# 第64回放射線科学研究会 聴講記

標記研究会は平成29年10月20日(金)午後1時半から5時半まで住友クラブにおいて福谷耕司氏(原子力安全システム研究所)、波多野雄治氏(富山大学)、熊谷純氏(名古屋大学)、木梨友子氏(京都大学原子炉実験所)の4名の講師をお招きして開催した。座長は前半2件を、岩瀬彰宏教授(大阪府立大学)、後半2件を児玉靖司氏(大阪府立大学)が担当した。なお、講演会終了後、4名の講師の先生を囲んで技術交流会を行った。

#### 1. 軽水炉構造材料の照射挙動

(株) 原子力安全システム研究所 技術システム研究所 福谷 耕司

福谷講師は、原子炉材料の照射効果、特に日本において発電炉として用いられている軽水炉の構造材料の照射損傷研究に関する第一人者である。講演では、まず講師の属する原子力安全システム研究所(INSS)の概要に関する説明があった。研究所は2つの研究所(社会システム研究所、技術システム研究所)からなり、ヒューマンファクター、社会意識から材料、情報分析、安全解析まで、原子力に係わる安全性に関して幅広い研究を行っている。

つぎに、軽水炉において放射線の累積的影響を受ける部位として、原子炉圧力容器鋼(低合金鋼)と炉内構造物(ステンレス鋼)における中性子照射損傷の説明があった。圧力容器内での照射環境は、40年運転時で考えると、圧力容器で0.002dpa(沸騰水型炉)~0.1dpa(加圧水型炉)、炉内構造物で10dpa(沸騰水型炉)~100dpa(加圧水型炉)といった大きな

はじき出し損傷が生ずる。このような中性子照射効果が累積する結果、軽水炉構造材料において、伸びや破壊抵抗の低下(照射脆化、図 2)や、照射による材料の性質変化(硬化や不均一変形)、水の放射線分解による水質や電位の変化、応力の変化が複合的に作用して生ずる現象である照射誘起応力腐食割れ(IASCC)といった照射影響が現れる。日本における原子力発電所のいくつかは稼動持からすでに40年以上が経過しており、30年以上経過したものも多い。そこで、これら照射影響に対してどのように対応するかという説明



図1 講演中の福谷講師

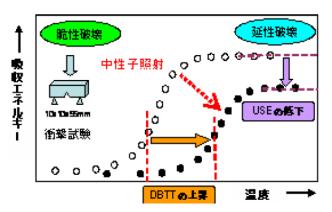


図2 照射に伴う延性脆性遷移温度 (DBTT) 上昇

があった。まず照射脆化における対応として、脆化自体を軽減する方法と、照射脆化を監視管理する対応がとられる。脆化を軽減する方法としては、不純物である銅や燐を軽減したり、ニッケル添加による高靱性化、中性子束を減らすための遮蔽体設置する方法などがとられる。また、照射脆化の監視管理においては、き裂等の欠陥の無いことを定期検査で確認し(供用期間中検査)、監視試験片により、実際の材料の脆化度を確認している。健全性評価の考え方を図3に示す。

評価では、延性脆性遷移温度(DBTT)を正確に予測することが重要であり、現行の予測式はメカニズムを考慮してモデル化したものであり、監視試験片データなどにフィッティングされている。次に IASCC への対応に関する説明があった。 炉内構造物では、IASCC による亀裂の発生時期や進展速度を考慮して

健全性が保たれることを確認し、必要に応じて補修、 交換を行う。加圧水型炉ではボルトの破損が、また 沸騰水型炉では、シュラウド溶接部の IASCC 亀裂進 展評価と破壊靱性値の変化が重要となる。

講演の後半は、原子力安全システム研究所で最近 実施されている研究の紹介があった。照射脆化や IASCCのような材料照射挙動は、中性子による原子 のはじき出しから始まり、欠陥の拡散・反応、多様 な欠陥集合体の形成と成長といった複雑な現象に 基づくものである。そこで、原子力安全システム研 究所では、複雑な照射挙動のメカニズムの理解を目 的として、材料中の照射による微視的組織的変化と

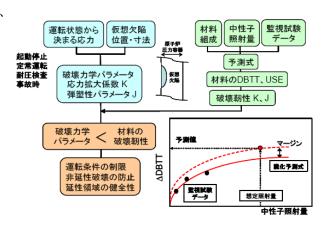


図3 原子炉圧力容器の健全性評価

その過程、性質変化の解明を進めている。このような研究の中から、講演では、アトムプローブトモグラフィ(APT)法による元素分布ナノ分析と超微小引っ張り試験法による強度試験の紹介があった。APT

では、原子の種類別に3次元マッピングを行うことができる。

原子炉圧力容器鋼の監視試験片の原子マッピングの例を図4に示す。銅濃度の高い材料では、固溶度の低い銅がクラスターをまず形成し、その周りにニッケル、マンガンなど他元素が集まることをAPTは示している。銅濃度が低い場合もクラスターは形成されるが、銅はほとんど含まれないこともわかる。講演では、ステンレス鋼における溶質クラスター形成の様子も示され、APT法が照射影響を明確に捕らえることができる方法として印象的であった。

最後に、超微小引張試験について説明があった。 粒界における元素偏析や酸化の効果を単一の粒界 を含む試料で引張試験を行っている。まず収束イ オンビーム (FIB) で1粒界を含むミクロンサイズ の引張試験片を作成し(図 5)、引張試験を行った 結果が示された。

講演では、軽水炉材料の照射効果の基礎的なことから実際に行われている照射効果メカニズムの探索まで幅広く説明があった。原子炉の安全性に対する材料面からの真摯な取り組みが研究会参加者に理解いただけたと思う。

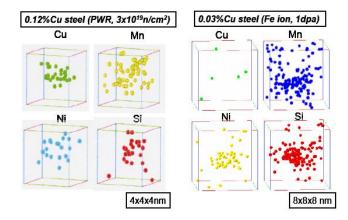


図4 原子炉圧力容器の監視試験材の原子マップ例

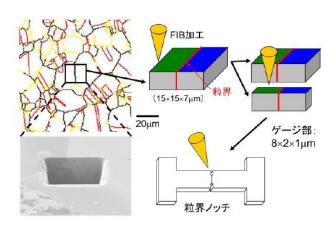


図5 超微小引張試験片の加工方法

(岩瀬彰宏 記)

#### 2. トリチウムの特徴と安全取り扱い技術

富山大学 研究推進機構 水素同位体科学研究センター 波多野 雄治

本講演の講師は、水素エネルギー用機能材料、核融合炉燃料としてのトリチウムの安全取扱い技術、トリチウム環境負荷軽減技術などの開発をミッションとし、国内の大学で最大級のトリチウム実験室(年間使用量 560TBq)を有する富山大学水素同位体科学研究センターに属している。本講演では、まず水素同位体科学研究センターの紹介のあと、核融合炉燃料としてのトリチウムの説明があった。核融合によるエネルギー生産はすでに太陽で行われており、これは 2 個の重水素原子核がヘリウム原子核に核融合する反応による。これに対して、地上に建設する核融合炉は、より反応の起こりやすい重水素(D) ートリチウム(T)核融合炉反応を利用する。核融合炉は核分裂炉に比べて、暴走しない、長寿命



図1 講演中の波多野講師

放射性廃棄物を出さない、燃料がメルトダウンすることはない、などの利点を持つが、kg 単位の放射性元素トリチウムを使用するため、それを完全に閉じ込める技術、測定する技術の開発研究が重要となる。

次に、福島第一原発におけるトリチウムに関する解説があった。ウランの核分裂に伴って核分裂生成物が発生するが、低確率で3つの原子核に分裂することがあり、その1つがトリチウムである。通常は、このトリチウムは  $UO_2$ 燃料の中に閉じ込められているが、福島の事故では燃料が破損し、水中に流れ出して、汚染水を発生させることになった。しかし、この事故が初めての「トリチウムの脅威」ではなく、核実験が頻繁に粉われていた 1960 年代、雨の中のトリチウム濃度は現在より 200 倍高い値を示しているなど、すでに人類の生活の中に人工的に作られたトリチウムが存在していた。

このような具体的なトリチウムに関する話題に続いて、放射性同位体としてのトリチウムの特徴に関する説明があった。トリチウムの物理的半減期は12年、生物的半減期は10-45日である。また表1に、

いろいろな核種から発生する β 線 (電子線) のエネルギーと飛程 を示す。

表が示すように、トリチウムからの β線は低エネルギーであり、空気中、水中において飛程は短く、外部被ばくが問題になることはほとんどない。一方、内部被ばくに対する防護は重要であり、低濃度トリチウムの検出には、一般の放射線検出器は使えず特別のノウハウが必要となる。

表 1 様々な核種からの $\beta$ 線のエネルギー (MeV) と飛程(mm)

核種	エネルギー	空気中	水中	鉄中
³H	0. 0186	4. 7	0. 006	0. 0007
<sup>14</sup> C	0. 156	226	0. 3	0. 04
<sup>32</sup> P	1. 71	6320	7. 9	1. 0
<sup>33</sup> P	0. 249	472	0. 6	0. 07
<sup>35</sup> S	0. 167	252	0. 3	0. 04
<sup>45</sup> Ca	0. 257	496	0. 6	0. 08
<sup>63</sup> N i	0. 0659	52	0. 07	0. 008

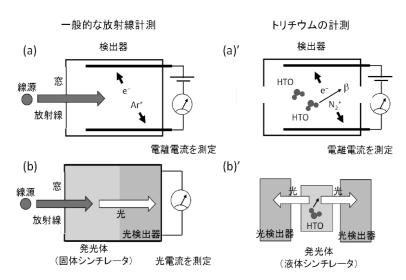


図2 一般的な放射線計測法とトリチウム計測法の比較

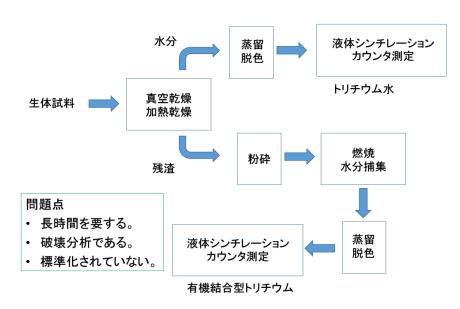


図3 生体試料中のトリチウム濃度測定手順の例

図2に、一般的な放射線計測とトリチウムの計測法の比較を示す。一般的な検出法は がス閉じ込めのために窓が窓 り付けられており、この窓が上がらの低エネレーできなくなる。そう以上できなく、直接出別なる。を検出とで、を含む空気を検出とで、を含む液体を入れて容器 といり、などを用いる。

福島第一原発の近くで取れた生鮮食料品の安全確認のためのトリチウム濃度測定の手順を図3に示す。これら低濃度トリウム測定には手間暇がかかり、どの程度の測定をどの程度の頻度で行うかという議論の行方によっては、膨大な量の生鮮食料品に対する測定のためのかなりの技術開発が必要となるとのことである。

講演の最後に、トリチウム 計測を、通常の分析手段では 見えない「水素」の測定手段 として利用する実例として、 原子炉燃料被覆管用ジルカロ イ合金中の水素分布、イメー

ジングプレートを用いたラジオルミノグラフ法、ベータ線誘起X線計測法により水素を補足している元素の特定といった方法が紹介された。

本講演では、大量のトリチウムを扱うことできる施設を活用した研究をもとに、トリチウムに関する 基礎から応用までわかりやすく解説いただいた。

(岩瀬彰宏 記)

## 3. 細胞内抗酸化性を向上させる低線量放射線バイスタンダー効果

名古屋大学 未来材料・システム研究所 熊谷 純

講演者の熊谷講師は、γ線照射されたシリアンハムスター細胞中に非常に長寿命のラジカルが生成されることを電子スピン共鳴(ESR)法を用いた測定によって明らかにし、これを長寿命ラジカル(Long-Lived Radicals:LLRs)と命名した。LLRsは、γ線4Gy照射により、照射後5時間を経過した頃から約20%増加し、20時間くらいまで高いレベルが維持される。このラジカルは、アスコルビン酸(AA)によって消去される。これまでの研究から、このLLRsは、放射線による致死効果や染色体異常生成には関わらないが、突然変異誘発に関わることが示唆されている。これまでに熊谷講師らは、LLRs生成には、ミトコンドリアの機能不全が関与することを明らかにしている。本講演では、LLRsが関わる放射線誘発バイスタンダー効果の新しい知見について紹介した。バイスタンダー効果とは、放射線被ばくしていない細胞に放射線被ばくと同様の効果が現れる現象をいうが、熊谷講師ら



図1 講演中の熊谷講師

の実験系は、ドナーのCHO(チャイニーズハムスター卵巣)細胞に放射線を照射し、一定時間後にこの被ばく細胞の培地を被ばくしていないレシピエントのCHO細胞に与えて被ばく効果を調べるというものである。 4 Gy被ばくしたドナー細胞の培地をレシピエント細胞に移してESRで測定すると、培地中のLLRsが20%増加した(図2)。

同様のバイスタンダー効果実験でレシピエント細胞における突然変異率を調べると、線量依存的な増加がみられた(図3)。さらに、これらの増加は、培地にアスコルビン酸(AA)を加えると消失した。これらの成果は、培地を介したバイスタンダー効果による突然変異生成にLLRsが関わっていること、さらにAAがLLRs生成と突然変異生成を抑制することを示しており、興味深い。一方、ドナー細胞とレシピエント細胞をヒト(H1299)細胞にして同じ実験をすると、0.2Gy照射でLLRsレベルが逆に30%減少した(図4)。低線量放射線によるバイスタンダー効果としてラジカル生成が抑制される点が注目される。今後の

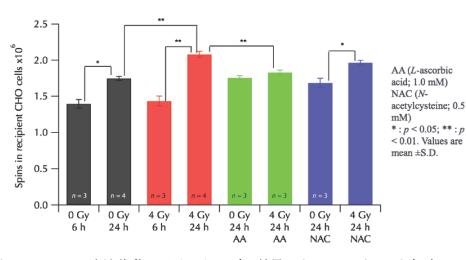


図 2 CHO→CHO 培地移動のバイスタンダー効果によるレシピエント細胞中の長寿命ラジカルレベル。培地移動の際に AA(ビタミン C)を加えると長寿命ラジカルレベルは下がるが、NAC ではでは下がらない

メカニズム解明 が期待される成 果である。最後に、 被ばく細胞から 分泌されるエク ソソームに関す る解析が紹介さ れた。エクソソー ムは、細胞から分 泌される脂質二 重膜に包まれた 小胞で、その中に mRNAやmiRNAが含 まれることから 細胞間コミュニ ケーションの担

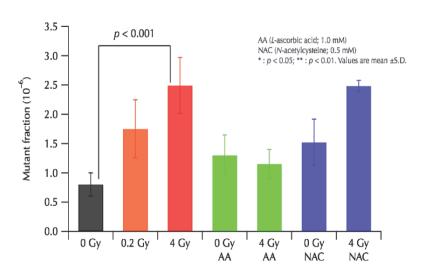


図3 CHO→CHO 培地移動のバイスタンダー効果による突然変異誘発。ドナーを 4Gy 照射すると有意に増加する。培地移動の際に AA を加えると突然変異頻度は下がるが、NAC では下がらない

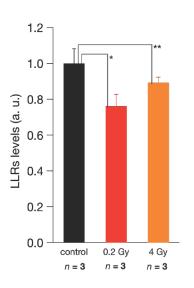


図 4 H1299→H1299 培地移 動バイスタンダー効果によ る長寿命ラジカルレベルの 線量依存性

い手として最近注目を集めている。興味深いことに、ヒト細胞から放出されるエクソソームは、0.2Gy という低線量放射線を被ばくしたときに、粒径分布や粒子数が変動することが明らかになった。これは、先に紹介された0.2Gy被ばくしたヒト細胞でLLRsレベルが下がる現象を考えると大変興味深い結果であり、今後の研究の進展が大いに期待される。

(児玉靖司 記)

### 4. ホウ素中性子補足療法のための生物影響研究

京都大学原子炉実験所 原子力基礎工学部門 木梨友子

がん細胞にホウ素-10を集積させて中性子を照射し、がん細胞を選択的に死滅させる治療法をホウ素中性子補足療法 (BNCT) という。BNCTは、ホウ素-10と中性子との核反応によって生じる $\alpha$ 線とリチウム反跳核ががん細胞を殺すことになるので、X線や $\gamma$ 線に比べて高い殺細胞効果が期待できる。

一方、BNCT普及のためには、がん細胞の殺傷効果とともに、正常組織への障害を最小に抑えることが重要となる。木梨講師はBNCT普及を目指して、多方面からその生物影響研究を展開しており、その一端が紹介された。まず、BNCTによる全身への平均化された被ばく線量について、リンパ球の小核形成を指標にして調べ、従来のX線治療、並びにヨウ素-131内服の場合の小核生成と比較した。その結果、従来のX線治療、及びヨウ素-131内服では、リンパ球小核生成数は、それぞれ治療前の4.1倍、及び2.2倍に増加したのに対し、頭頸部BNCT、及び脳腫瘍BNCTでは、それぞれ1.4倍、及び1.6倍であっ



図1 講演中の木梨講師

た。以上の結果は、BNCTは他の放射線治療に比べて、全身の被ばく影響は少ないことを示している。次に、ホウ素-10存在下で中性子照射されたCHO-K1細胞における突然変異誘発に対するラジカル消去剤であるアスコルビン酸(AA)とジメチルスルホキサイド(DMSO)の効果を調べた。その結果、突然変異誘発頻度は、DMSO処理することにより40%まで、また、AA処理することにより20%まで減少することが明らかになった。このことは、ラジカル消去剤処理によって、BNCTによる突然変異誘発を効果的に減少させることができることを示している。

次に、BNCT時に生じるDNA 2本鎖切断(DSB)の修復能について、DSB修復欠損細胞(Xrs-5)を用いて調べた。DSB修復には、非相同末端結合(NHEJ)と相同組換え(HR)の2つの経路が知られているが、Xrs-5細胞は、このうちNHEJが欠損している。放射線による致死感受性について調べると、親株のCHO-K1細胞と修復欠損株Xrs-5細胞の感受性の差は、γ線の場合よりもBNCTの場合の方が小さくなることが分かった。このことは、BNCTは、放射線感受性に係る個人差がX線治療よりも穏やかであることを示唆している。さらに、CHO-K1及びXrs-5細胞を用いて、BNCT中性照射後のDSB修復動態について、DSBマーカーであるリン酸化ヒストンH2AX(γ-H2AX)

ホウ素を取り込んだ細胞への 熱中性子 の<sup>10</sup>B(n,α)<sup>7</sup>Li 反応 α粒子: 163 keV/μm 飛程9μm <sup>7</sup>Li原子核: 210 keV/μm 飛程4μm **熱中性子** 第細胞 正常細胞 ホウ素の取り込みのない細胞への 熱中性子 の<sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C 反応 p: 58 keV/μm

図2 BNCT 原理説明図

フォーカスを計測することにより調べた。その結果、γ線に比べて中性子線照射時の方が、DSB修復の遅延が、特に修復欠損株Xrs-5細胞において顕著であった。この結果は、アルキル化剤等の抗がん剤を投与されている患者の場合には、NHEJによるDSB修復能が低下しているため、抗がん剤治療直後や抗がん剤併用によるBNCTは避ける方が望ましいことを示唆している。

以上のように、木梨講師は、BNCTによる生物学的影響について、重要な知見をこれまで公表してきている。BNCTはがん細胞選択的な放射線療法として期待されているだけに、このような基本的な生物影響の情報提供が治療法のさらなる向上のために大きく貢献するものと期待される。

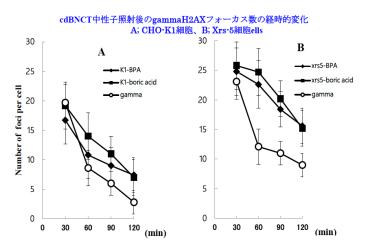


図 3 BNCT の中性子照射後の gammaH2AX フォーカス数 の経時的変化

A;CHO-K1 細胞、 B;Xrs-5 細胞

(児玉靖司 記)