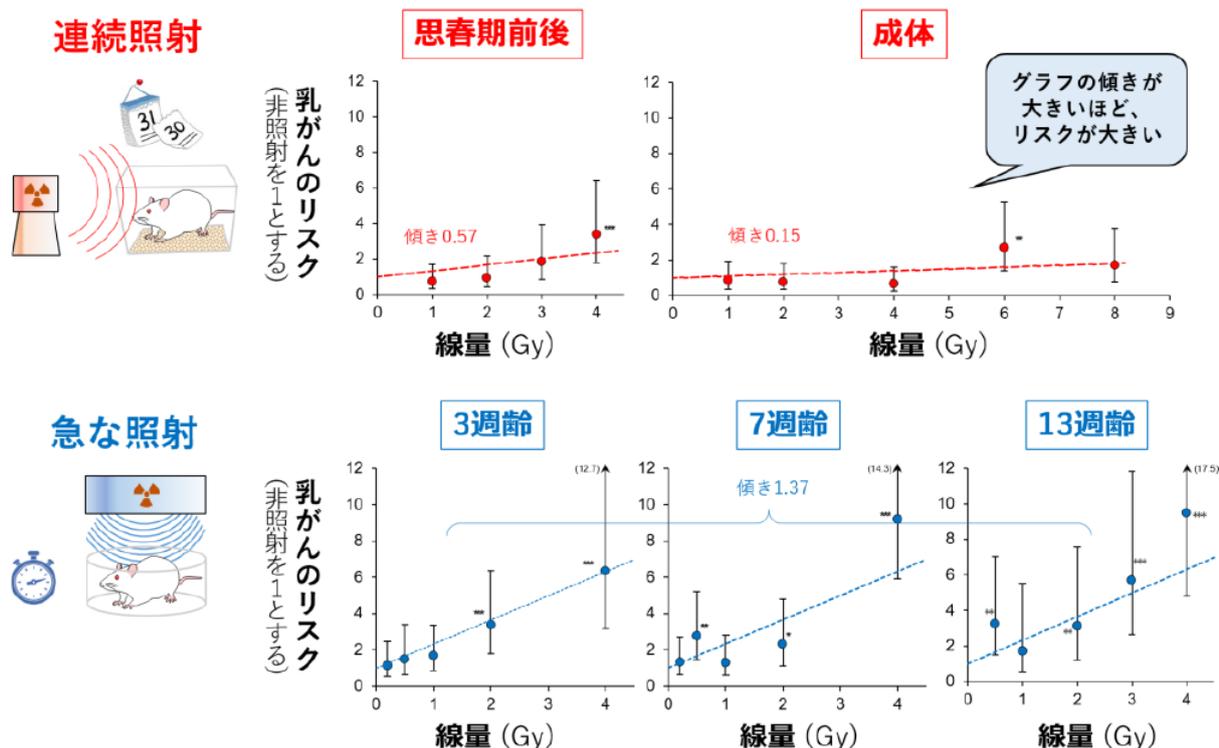


図3 被ばく年齢とラット乳がんリスクとの関係

次に講演の後半は、今岡講師の研究に関する話題として、ラット乳腺発がんの線量率効果と年齢依存性に関する研究成果が紹介された。まず、4Gy の  $\gamma$  線を 3~60mGy/h の様々な線量率で照射して乳がんの発症率を調べたところ、3~24mGy/h では乳がんリスクが非照射群と比べて有意に増加せず、60mGy/h 以上で有意に増加することが分かった(図2)。また、ラット年齢の思春期前後と成体期の被ばくによる乳がんリスクを調べたところ、前者の方が後者に比べてリスクが高くなることが明らかになった(図3)。さらに、高線量率と低線量率による発がんリスクを比較し、線量率効果計数(DREF)を求めた研究では、思春期前後の被ばくで、DREF=2.4、成体期被ばくで、DREF=9.4 という結果が得られた。これまでに報告された放射線発がんに関する様々な動物実験における DREF は 2~10 であり、本研究の成果はその範疇に収まることが分かった。一方、近年、がん放射線療法に重粒子線が使用されるようになり、特に小児に用いた場合の二次発がんに関する情報を得るために動物実験を行った。その結果、 $\gamma$  線は乳がんリスクに年齢依存性が見られなかったのに対し、炭素イオン、速中性子では乳児期、思春期前の被ばくによるリスクに比べて、思春期後のリスクが高いことが分かった。しかしながら、治療で使われる炭素イオン線の線量は  $\gamma$  線より少ないこと、速中性子線の発生も少ないことを考慮すると、本研究の成果は重粒子線による二次がんのリスクは通常の放射線治療より低いことを示唆するものであった。最後は、放射線発がんのメカニズムの話題となった。ラット乳がんにおいて、特定遺伝子領域に放射線による遺伝子変異が見つかるかどうかを調べたところ、自然発がんに対して放射線誘発がんでは欠失変異が多く、がん抑制遺伝子 Cdkn2a の欠失変異も 14 例中 3 例で見つかった。この結果から、放射線発がんに見られる変異が自然発がんのそれとは異なることが明らかになった。このように、放射線誘発がんは自然発がんとは異なる特徴があるとすれば、それを手がかりに発がん過程を初期から追跡できる可能性があり、今後の進展が大いに期待される。

(児玉靖司 記)

3. 原子力機構における核分裂の実験研究

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 西尾勝久

核分裂は、1938年に発見され、原子力エネルギー利用の基礎となる現象である。研究用原子炉で得られる中性子は、材料・物性研究、原子核研究などの基礎研究、中性子捕獲療法によるがん治療、核分裂に対する原子核の安定性や自然界の元素の生成の研究に用いられてきた。天体での元素合成過程で作られた重い原子核が核分裂し、再度核反応に関与する、“核分裂リサイクル”によって最終的に生成される元素の割合が大きく変化すると考えられる。この核分裂過程そのものは複雑であり、現在でも原子核物理学における課題として残されている。原子力機構（JAEA）で開発した新規実験手法について紹介された。

原子核が正の電荷を帯びた液滴のようにふるまうとする液滴モデルによれば、核分裂で等しい大きさの原子核が2つ生成される。一方、原子核を構成する陽子と中性子のエネルギー準位構造に伴うエネルギー補正を考慮すると、ウラン等の核分裂で知られるように、大小異なる重さの核分裂片が生成されることが示される。核分裂片の質量数分布は、原子核の内部構造を顕著に反映する重要な観測データである。2000年以降、核分裂の実験研究に関して大きな技術の進展があり、これまで測定が不可能と思われた原子核領域の核分裂が調べられるようになってきた。

多核子移行反応とは、 $^{18}\text{O}$ 等のビームをアクチノイド原子核に照射し、入射核と標的核の間でいくつかの陽子や中性子を交換、 $^{238}\text{U}$ 周辺の原子核を生成する過程である。JAEAでは、タンデム加速器施設（東海）で得られる重イオンビームを利用し、独自に開発した実験手法で、多核子移行反応を用いて中性子過剰領域までのアクチノイド原子核の核分裂データを取得できるようになった。 $^{237}\text{Np}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{249}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$  など、様々な標的を利用することができ、多くの原子核について調べられるのが有利な点である。

散乱原子核を検出する  $\Delta E-E$  検出器、および核分裂片を検出する多芯線比例計数管 (MWPC; Multi-Wire Proportional Counter) の配置を図2に示す。核分裂に伴って放出される即発中性子の測定のため、まわりに有機液体シンチレーション検出器を並べてある。異なる元素のみならず、すべての同位体について同位体の識別ができる。これに対応して複合核が一意に決まり、それぞれの複合核ごとに核分裂データを取得することができる。



図1 講演中の西尾講師

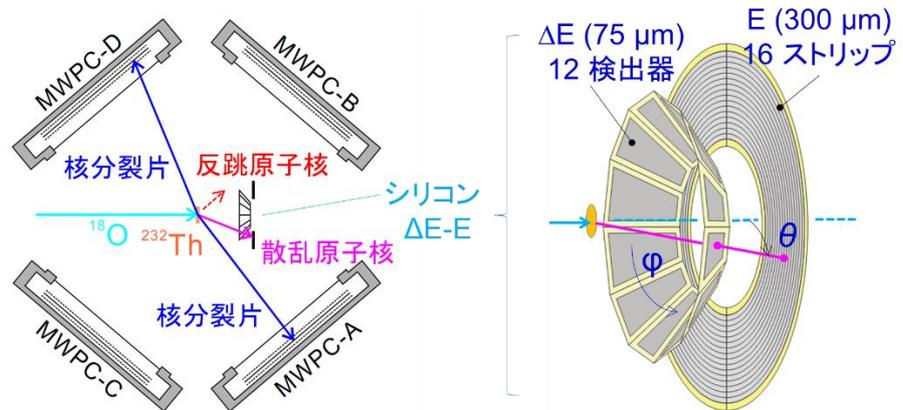


図2 実験のセットアップ。シリコン  $\Delta E-E$  検出器 (右: 拡大図) を、ビーム前方にマウントし、散乱原子核を識別しながら運動エネルギーと放出角度を決定する。

多核子移行反応を用いた核分裂測定の実験原理を図3に示す。この例では、 $^{238}\text{U}(^{18}\text{O}, ^{16}\text{O})^{240}\text{U}$  チャンネルによって複合核  $^{240}\text{U}$  が生成されている。移行する陽子の数と中性子の数により、励起状態にある様々な複合核が生成される。イベントごとにチャンネルを分析し、反応後に生成される散乱原子核(図2では  $^{18}\text{O}$ ) をシリコン  $\Delta E-E$  検出器で検出した。多核子移行反応のもう一つの特徴は、複合核の励起エネルギーが連続的に分布することである。この励起エネルギーは、散乱原子核の運動エネルギーを分析することで決定できる。核分裂障壁(鞍点)よりも高い励起状態に遷移すると、複合核は核分裂する。ここで生成される2つの核分裂片を核分裂片検出器で同時計測することで、核分裂特性(たとえば核分裂片の質量数)を得る。核分裂障壁より低い領域では、核分裂は観測されないが、このしきい値が核分裂障壁の高さに相当する。

本実験で得られた23核種の核分裂片の質量数分布の結果は、 $^{180+238}\text{Np}$  ( $E_{\text{beam}}=162\text{ MeV}$ ) を用いた1回の実験で得られた。得られた実験データとモデル計算による考察から、“マルチチャンス核分裂”の存在が明らかになった。

マルチチャンス核分裂とはよく知られた現象で、核分裂断面積の評価でも取り入れられている。励起状態にある複合核がいくつかの中性子を放出した後に核分裂する現象をいうが、この効果が一番現れるのは核分裂確率の励起関数である。核分裂片の質量数

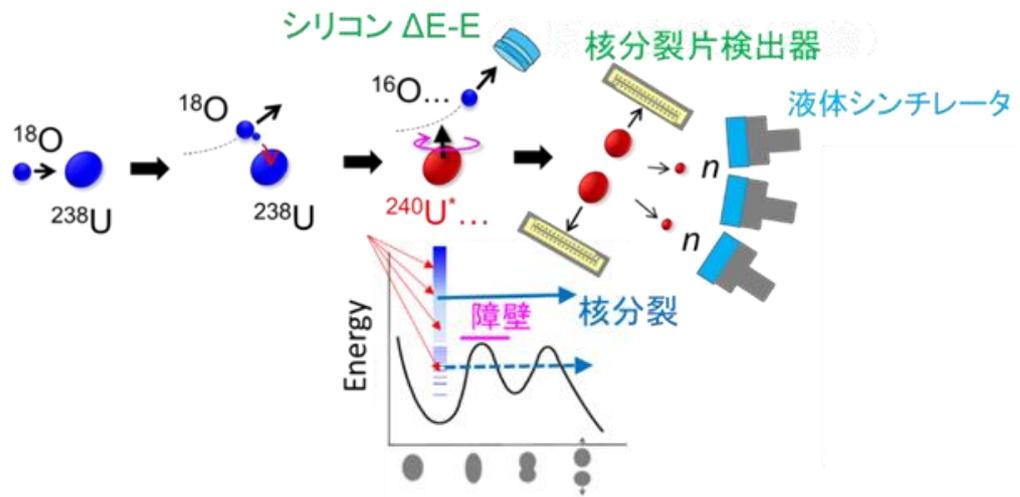


図3 多核子移行反応による核分裂測定の実験原理

分布に対する影響は、これまで詳細に議論されてこなかった。本実験で  $^{240}\text{U}$  の質量数分布 (40-50 MeV データ) と、理論モデル解析によって得られた各チャンス核分裂の成分が得られた。マルチチャンス核分裂を取り入れたことでデータがうまく再現された。本実験と解析から得られたもう一つの重要な結論は、励起エネルギーに対する殻構造の消滅である。核分裂や重イオン核融合反応でよく使われている値の妥当性が、本研究により示された。

この装置を使い、さらに  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$  標的を用いることで、52核種の核分裂片質量数分布のデータを取得し、このうち27核種は新データとなった。また実験データから、複合核の回転軸に対する核分裂片の放出角度分布が得られた。この分布は、多核子移行反応で持ち込まれる角運動量に関する情報を有しており、角運動量についての定量的な議論ができる。現在の解析から、入射核から標的核に移行する核子の数に比例して角運動量が増加している様子が明らかになった。この結果から、角運動量が核分裂過程に与える効果を調べることができる。また、核分裂に伴って放出される即発中性子の同時計測で、核分裂片と即発中性子の相関測定から核分裂メカニズムをより詳細に調べられている。

利用された加速器で、核分裂に関する先端研究が行われて、多くの新しい成果に結びついていることを初めて知り、強く感銘を受けた。

(奥田修一 記)

#### 4. 量子ビームにより作製する量子センサの形成技術

量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 小野田忍

張り巡らされたセンサからの情報がネットワークに流れ、情報処理されて、私たちの生活が豊かになっている。それらを支えるのは、高度なセンシング技術、情報を運ぶ通信技術、多量の情報を処理するコンピュータ等々である。その次世代技術として、(1) 従来のスーパーコンピュータに代わる量子コンピュータ、(2) 情報セキュリティ強化のための量子情報通信技術、(3) 高精度・高感度な量子センシング技術等が求められている。これらを実現するために近年着目を浴びている技術の一つとして、量子技術が挙げられる。

ダイヤモンド結晶中の NV (窒素-空孔) センターは、量子技術の根幹をなす量子ビット・量子センサとして知られており、世界的に活発な研究が進められている。スピン数 (S) が 1 で、図 2 に示すように、637nm に高輝度な発光ピーク (ZPL) を持ち、たった一つであっても顕微観察が可能ほど強い蛍光を示す。更に、室温で数 ms を超える長いコヒーレンス時間 (量子状態を保持することのできる時間) を有するこの特性を利用することで、古典的手法では為し得ない超高感度な量子センサが実現されている。講演では、世界的な技術動向にも触れながら、量子ビームによる NV センター形成技術について、世界最高の性能を実現した研究成果や、用いた電子ビームとイオンビームによる結果の違いと特徴などについて詳細な報告があった。

試料全体に均一に NV センターを形成したい場合には、窒素不純物を含むダイヤモンド結晶で、それを貫通する MeV 級の電子線の照射が有用である。同時に形成される空孔クラスター等の目的以外の不要な欠陥は、一般に、照射後の熱処理で除去する。高濃度の NV センター形成のために、高線量で電子線を照射する場合、欠陥が多量に蓄積してアモルファス化し、熱処理でも結晶性が回復しないことがある。それを防ぐために、700~800℃付近での高温状態で電子線照射を行う技術を開発し利用した。その結果、講師らは、世界最高濃度 (45ppm) の NV センターを含有するダイヤモンドを作製し、高濃度 NV センターを量子多体系とみなして、理論的に予想されていた時間結晶や超放射を示すことに成功した。

表面付近や試料の特定の深さ・位置に量子センサを形成する場合には、イオンビームを用いる。量研高崎にあるイオン照射研究施設 (TIARA) では、数 keV~数百 MeV の幅広いエネルギー領域の照射が可能で、イオン種やエネルギーを選ぶことで、表面付近の数 nm から数十  $\mu\text{m}$  までの深さに NV センターの形成を行うことができる。但し、面内や深さ方向の位置制御性は、ビームの照準精度や、イオンストラッグリングによって決まり、高エネルギーほど精度が下がる。位置制御が求められる系では、低エネルギー注入が行われる。



図 1 講演中の小野田講師

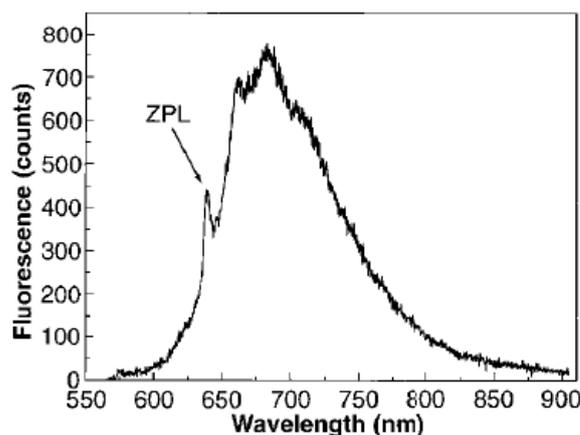


図 2 ダイヤモンド結晶 NV センターの 637nm における高輝度な発光ピーク

イオンビームの飛跡に沿って形成される原子空孔と、注入窒素イオンが複合欠陥を形成する。イオン注入直後は、原子空孔と、飛程終端に主として格子間窒素が存在しており、高温（800～1000℃）の熱処理を行うことで、飛跡に沿った余分な原子空孔が消滅し、窒素が原子空孔と結合して NV センターが形成される。

窒素イオンを keV 級でダイヤモンドに注入すると、表面から浅い位置（数～十数 nm）に NV センターができる。例えば、フラックス  $10^8/\text{cm}^2$  で窒素原子イオンを注入すれば、注入窒素の数%が NV センターとなる。ダイヤモンド上に PMMA レジストを塗布し、電子線描画法で微細孔（ナノホール）によるパターン形成をした上で窒素イオンを注入すれば、意図した箇所に NV を形成することができる。表面から数 nm の深さの NV は、表面に存在する極微量の核スピンを検出する量子センサとして機能し、ナノ核スピン共鳴の研究に利用される。

このように、極浅 NV センターは量子センサとして利用される。一方、量子ビットとしても利点がある。直径が数十 nm のナノホールを介して低エネルギー窒素イオンを注入した時、ナノホールの下に 2 つの NV センターが隣接して形成され、2 量子ビットの量子レジスタとして機能する。例えば、直径が 20nm のナノホールに 10 keV の窒素イオンを 2 個注入すると、90%以上の確率で 20 nm の距離に窒素が注入される。量子レジスタにはさらに、コヒーレンス時間が十分長い必要がある。ナノホールを介した窒素原子注入では、数多くの注入スポットから 2 量子ビットの量子レジスタを見つけることができる。Jacobi らは 6000 個もの注入スポットから、10 個の NV ペアを探し出し、3.9 MHz の強い双極子結合を持つ NV ペアをピックアップすることに成功している。

keV 級の窒素分子イオン注入も、2006 年から取組まれている。窒素分子イオン注入では、試料表面に分子イオンが到達した瞬間に 2 つの窒素原子に分かれる。これらが全く同じ場所に注入され、前述のナノホール径を極限まで小さくした状態とみなせる。つまり、2 量子ビットの量子レジスタである NV センターペアを形成する観点からは、ナノホール注入よりも原理的に優れている。20keV の  $^{15}\text{N}$  分子イオンと 10keV の C イオンを  $^{12}\text{C}$  濃縮 CVD ダイヤモンドに共注入し、距離が短く双極子結合が 55kHz の NV-NV を形成することに成功した。

初めて 2 量子ビットが報告されてから 10 年足らずの間、NV センターのみによる 3 量子ビットへの進展がなく、新しい多量子ビットの形成技術が求められていた。講演者らは、2019 年に、窒素分子イオンより窒素の数が多い  $\text{C}_5\text{N}_4\text{H}_n$  イオン注入技術を開発し、世界で初めて NV センターの電子スピンのみから成る 3 量子ビット化 (NV-NV-NV) に成功した。本研究成果は、さらなる多量子ビット化の可能性を秘めており、室温で使える超並列計算可能な量子コンピュータや量子センサの高感度化などの量子技術の進展に貢献することが期待される。

低エネルギー窒素イオン注入には数多くの利点がある一方で、課題もある。その一つは収率が低いことである。収率を向上する目的で、炭素イオン注入や電子線照射によって原子空孔を補う方法（共注入）もあるが、必要以上の欠陥は NV センターのコヒーレンス時間を短くする要因となり、量子状態の利用の観点から好ましくない。また、収率が低いと注入窒素が NV センターの近傍に残存する。余剰の原子空孔や窒素不純物を消滅させる条件の探索が求められており、イオン注入技術そのものや注入直後の処理に

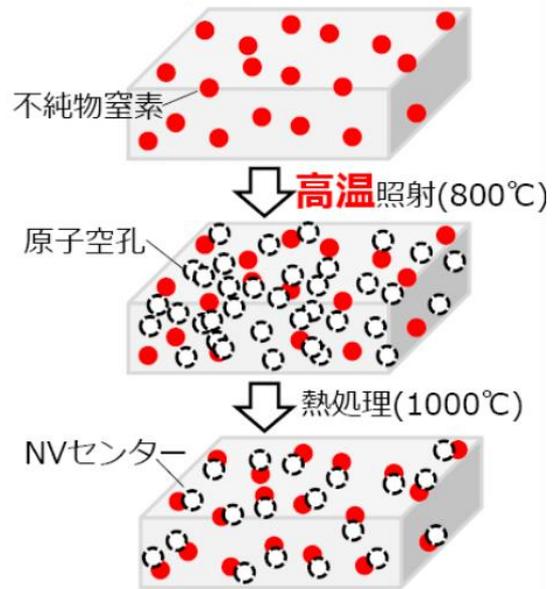


図3 電子線照射による世界最高濃度の NV センター含有ダイヤモンドの作製

関して、研究の余地が多く残されている。

この研究で、有機化合物イオンの利用によって優れた研究成果に結びつくなど、量子ビームの利用技術が多くの可能性を持っている結果が示されており、さらなる研究の進展が期待される。

(奥田修一 記)

### 5. ミクロとマクロをつないで原子炉の安全を予測する

京都大学 エネルギー理工学研究所 森下和功

持続可能な社会を実現するには、原子力エネルギーの利用は欠かせない。講師は元々核融合炉材料の照射効果研究の第一人者である。主に計算による損傷構造発達のシミュレーションで多くの成果を挙げている。特に核融合炉条件におけるバブルの成長において、ヘリウム/ボイド比が2である場合が一番安定であることを見出した研究は、世界的に高い評価を得ている。東京電力福島第一原子力発電所事故以降は、原子炉材料の保全に関する研究にも関与し始めた。今回はそのような原子炉の安全担保に関する研究の講演であった。



図1 講演中の森下講師

原子炉圧力容器は福島第一事故からも良く知られているように、原子炉システムの安全を担保する重要な機器である。その劣化事象として懸念される事項を図2に示す。原子炉で使われている材料の劣化は実際に原子炉で照射して、その特性変化を調べれば良い。ところが原子炉の圧力容器等の主要な部材は40年～60年間使用するものであり、そのような長い期間の照射実験は不可能である。そのため材料試験炉における照射実験が行われるが、原子炉の60年分を1カ月で照射するように、非常な加速照射である。システムが線形ならば問題がないが、非線形ならば、劣化と時間は比例しない。実際それが大きくずれることが実験的に示されている。そのずれを知るためには、照射損傷の機構の理解が必要である。図3は核融合材料開発を目指した計算手法を紹介したものであり、講師は全てを自身のグループで行っている。

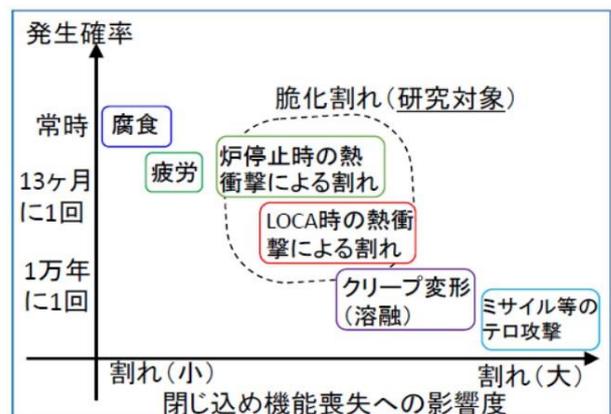


図2 懸念される圧力容器の劣化事象

一方実際には、発電用原子炉の中に監視試験片を入れ、ある期間毎に取り出し、材料特性試験を行い、劣化の予測式と対応させている。劣化の度合いが予測式内であるならば問題は無いが、それ以上ならば問題となる。予測式としては日本電気協会規格 JEAC4201-2007 が電気中央研究所の研究者が中心となって作られた。従来の予測式は過去のデータを基に傾向を示す曲線であったが、これは多少機構論も取り入れ、国内の発電用原子炉のデータのみを使った優れたものである。

しかし、九州電力の玄海1号炉の4回目の監視試験片のデータは図4の太い赤矢印で示すように予測式より遥かに乖離していた。更に同様な結果は伊方1号炉や高浜1号炉でも得られた。そのため2012年版/2013年追補版が作成されたが、それはプラント毎に実測値と計算値のずれ(残差)の平均を求めその分を補正するもので、予測式に下駄を履かせて測定値と合わせているようなものであった。

これに対して講師は、まず残差がどこから生じるのかを検討し、偶然誤差から来ていることを見出した。その中でもプラント依存があることを考慮して、予測において残差の従うべき分布を「ベイズ統計」により提案した。

ベイズ推定とはベイズの定理に基づく。データDが得られたとき、その原因がHである確率(事後確率)は原因HによってデータDが得られる確率(尤度)とデータDを得る前の原因Hの生起確率(事前確率)の積をデータDが得られる確率で割ったものとしている。

講師はベイズ統計による脆化予測の修正を提案し、図5のような結果を3つの原子炉について得ている。図中でJEACの計算値はJEAC4201-2007であり、MC補正はJEAC4201-2013によるものである。ベイズ修正は講師のグループが提案しているもの

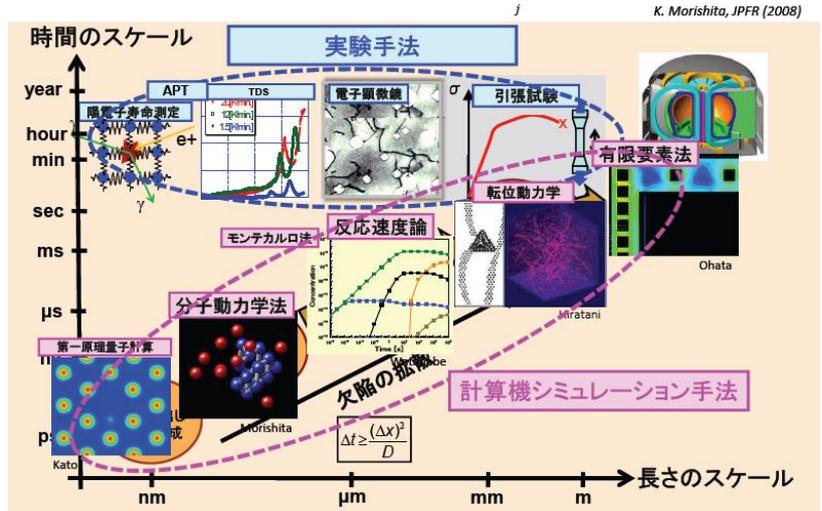


図3 材料照射プロセスと解析手法、マルチスケールモデリング

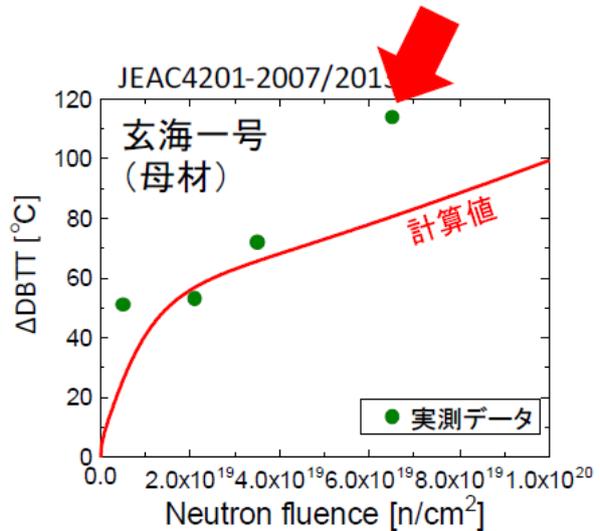


図4 玄海1号炉に対する JEAC4201-2007 による予測値と測定値 (●)

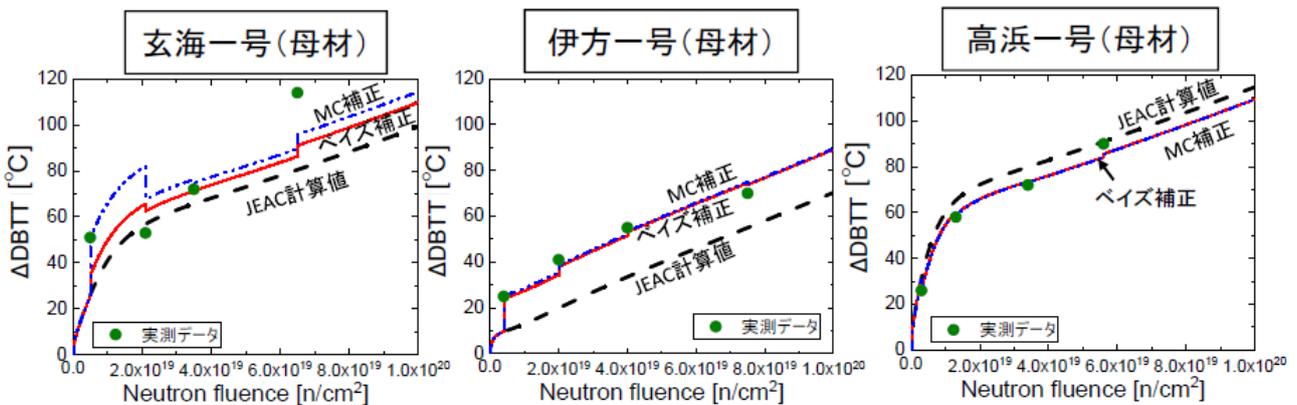


図5 ベイズ統計による脆化予測の修正 (各プラントの脆化量予測のベイズ補正)

のであり、MC補正よりは良いと考えられる。更に発展させて、ベイズ補正值に対してリスクを定量化してみると、DBTTは高浜1号炉が最も高く（初期値が大きい）、残差のバラツキは玄海1号炉が大きい。玄海1号炉が最もリスク値が高いのは、残差のバラツキが大きいためである。压力容器管理の最適化のためには、リスク値の大きさに応じて管理することが重要であると結論付けている。

最後に压力容器鋼管理の高度化に対する提言として、①機構論やマルチスケールモデリングによる予測、②実測、③統計学を用いた補正、④残留リスクの定量化によるリスク評価、⑤リスクに基づく管理に関する意思決定を挙げている。これらは他の分野にも当てはまる危機管理の手法である。

2015年に規制庁主催で「日本機械学会「維持規格」及び日本電気協会「原子炉構造材の監視試験方法」に係る技術評価」が実施された。2012年版/2013年追補及び日本電気協会「原子炉構造材の監視試験方法」2013年追補版について、技術評価書案及びこれに基づく基準解釈文書案が検討された。講師はその検討チームの外部専門家として活動し有益な助言を行っている。ベイズ統計に基づく脆化予測は、そのときの経験がもとになっていると考えられる。これは従来にない手法であり、今後の発展が期待される。

(義家敏正 記)

### 入会勧誘のお願い

協会では放射線利用技術の推進と啓蒙を通して、産業の育成・発展に寄与すべく、ホームページの表紙に示しましたような活動を行っています。これらの活動は主として会員の会費を基に進められております。ぜひお近くの方で関心をお持ちの方に入会をお勧め頂きたいと思っております。入会は法人、個人いずれの資格でも出来ます。お申込はホームページより入会申込書をダウンロードして頂き、必要箇所をご記入、ご捺印の上、郵送にてお送り下さい。

#### 会員種別と年会費(入会金は不要)

個人正会員	10,000円
団体正会員	50,000円
賛助会員	10,000円以上 任意
先端科学研究会会員	100,000円

申込先 〒542-0081 大阪市中央区南船場3-3-27  
 一般社団法人大阪ニュークリアサイエンス協会  
 電話 06-6282-3350 FAX 06-6282-3351

メールアドレス onsa-ofc@nifty.com

お願い: @は@に置き換えて下さい。