



Photo Yasuhiro Kirano

Index

核物質を含む中性子増倍系の γ 線スペクトル測定による特性把握…名内 泰志	1
[施設訪問記⑨]	
ー 福井県立恐竜博物館・福井県立大学恐竜学研究所の巻 ー ……………	6
[コラム] 80th Column	
【RALSとデブリ取出】……………中川 恵一	11
[学生応援企画]	
東京科学大学総合研究院ゼロカーボンエネルギー研究所/ 環境・社会理工学院融合理工学系原子核工学コース 松本研究室のご紹介	
傳 凌彦/近藤 菜月/吉永 潤石/張 慧芳 ……………エイハンサントス マンド/ペク ダヒョン	12
[放射能・放射線単位・元素名の由来]	
第11回 マイトネリウム $_{109}\text{Mt}$: meitnerium ……………高橋 正	17
令和7年度放射線安全取扱部会年次大会(第66回放射線管理研修会) …	18
[サービス部門からのお願い]	
ファスナーは固定してご返送ください……………	19

核物質を含む中性子増倍系の γ線スペクトル測定による特性把握



名内 泰志*

1. はじめに

福島第一原子力発電所（1F）1～3号機では、プルトニウム（Pu）を含むウラン（U）の二酸化物（UO₂）燃料が溶融し、元の炉心位置から下方へ移動し、構造材やコンクリート等を巻き込みながら冷却固化して燃料デブリを形成している。従前の臨界管理の考え方では核物質が付着した可能性のある物質は燃料デブリとみなし、さらにそれを²³⁵U濃縮度5%のUO₂とみなして扱うことが求められる。この考え方では燃料デブリを全量回収した際の保管体積が増大する。この体積を適切に縮小するため、筆者は中性子照射γ線スペクトル測定（Neutron Induced Gamma ray Spectroscopy, NIGS）による燃料デブリの核特性把握の手法開発に取り組んでいる。その意義や、技術的な課題について紹介する。

2. 核分裂連鎖反応とγ線

核物質を含む体系での核分裂連鎖反応のあらましを図1に示す。外部中性子源から生

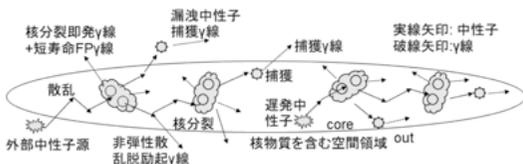


図1 核分裂連鎖反応とγ線発生の様式図

じた中性子が原子核に散乱されて、核物質を含む空間領域の内外でおおむね捕獲か核分裂により吸収される。核分裂では複数の中性子が発生し、それらが輸送した上で、一部が次の核分裂を起こす。図1で外部中性子源を除外した上で、核分裂で発生した中性子が核分裂を起こし発生する次世代中性子数の期待値を実効増倍率 k_{eff} という。ある世代で発生した中性子はすべて吸収されるため、世代間の中性子発生数比の期待値は

$$k_{eff} = \langle \nu \Sigma_f \phi \rangle_{core} / \{ \langle \Sigma_f \phi \rangle_{core} + \langle \Sigma_c \phi \rangle_{core} + \langle \Sigma_c \phi \rangle_{out} \}$$

となる。ここでは $\langle \rangle$ 、 ν 、 Σ_f 、 ϕ 、 Σ_c 、 $core$ 、 out はそれぞれ中性子のエネルギー・方向・位置での積分、核分裂あたりの中性子発生数、マクロ核分裂断面積、中性子束、マクロ捕獲断面積、核物質を含む空間領域、その領域の外部領域である。核物質を含む空間領域・物質を $k_{eff} < 1$ に保つことを臨界管理という。現状 $k_{eff} < 1$ にある燃料デブリの臨界管理とは、燃料デブリとその周囲を操作した際の $k_{eff} < 1$ の担保であり、そのためには前式の各積分項や Σ_f や Σ_c といった物理量の評価が望まれる。しかし、従前の中性子を測定する臨界監視手法では捕獲反応に関する Σ_c 、 $\langle \Sigma_c \phi \rangle_{core}$ or out は測定できない。高速中性子測定で $\langle \Sigma_f \phi \rangle_{core}$ が得られる可能性はあるが、核物質と他の物質の分布・混在度合の分からない状況で中性子束 ϕ を測定から評価することは難しく、した

* Yasushi NAUCHI 一般財団法人電力中央研究所エネルギートランスフォーメーション研究本部 副研究参事

が Σ_f や核分裂性核種の物質量の評価も困難である。

一方、中性子を吸収する核反応の多くは γ 線を伴う。この γ 線スペクトルは核反応、核種に固有である。たとえば核分裂では数100 keV～8 MeV程度の連続スペクトルを示し、捕獲反応では水素が2.223 MeV、 ^{238}U が4.060 MeV、鉄が7.646 MeV等の γ 線を発生する。これらの γ 線は、線量として問題となる長寿命の核分裂生成核種 (FP) の崩壊 γ 線よりもエネルギーが高く、長寿命FP γ 線と弁別できる。この性質により、NIGSによって一部の核反応および内容物を特定できる。

ところで、 γ 線の計数率は反応あたりの γ 線発生数 g と γ 線検出効率 ε により $\langle \varepsilon g \Sigma_{c \text{ or } f} \phi \rangle_{\text{core}}$ となる。 ε は燃料デブリの重量密度と、同じ反応で生じる複数の γ 線の測定や、付加的な透過率測定で概略評価できるが、 ϕ の測定評価はやはり困難で、 $\langle \varepsilon g \Sigma_{c \text{ or } f} \phi \rangle_{\text{core}}$ 測定値からは $\Sigma_{c \text{ or } f}$ が得られない。しかし二種類の γ 線と同じ中性子場から測定し、計数率比 $\langle \varepsilon_c g_c \Sigma_c \phi \rangle_{\text{core}} / \langle \varepsilon_f g_f \Sigma_f \phi \rangle_{\text{core}}$ をとると、 g_c または g_f は反応に対してほぼ定数なので少ない誤差で評価でき、またエネルギーの近い γ 線同士なら $\varepsilon_c / \varepsilon_f$ といった比をとることで個々の ε の誤差が相殺されやすく、そして何より中性子束 ϕ が相殺できる。すなわち計数率比から $\langle \Sigma_c \phi \rangle_{\text{core}} / \langle \Sigma_f \phi \rangle_{\text{core}}$ を評価でき、 ϕ の評価を回避しながら Σ_c / Σ_f 、ひいては核物質量

の比を評価できる。(3)(4)節では反応 i と核分裂の反応率比 $\langle \Sigma_{c,i} \phi \rangle_{\text{core}} / \langle \Sigma_f \phi \rangle_{\text{core}}$ を得る測定と意義等を記す。

3. 捕獲反応クレジット

燃料デブリは原子炉压力容器の下部に形成されているため、成分に鉄鋼を含む蓋然性が高い。鉄鋼の捕獲と核物質の核分裂の反応率の比 $\langle \Sigma_c \phi \rangle_{\text{core}} / \langle \Sigma_f \phi \rangle_{\text{core}}$ は鉄鋼による負の反応度に比例する。 $\langle \Sigma_c \phi \rangle_{\text{core}} / \langle \Sigma_f \phi \rangle_{\text{core}}$ の測定値を得れば、相当する反応度分は燃料デブリを稠密に貯蔵することができる。筆者はこれを捕獲反応クレジット (capture credit, CapC) をとった保管と称している¹⁾。CapCの前提となる $\langle \Sigma_c \phi \rangle_{\text{core}} / \langle \Sigma_f \phi \rangle_{\text{core}}$ の測定手法として、NIGSを京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) の軽水減速型炉心を使って研究した。

図2に示す通り、縦7 cm、横14 cmの集合体フレームを3行×2列装荷した状態で、同フレームに ^{235}U 濃縮度93wt%のU-アルミニウム (Al) 合金燃料をAl被覆した板状燃料 (U-Al燃料) 板と、ステンレス鋼板を装荷し、鋼材が混ざった燃料デブリを模擬した。この模擬燃料デブリのほぼ中央に ^{252}Cf 中性子源を装荷し、全体を冠水させ、核分裂連鎖反応を起こした。模擬燃料デブリの表面から距離46 cmの位置に直径7.62 cm×長さ7.62 cmのBGO検出器 (Bi₄Ge₃O₁₂:ゲルマニウム酸ビスマス結晶を

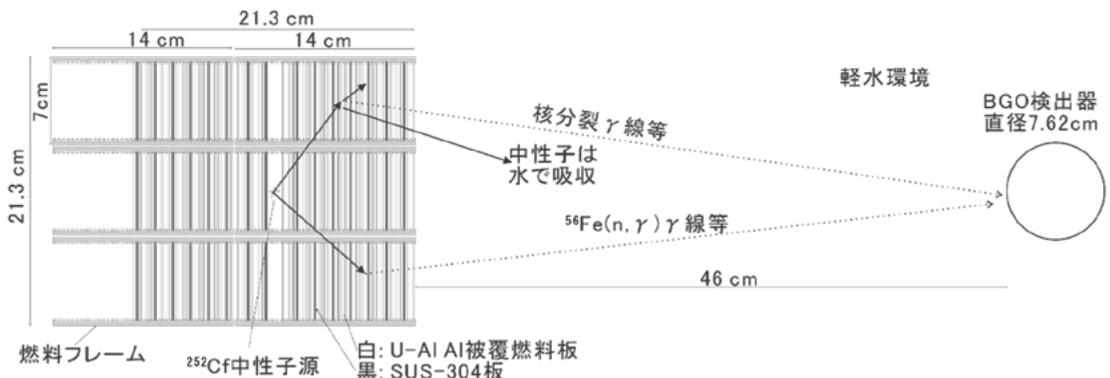


図2 鋼材とUの混合体系での中性子照射 γ 線スペクトル測定体系

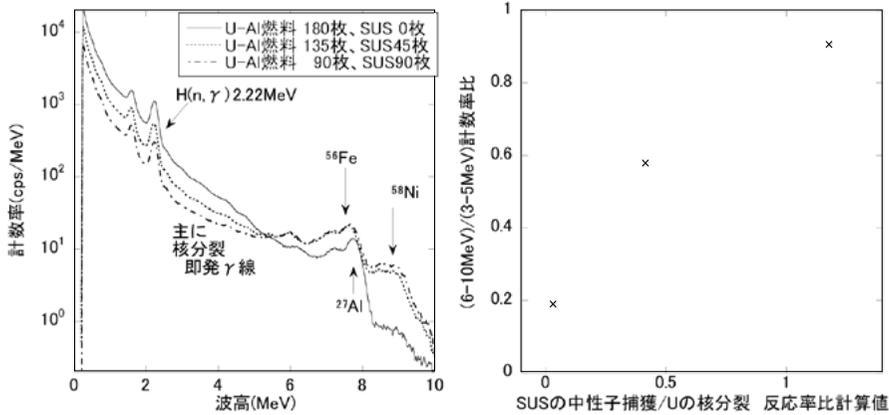


図3 鋼材とUの混在体系でのNIGSによるγ線スペクトル測定結果(左)と、計数率比と捕獲/核分裂反応率比の一意性(右)

用い、高エネルギーγ線の測定に優れる)を配置し、中性子を遮蔽しつつ、エネルギー3 MeV以上のγ線をスペクトル測定した。

測定したスペクトルを図3左図に示す。BGO検出器ではピーク成分の分解はできないが、SUS-304板が多数装荷されるほど鉄(⁵⁶Fe等)、ニッケル(⁵⁸Ni等)などの捕獲反応による6~10 MeV γ線成分が増加し、相対的に3~5 MeVの核分裂即発γ線成分が減少している。3~5 MeVの計数率に対する6~10 MeVの計数率を確認した結果、その比が $\langle \Sigma_c \phi \rangle_{\text{core}} / \langle \Sigma_f \phi \rangle_{\text{core}}$ の反応率比の計算値に対して一意の関係にあることを確認した(図3右図参照)。すなわちNIGSで図3左図のようなスペクトルを得ることで、 $\langle \Sigma_c \phi \rangle_{\text{core}} / \langle \Sigma_f \phi \rangle_{\text{core}}$ の反応率比を得ることが可能である。NIGSの測定データからCapCを用いて燃料デブリの臨界管理を合理化することは現実的な選択肢である。

4. 核物質の核種同定

燃料デブリの残留²³⁵U濃縮度など、アクチニドの組成が確認できると、燃料デブリの臨界管理の保守性を大幅に合理化できる。NIGSでは核分裂核種の存在の証拠となる“Signature”γ線

として先述の核分裂即発γ線が測定できる。ここで残留²³⁵U濃縮度を得るには、1Fの燃料デブリのアクチニド重量の90%以上を占める²³⁸U密度に比例した強度のγ線を測定する必要がある。そこで、²³⁸Uの捕獲γ線(4060 keV)を測定する実験をおこなった²⁾。ここではKUCA固体減速炉心を利用した。図4に測定体系を示す。この炉心では、1辺5.08 cmの正方形の板状燃料と減速材等を積層にして、Al製の角管に装填したものを炉心に装荷する。本研究では93%²³⁵U濃縮度のUをAlに分散した板状燃料と、天然²³⁵U濃縮度のU金属の板状燃料、それにポリエチレン減速材板を積層にした燃料要素を用いた。この条件で炉心の平均²³⁵U濃縮度は5.4%である。この燃料要素を5×5本並べ、中心に²⁵²Cfを装荷し

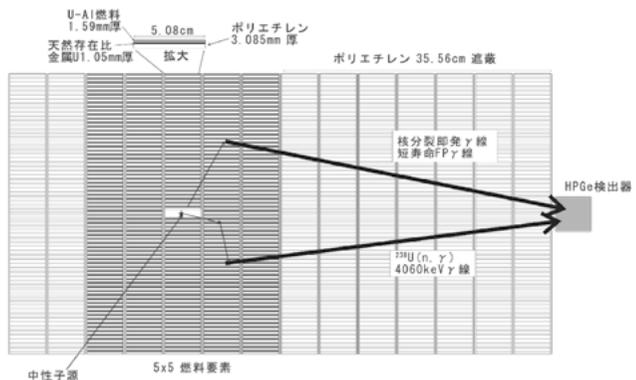


図4 ²³⁸U(n, γ)4060keV γ線と核分裂即発γ線同時測定体系

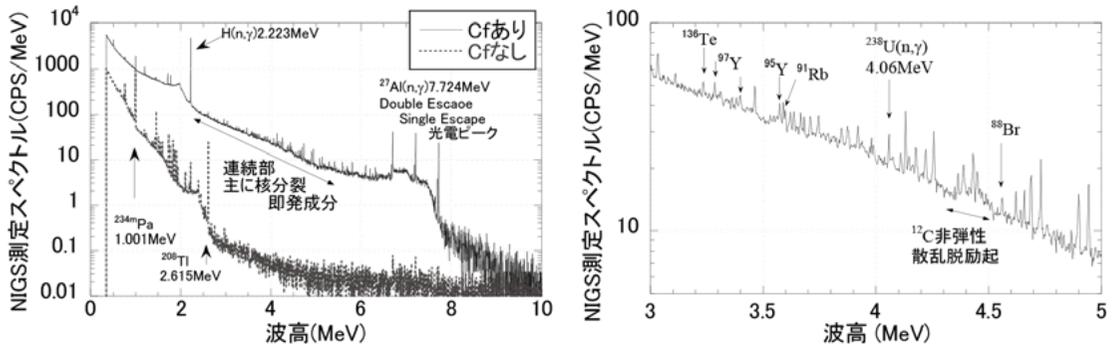


図5 KUCA 個体減速炉心でNIGSにより測定したスペクトル全体図(左)と²³⁸U(n, γ) 4060 keV γ線と短寿命FP γ線(右)

て核分裂連鎖反応を誘導した。この実験では、4060keV γ線が核分裂即発γ線に重畳するため、エネルギー分解能のよいHPGe検出器でγ線を測定することとした。HPGe検出器への中性子の入射を避けるため、燃料要素の外にはポリエチレンのみを装荷したAl製の角管を装荷した。ポリエチレンの層の厚さは35.56 cmである。

測定したスペクトル全体を図5左図に示す。概略は図3と同様H(n, γ) 2.223 MeV γ線と2.5~5 MeVのベースとなる連続成分である核分裂即発γ線に加え、²⁷Al(n, γ) 7.724 MeV γ線の光電ピークとシングル・ダブルエスケープが見られる。波高3~5 MeV領域の詳細を図5右図に示す。ここでは核分裂即発γ線に重畳しながら、²³⁸U(n, γ) 4.060 MeV γ線を検出した。筆者らはさらに平均濃縮度3.1%の体系でNIGSを行い、核分裂即発γ線と4.060 MeVピークγ線の計数率の比をとった。計数率比の体系間の違いは²³⁵U濃縮度の違いに追従しており、NIGSの測定が燃料デブリの²³⁵U残留濃縮度測定評価に有望であることを示した³⁾。

この図5の右図で、4060 keV γ線よりは低計数率のピーク状のγ線が検出されている。これらを分析した結果、核分裂で生じる短寿命FPである臭素(⁸⁸Br)、ルビジウム(^{90,91}Rb)、イットリウム(^{95,97}Y)、テルル(¹³⁶Te)を確認した。これらのFPγ線計数率は、²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Puの核分裂比に依存するため、これらのγ

線計数率で、核種の核分裂比を求める遅発γ線分光(Delayed γ ray assay)が知られる。NIGSで得られる²³⁸U(n, γ) 4.060 MeV γ線と核分裂即発γ線、短寿命FP γ線により、²³⁵U:²³⁸U:²³⁹Pu:²⁴¹Puの特定が期待できる。

5. NIGSの実用化に向けて

1Fの燃料デブリ取り出し・保管へのNIGSの適用について記す。ここでは、米国スリーマイルアイランド原発事故への対応に倣い、燃料デブリが原子炉格納容器の中でいったん遮蔽能力のない、臨界管理上は保守的に設計された細径のキャニスタに封入され、これが別建屋で輸送容器に装荷され、中間貯蔵施設に輸送され、保管されると想定する。NIGS測定は燃料デブリがキャニスタに封入されて以降実施すべきと考える。その段階でのNIGS測定の意義は、臨界安全の確認に基づくキャニスタ保管の稠密化、中間貯蔵建屋体積の縮減である。

検討しているスキームを図6に示す。まず(1)でNIGSの測定、(2)で重量測定を行う。(1)で得る波高スペクトルは様々な反応によるγ線が重畳しているので、(3)で(2)の重量を勘案しγ線毎の応答関数と検出効率を計算した上で(4)でunfoldingを行い、各反応に対するγ線検出数を求める。その上で(5)で検出数を(3)で得た検出効率や反応あたりのγ線発

生率データで除して、反応率比を求める。捕獲反応クレジット (CapC) ではこの段階の反応率比を使って稠密保管の可否を判定する。次に(6)で、核反応の中性子スペクトルを仮定することで平均断面積を求め、これで反応率比を除することで測定可能核種の数密度比を得る。これをもとに実効的な残留²³⁵U濃縮度が得られるので、²³⁵U濃縮度

に基づく臨界管理の可否を判断する。測定可能核種と不可能核種の数密度の比は仮定して(7)でU, Pu, 他の物質の重量比を求め、それにより(2)の重量を按分し、計量管理・保障措置等に用いる。さらにその結果をもとに(8)で中性子輸送を再計算し、(9)で γ 線毎の応答関数・検出効率のための反応率分布や平均断面積を再評価し、(3)~(9)の作業を繰り返して収束解を得る。

測定可能核種と不可能核種の数密度の比の仮定をおく箇所は誤差が生じやすい。この誤差は燃料デブリに含まれていると想定される物質の1元素の同位体を1つ以上NIGSで検出することで大幅に縮小する。筆者らの研究では難測定物質であるがジルコニウム (Zr) でも⁹¹Zr (n, γ) 6.295 MeV γ 線を検出した経験がある。コンクリートについてはケイ素 (²⁸Si)、²⁷AlのSignature γ 線 (捕獲 γ 線等、核種の存在を示す γ 線の総称) が比較的容易に測定出来た⁴⁾。酸素 (¹⁶O) については近傍にUが存在すれば非弾性散乱脱励起 γ 線6.129 MeVが測定できることを確認済みである。

- その上で、今後の研究開発の課題としては
1. 反応あたりの γ 線発生数のデータの充実・精度向上
 2. 応答関数・効率や、中性子輸送・反応

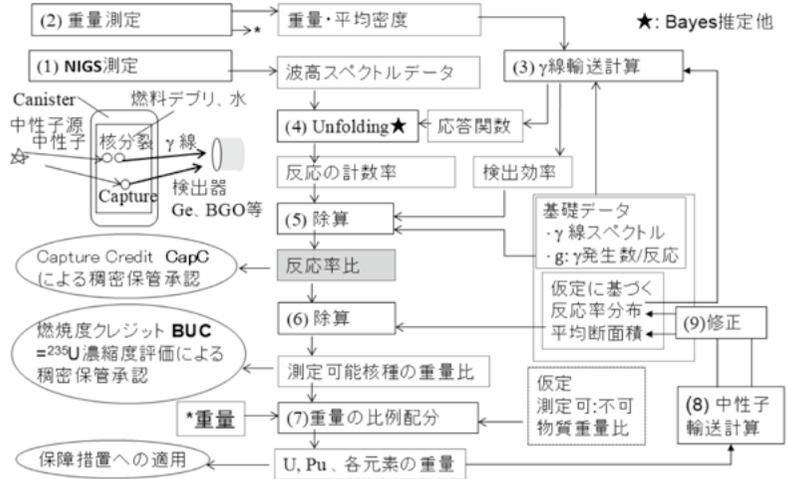


図6 NIGSのデータ処理のブロック図

率分布計算の高速化

3. スペクトル分離技術の精度確認
~ Unfolding, AIの利用など ~
4. 実証試験の実施

が挙げられる。これらの実現には、原子炉物理、保障措置、核データ、中性子源開発、放射線計測、放射線輸送計算、情報工学等の専門家と、プロジェクトマネージャーが必要となる。燃料デブリの核特性把握、NIGSに関心をお持ちの方は筆者までご連絡いただきたい。

参考文献

- 1) Y. Nauchi, H. Ohta, H. Unesaki, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **52** (7-8), 1074-1083, 2015 (PHYSOR2014).
- 2) Y. Nauchi, T. Sano, H. Unesaki, et al., Proc. ICNC2019, Paris, France.
- 3) Y. Nauchi, S. Sato, M. Suzuki et al., Proc. ICNC2023, Sendai, Japan.
- 4) Y. Nauchi, T. Nohmi, R. Suzuki, et al., Proc. FDR2022, Naraha, Japan.

著者プロフィール

1999年 東北大学大学院修士、博士 (工学)。同年、(財)電力中央研究所に就職、現在に至る。核物質にかかわる放射線輸送計算と放射線計測の研究に従事。所属学会：日本原子力学会。



ー 福井県立恐竜博物館・福井県立大学恐竜学研究所の巻 ー



福井県立恐竜博物館（訪問日：2025年1月29日）

今回、FBNews施設訪問の取材で訪れたのは、福井県勝山市にある「福井県立恐竜博物館」です。なぜ恐竜博物館に？と思われたかもしれません。福井県は、恐竜で有名ですね。福井県の化石発掘現場からは多くの恐竜が見つかっています。「フクイサウルス」「フクイラプトル」「フクイベナートル」「フクイティタン」…。この福井県の恐竜研究には、X線CTを用いた研究成果が大きく関わっていたのをご存じでしょうか？

そこで今回は、福井県立恐竜博物館と、主にCTを用いた恐竜研究に携わってこられ、恐竜博物館の研究員も兼任されている福井県立大学の河部壮一郎先生にもお話を伺ってきました。我々取材班は福井駅前の恐竜たちに見送られ、取材先へと向かいました。



図1 福井駅前の恐竜

■福井県立大学恐竜学研究所

はじめに、福井県立大学恐竜学研究所の河部壮一郎先生を訪問し、CTを利用した恐竜・化石研究についてお話を聞かせていただきました。

研究へのCT利用のきっかけ

河部先生が初めてCTを使い始めたのは大学院生のころ。当時は鳥の研究をされておりました。先生曰く、鳥は恐竜の生き残りなので、「生きた

恐竜」。もちろん恐竜に興味はあるが、まずは生きた恐竜である鳥の脳を調べたいと思ったときに、脳を取り出してみるという方法だと、骨を壊すとか解剖してバラバラにする作業になってしまいます。頭のサンプルを壊さずに脳の形を見たい！ということからCT利用を考え始めたとのこと。生きた恐竜である鳥の頭の中の構造をデジタル的に見たい、というのが最初のきっかけだったそうです。

化石研究へのCT利用はいつごろから

恐竜や鳥の頭のCTを撮るのが一般的になったのは2000年ごろからとのこと。河部先生が大学院時代に初めてCTを撮ったのが2010年ごろで、ちょうど化石研究のCTによる成果が出はじめ、これから盛んに利用されていく時代になるだろうというときだったそうです。先生が初めて使ったCT装置は小型の装置で、それは今も使われています。CT技術はもっと昔から使われているイメージでしたが、小型のCTは進歩著しい医療用と比較しマイナーなため、使い勝手や装置へのアクセスという意味でもよくはなく、あまり研究

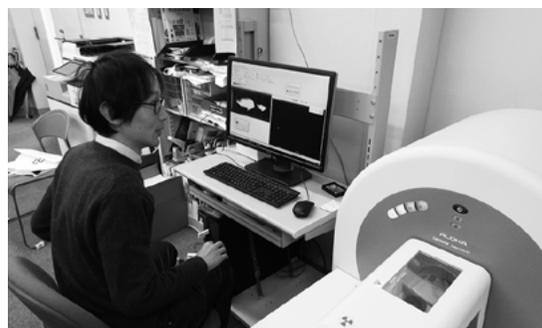


図2 研究室のCT装置と河部先生

が進んでこなかった背景もあったようです。いまでは、CTの進歩に比例して、化石研究へのCT利用も広がっています。CT装置にはサンプルを固定して機械が回るタイプと、サンプルが回るタイプがありますが、両方使っている（使い分けしている）そうです。

河部先生のCTを利用した研究成果について、デジタル的に「化石の中を見る」、「石の中の化石を取り出す」という、二つのパターンを紹介いただきました。

研究成果 その① 「フクイベナートルの脳と内耳」
～化石の中を見る～

一つ目は、「フクイベナートル」の脳や内耳の解明です。フクイベナートルは福井で見つかった新種の恐竜の一つです。全身の7割くらいの骨が見つかっており（7割見つかったというのはかなり奇跡的なことで、普通は歯が1本見つかるだけでも日本中ワーっとなるそう）、また保存状態もよく、頭の骨も割ときれいに残っていたため、日本で見つかった恐竜としては、日本で初めてCTにかけることで脳や内耳と呼ばれる頭の中の器官を3次元的に復元するという研究ができました。

脳の細かい部分の大きさや形がわかると、例えば嗅覚などの大きさを測ることで鼻の良さがわかります。それでフクイベナートルは鼻が良かったというのがわかりました。また内耳を調べることで、そこはバランス感覚に関係する領域なので、すごくすばしっこく動くことができたというのもわかりました。内耳の下半分は聞く能力に関係する部分ですが、フクイベナートルは幅広い音域を聞き分けることができたこともわかりました。フクイベナートルは化石（歯）から雑食だろうというのはわかっていたのですが、これらの情報を組み合わせると、例えば昆虫みたいなものを耳とか匂いを基にすばしっこく追い掛け回していた恐竜なんだろうな、というのがCTを使って見えてきたということです。CTを使うことによって、脳の構造が分かり、その結果として、脳のこの部分はこのような働きをしているからこういう行動をしていたのであろうな、とつながる。骨からここまでわかってしまうのですね。

せっかくですので、フクイベナートルについて教えていただいたことをもう少々書きたいと思います。

フクイベナートルは肉食恐竜の仲間ではテリジノサウルス類に分類され、テリジノサウルス類は肉食から草食恐竜になっていく系統です。その中でもフクイベナートルは最も原始的だということが、骨の



図3 フクイベナートル（骨格）

特徴を基にわかりました。肉食から雑食を経て草食になるというその変化を追える、間を埋めるような貴重な恐竜なのだそうです。

「大きさは、頭からしっぽまで2.3mくらい。半分はしっぽ。体重は35kgくらい。重さは大型犬と中型犬の間くらいでしょうか。恐竜はしっぽと首が長いので、全長と言うと大きそうに思うがボリュームでいくとそんなにない。かまれたら痛いかもしれないけど殺されることはないのではないかと先生はおっしゃっていました。なんだかかわいらしく思えました。河部先生がインタビューの中でフクイベナートルのことをずっと「この子」と呼んでいたのがとても納得いきました。

研究成果 その② 「フクイプテリクスの骨格の再現」
～石の中の化石を見つける～

もう一つ紹介いただいたのは、「フクイプテリクス」という鳥の新種について、全身骨格の3D再現です。実はフクイプテリクスの化石はまだ石に骨が埋まっている状態です。通常は研究する前に「化石のクリーニング」と呼ばれる石から骨を分離する作業をまず行い、化石だけになった状態でいろいろ研究を進めるといったのがセオリーです。しかしたまに、組成が化石と石とで似てきてしまっている（置換されている）ことがあります。その場合物理的にも取りづらく、境界もわかりにくく、これ以上削るのが怖くなることもあります。フクイプテリクスはその例の一つで、クリーニング作業が硬直したそうです。そこで、恐竜博物館にあるCT装置で一回CTを撮り大まかにどこに骨があるかを見極め、その後SPring8*の装置で

*SPring8 大型放射光施設



生体復元図

図4 フクイプテリクス

「制作 神戸芸術工科大学 吉田雅則教授」
福井県立恐竜博物館HPより
<https://www.dinosaur.pref.fukui.jp/research/2019Fukuipteryx/>



より精細なCT撮影をしました。それによりデジタル上で骨だけをクリーニングして骨格をくみ上げ、それを3Dプリンタで出力し、フクイプテリクスの全身骨格として再現することに成功しました。つまり、実物は石の中ですが、デジタル上で見たものをデジタル的に出力して、物体として再現することができたというわけです。この再現されたフクイプテリクスの全身骨格は、恐竜博物館に展示されていました。

CTで見える？見えない？

CTが普及する前は研究の為に化石を切っていました。今でも切らないと見られないものはありますが、しかしやっぱりせっかくの化石を壊したくないというのが心理的前提にあり、「恐竜の化石はたくさん出てくるアンモナイトの化石とは違う」とのこと。

化石をCTで撮影するときには、大なり小なり化石のまわりや化石の中に石がついていたり入ってたりします。石ごとCTにかける場合、画像を得るには石と化石に密度差が必要です。デジタル上(CT上)では密度差が無いと石と骨の区別ができなくなるため、見た目でははっきりとわかるのにCTで見ると区別がつかない！ということがあり、そういうのは一番歯がゆいそうです。この化石はきっときれいに見えるだろうな、と思って撮ったら全然見えない。そういう場合は仕方がないのであきらめるが、やっぱり残念な気持ちはずっと残り、ああ、あの機械ならできるかもしれない、新しい機械が入ったら試してみようなど、次のステップを待つ。それがあ

では化石をCTで見るドキドキ感で、やってみないとわからないのですよ、と先生。見えないものを見るためにCT装置を利用する一方、見えているものが見えなかったときは、それはもうとても残念なことでしょう。しかし経験を積んできた今では、外すことはなくなってきたといいます(戦っても勝てそうもないやつはCT装置にかけない、そうです(笑))。

化石のCT撮影のポイント

CTの出力条件はサンプルによって毎回見ながら変えているとのこと。経験から、この地域で見つかるこの化石はこれくらいの電流・電圧が必要だろうというのはわかるそうですが、初めての産地のときはよくわからなく、また同じ地層でも数十センチ離れただけで地層の様子が変わったりするため、一つの骨の中でも周りの石との置換具合が変わるので、結構大変とのことでした。

CTにかけるサンプルの大きさについては、基本的にCT装置によるため、装置によって変える、逆に言うとサンプルの大きさによって装置を選んだりするそうですが、小さければ小さいほど解像度が上がるので、いらぬ部分の石はできるだけ取り除いて小さくするというのは常に心掛けてのことだそう。とても大きい恐竜などはどうしているのかと思いましたが、多くの場合、骨はバラバラになっているので、頭の骨の形が壊れていないで丸々見つかるということはまずなく、だから意外と研究室にある小さい機械でも入るとのこと。ちなみに恐竜博物館に隣接予定(2026年4月)の福井県立大学恐竜学部棟には、1mを超えるサイズを納めることができる新しいCT装置が入る予定で、これがあるとバラバラで発掘された化石を組み上げて一つの頭にし、それを丸々置いて撮影することができることとなります。

福井県立大学では2025年4月になんと“恐竜学部”が新設されました。恐竜研究に特化した新しい学部ができることについてもインタビューしました(訪問日:2025年1月29日)。

恐竜学部の新設

恐竜学部の大きな柱の一つに、デジタル技術を使った恐竜研究の推進というのがあり、化石を発

掘してその化石を丁寧に調べて、という古くからの研究にプラスして、デジタル技術を使った成果を出せるための教育や研究ができるように準備中とのこと。デジタル技術とは、X線CT、フォトグラメトリ、レーザスキャナなど。河部先生の研究では形の情報を重視しているので、形をデジタル化し、現場に行かなかったとしても見たいものが見られる世界で、世界中の研究者と協働してディスカッションすることにより、恐竜研究をより加速/活性化する拠点となることを目指しているとのこと。恐竜研究の拠点というと大陸と違い日本は地の利が無いですが、デジタル技術を使うことで恐竜研究を推進していくというのは、地の利が無いからこそできること。CTを中心としたデジタル技術を使った研究の拠点として、ますます福井の恐竜というのを発展させたいという、先生の力強い意気込みを聞かせていただきました。

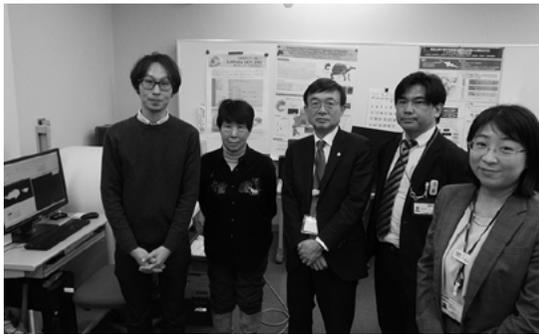


図5 河部先生（最左）と取材班の集合写真

■福井県立恐竜博物館

次に福井県立恐竜博物館へと向かいました。見学前に館内のレストランでお昼ごはん「化石発掘オムライス」を食べ、準備は万端です。



図6 化石発掘オムライス
(オムライスの中には〇〇が！)

さてここで、福井県立恐竜博物館について簡単にご紹介いたします。福井県立恐竜博物館は、恐竜化石の一大産地である福井県勝山市に建てられた、恐竜を中心とする地質・古生物学博物館です。2000年7月14日に開館され、その後2023年7月14日にリニューアルオープンし、カナダのロイヤル・ティレル博物館、中国の自貢恐竜博物館と並び、世界3大恐竜博物館と称されています。銀色に光るドームの内部にある展示室（本館）は、「恐竜の世界」「地球の科学」「生命の歴史」の3つのゾーンから構成されています。4,500㎡という広大な常設展示室には、50体もの恐竜骨格標本を展示しており、そのうち10体は実物の化石を使ったものです。16名の研究員が在籍しており、随時更新された研究を展示しています。現在では展示のみならず体験型施設である、野外恐竜博物館や化石研究体験も取り入れており、また教育普及活動として恐竜授業をはじめ、毎月博物館セミナー等、博物館自然教室、子ども工作教室などが開催されています。2024年10月には、入館者数通算1,400万人を達成しています。

博物館内の見学

博物館では、館内をぐるりとくまなくご案内いただき、大満足の時間を過ごしました。その中でもやはり恐竜展示は圧巻でした。また、翼竜は恐竜とは別系統であることも初めて知りました。



図7 館内見学の様子

福井の恐竜に関する展示のところでは、河部先生のお話にあった石に埋まったままのフクイプテリクスの化石と、3Dプリンタで表現された全身骨格がありました。非破壊で図8左（石のかたまり）から図8右（3D骨格構造）を作れるなん

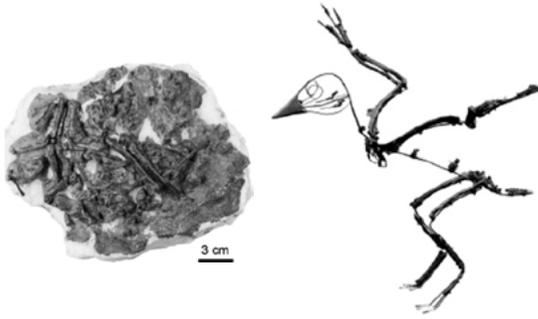


図8 骨格化石と再現された3D骨格

福井県立恐竜博物館HPより

<https://www.dinosaur.pref.fukui.jp/dino/database/detail.php?id=1007>



てと、デジタル技術のなせる業に感動しました。恐竜はその勝手なイメージ(肉食で獲物をガブリ)からどうしてもかなりの大きさを想像してしましますが、このように本物の化石を基にデジタル技術で再現された骨格姿をみると、印象ががらりと変わることもあります。博物館で実際の大きさを見ることは重要です。

化石研究体験

博物館では化石研究体験として、“化石発掘プラス”、“*T.rex* 頭骨復元”、“化石クリーニング”、“CT化石観察”の4つのメニューがあり、そのうち3つのメニューを体験することができます(化石発掘プラスは11月中旬～4月中旬、*T.rex* 頭骨復元は4月下旬～11月上旬)。

今回私たちは、CT画像を使った化石観察を体験させていただきました。恐竜の頭部の化石を実際にスキャンして得たCT画像を基に、タッチパネルで操作し、セグメントごとに色付けしたり、



図9 CT画像化石観察体験の様子

観察したい部分以外は消したりすることもでき、その内部をあらゆる角度からじっくり観察することができます。元の化石が目前にあり、実際には見えない部分を見るというのは、とても面白いものでした。

最後に、新設される福井県立大学恐竜学部は、その本拠地が勝山キャンパスとして博物館がある公園の敷地内となりますので、大学との連携や大学に期待することを伺いました。

恐竜博物館と福井県立大学恐竜学部の連携

隣接という地の利を活かし、デジタル技術を活用した新分野の展開など施設や人材の共有を行い一体化した教育・研究システムの構築を目指したいとのこと。1年次からの化石発掘調査をはじめとする現場実習、博物館における研究成果の発信拠点「オープンラボ」の整備、世界的研究者を客員教授に委嘱した国際的な視野の涵養など様々な取り組みを行い、実践的な学習の場を提供したいとのことでした。

更には、博物館での展示作業への参加などを経て、博物館の研究員、学芸員として勤務できる人材育成を期待しているとのことでした。

■おわりに

今回の取材ではCTに関することをメインにお伺いしましたが、それ以外にも、恐竜の種類や系統、化石発見の目利きのようなことまで、我々取材班の質問に対し一つ一つ丁寧に説明いただき、本当に楽しく勉強させていただきました。恐竜研究に放射線が関与していることは、放射線利用の今後の発展の一部を見ることができたようで、うれしく思いました。

このたびは大変お忙しい中取材に応じてくださいました、福井県立大学(福井県立恐竜博物館)の河部先生に心より感謝申し上げます。また、激励の咆哮をいただいた福井駅前の恐竜たちにも感謝いたします。今回の取材を通じて、私もすっかりフクイベナートルのファンになってしまいました。

読者の皆様、今後の化石研究の放射線利用にさらなる期待とご注目を!!

(文責：FBNews編集委員 篠崎和佳子)



中川 恵一

東京大学医学部附属病院

RALSとデブリ取出

私が勤務する東大病院にRALSという放射線照射装置(図1)があります。装置本体から差し入れたチューブ内をイリジウム192などの線源が高速で移動し、患者さんの体内に到達し、がん組織にピンポイントで照射するものです。照射後、線源はチューブを通り装置本体に回収されます。取り扱いも容易で、構造も単純、遠隔で操作可能かつ患者さんの体への負荷も少ないなど、きわめて優れた治療装置です。主に子宮頸がんの治療に用いられ、国際的には標準治療とされています。一方で、このような単純な装置でも、チューブ内で駆動用ワイヤーがひっかかるなど不具合が発生する可能性がゼロではありません。私たちのチームでは、事前に対応手順や対応者を選定し、不具合発生時にはただちに入室、線源の隔離措置を行うなど、万が一に備えた想定もおこなっています。機械ですから故障もあり得ますし、最終的には頼りになるのは人間と思っています。

福島第一原子力発電所2号機において、昨年に続き2回目のデブリ取り出しが4月に実施されました。デブリとは、ウランを中心とする核燃料が溶融し、周囲の金属などを巻き込んで原子炉内外にたまったものです。東京電力はロボットを使用し、デブリの分布や外観などの調査を繰り返してきました。デブリ取り出しとは、調査段階から実際に取り出す段階に進んだものであり、悲

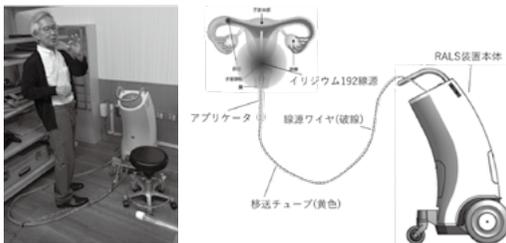


図1 RALS装置概要 RALS装置本体よりチューブを介し線源を送り出す

願である廃炉に一步近づいたといえます。喜ばしいこととしてニュースをとらえました。

デブリ取り出し装置(図2)をみると、先ほど紹介したRALSとの共通点が見受けられます。一つ目は高線量物質を移動させること。二つ目は遠隔で行うことです。

今回取り出したデブリは0.2gとわずかですが、20cm離れた位置で γ 線0.1mSv/h、 β 線4.5mSv/hと計測されています。イリジウム線源は370GBq程度であり、20cm離れた位置では1,000mSv/hになります。線量だけで言うと、桁違いにイリジウム線源のほうが高いといえます。ただし雰囲気線量という点では、デブリ取り出し作業では、取り出し装置本体周辺でも、1.5~4mSv/h、デブリのある原子炉格納容器内では数10~数100Sv/hとなります。これほど高くは遠隔で実施せざるを得ません。

最後に共通する点としては、どちらも最終的には人間の手が頼りになる、とのこと。今後デブリ取り出しが本格化していきますが、その際にも手違いや、装置の不具合が発生するでしょう。手違いは発生させないにこしたことはないですが、起こすのも修正するのも人間です。

取り出されたデブリは、放射能濃度、成分や結晶構造の分析などを行い、得た知見は今後のデブリ取り出しに生かされるとのことです。長く続く廃炉を見守っていきたいと思います。

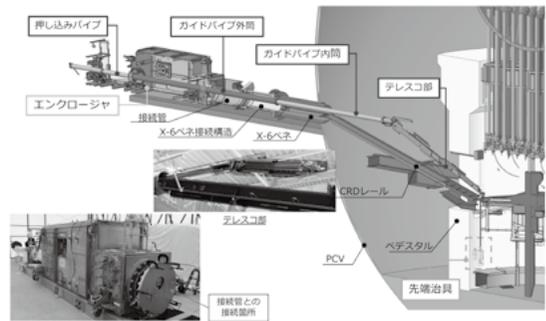


図2 福島第一原子力発電所2号機におけるデブリ取り出し装置 (東京電力HPより)

東京科学大学総合研究院ゼロカーボンエネルギー研究所／ 環境・社会理工学院融合理工学系原子核工学コース 松本研究室のご紹介

傳 凌彦*1／近藤 菜月*2／吉永 潤石*3
張 慧芳*4／エイハンサントスマンド*5／ペク ダヒョン*6

東京科学大学で始まる新しい学び

私が所属している「東京科学大学」は、2024年10月1日に東京工業大学と東京医科歯科大学が統合してできた新しい国立大学です。理工学系と医歯学系、それぞれの分野で長い歴史と実績を持つ2つの大学が一つになったことで、今までにはなかった学びの形や研究の可能性が広がりつつあります。また、今回の統合によって、医療や生命科学の分野とのつながりもこれまで以上に強くなっています。実際に、私自身も次の学期には「医療データ科学概論」という、もともと医科歯科大学で開講されていた授業を履修する予定です。理工系にしながら医療データの扱いや考え方を学べるのは、統合後ならではの貴重な機会だと感じています。放射線の利用や安全性の研究など、原子核工学が医療と交わる場面も増えてきているので、個人的にも学際的な視点をもつことの大切さを日々実感しています。

旧東京工業大学では、教育組織が「学院」、「系」、「コース」という三層構造になっていて、学生はこの枠組みの中で専門性を深めながら、学際的な視点も養っていきます。「学院」は多くの大学における学部、研究科に相当し、「系」は学科、専攻に相当し、「コース」は学科、専攻の中でさらに専門性を深めたものになります。まず、学部に入るときは「学院」に所属し、2年生から「系」に所属し、大学院からは「コース」に所属します。私の場合、「環境・社会理工学院」に所属し、「融合理工学系」の中の「原子核工学コース」で学ん

でいます。なお、原子核工学コースは複合系コースの一つで、工学院の機械系と電気電子系、物質理工学院の応用化学系と材料系と合わせて、3つの学院、5つの系に連なっています。旧東京医科歯科大学は学部・研究科と学科・専攻で構成されています。教育システムが統合するのは2028年4月頃と言われています。最近、東京科学大学の将来構想として6つの“Visionary Initiative”を中心に異分野融合を進めていくということが発表されました。

今はまだ「東京科学大学」という名前に慣れない人も多いかもしれませんが、新しい大学としての体制づくりや情報発信も着実に進んでいて、在学生としてもわくわくするような変化を感じています。この場所で、分野の枠にとらわれず、広い視野で研究に取り組める環境が整っていることを嬉しく思います。

(ペク ダヒョン)

原子核工学コースとは

東京科学大学(旧・東京工業大学)の原子核工学コースは、原子核エネルギーと放射線の有効利用を通じて社会に貢献することを目的とし、原子力技術の高度な専門知識を体系的に学び、国際的な視野と倫理観を備えたリーダーの育成を目指しています。原子核工学コースの前身である大学院理工学研究科原子核工学専攻は1957年(昭和32年)に設置されています。今年で68年になりますが、この理念は変わっていないようです。

原子核工学コースでは、関連する科目を科目群

*1 Lingyan FU 東京科学大学環境・社会理工学院 大学院生(博士)
*2 Natsuki KONDO 東京科学大学環境・社会理工学院 大学院生(修士)
*3 Junseki YOSHINAGA 東京科学大学環境・社会理工学院 大学院生(修士)

*4 Huifang ZHANG 東京科学大学環境・社会理工学院 大学院生(修士)
*5 Mando EIJANSANTOS 東京科学大学環境・社会理工学院 大学院生(修士)
*6 Da Hyun PHAEK 東京科学大学環境・社会理工学院 大学院生(修士)

としてまとめ、達成度や習熟度に応じて体系的に学べるように構成されています。たとえば、原子炉システムを体系的・俯瞰的に理解するための基盤的工学を学ぶ原子炉工学科目群、燃料の製造・供給・使用済み燃料の安全な処理・処分に関する基盤的工学を学ぶ核燃料サイクル工学科目群が設けられています。そのほか、原子炉廃止措置工学科目群、放射線生物学・医学科目群、核融合・加速器工学科目群などがあります。このような原子核工学の高度な専門知識に加え、幅広い視野と教養、高い倫理観と社会的責任感を身につけることが求められます。

原子核工学コース指導教員のほとんどは総合研究院ゼロカーボンエネルギー研究所に所属していることより、原子核工学コースの学生のほとんどもゼロカーボンエネルギー研究所の研究室に所属することになります。研究分野は、大きく分けて、原子炉物理学、核融合工学、加速器工学、プラズマ物理、原子力安全工学などの物理・機械系と、核燃料サイクル、放射性廃棄物処理、放射線生物学、エネルギー変換技術などの化学・生物系があります。このように幅広い分野にわたる原子核工学コースの特色を生かした教育の一つとして、所属研究室と異なる分野の研究室の研究活動に参加する「マルチラボトレーニング」が行われています。

原子核工学コースおよび原子核工学専攻では、原子力分野を学際的に俯瞰し、国際的なリーダーとなる人材育成を目指して、ユニークな教育プログラムを構築してきました。その一例として、2011

ー2017年度に実施された博士課程教育リーディングプログラム「グローバル原子力安全・セキュリティ・エージェンツ教育院」があります。その取組みの一部は、原子力規制人材育成事業「フィジカル・サイバー空間にまたがる原子力プラント3Sを俯瞰し実践・主導する規制人材育成」などに受け継がれています。これらのプログラムでは、国際原子力機関（IAEA）、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）などのインターンシップへの派遣も行われ、学生は国際的なセンスを身につけ、実践的な経験を積むことができます。修了生は、電力会社、メーカー、エネルギーインフラ関連企業や、行政機関、国の研究所などで活躍しています。（吉永 潤石）

松本研究室の研究活動と環境

松本義久教授の研究室では、放射線によって誘導される生体内変化や分子応答に関する研究を行っています。DNA損傷修復、転写制御、細胞死といった基礎的な生命現象の理解を通じて、がん治療をはじめとする医療応用や放射線防護への貢献を目指しています。

研究室には、生化学実験・分子生物学的解析・細胞実験を一通り実施できる設備が整っており、技術の習得から実践的な研究までを一貫して学べる環境が用意されています。学生室は3部屋あり、それぞれに博士課程から学部生までが混在しています。この構成により、質問や研究の相談がしや

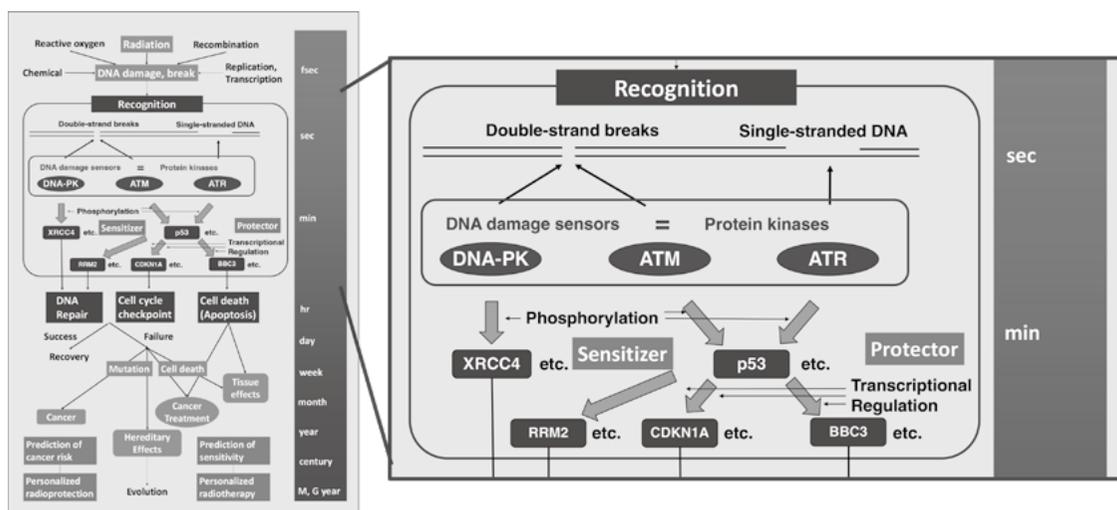


図1 放射線影響が起こるメカニズムと松本研究室の研究テーマ(松本教授提供)



写真1 松本研究室メンバー集合写真(2025年4月14日)

- 1列目左から傳、近藤、ペク
2列目左から松本教授、島田助教、吉永、張
3列目右エイハンサントス

この他、社会人博士学生など数名が現在在籍しています。

すく、縦のつながりを持ちやすい環境です。研究室に入ってくる学生の多くは生物学分野以外の出身ですが、特に研究室に配属したての1年目は、上級生に1対1で指導を受けながら着実にスキルを習得することができます。また、学士課程や修士課程1年生を主に、輪読会なども定期的で開催し、知識の定着を効率よく行っています。学会発表前の練習や論文の読み方、プレゼン資料の構成など、細やかなサポートが日常的に行われているのも大きな強みです。また、中国、モンゴル、韓国、米国などさまざまな国から来た学生が在籍しており、日常的に英語での議論や資料作成が行われています。研究という共通言語を通じて互いに刺激を受け合いながら、国際的な感覚を自然に身につけられる環境です。こうした環境は、研究室内の雰囲気にも良い影響を与えています。4月には新入生の歓迎会、2月には修了生の追い出し

コンパを開催するなど、研究の合間には適度な交流の機会も設けられており、緊張感と和やかさのバランスがとれた環境となっています。

研究成果の対外発信にも注力しています。学生も含め、日本放射線影響学会などで成果を発表しています。また、若手放射線影響研究会などで他の大学や研究所の若手研究者との交流を深めています。学位取得した学生が東京放射線生物学談話会(RBC)で記念講演を行なったこともあります。松本教授や島田幹男助教は、そのほか、日本放射線腫瘍学会生物部会、アイソトープ・放射線研究発表会、癌治療増感研究会などの国内学会、International Congress of Radiation Research(ICRR)、Asian Congress of Radiation Research(ACRR)、Radiation Research Society(RRS)などの国外学会で発表しています。また、松本教授が大会長を務め、東京科学大学や近隣を会場として、学会や研究会を主催することもあります。2024年2月には第24回菅原・大西記念癌治療増感シンポジウムを開催し、全国から80名以上の研究者が集まり、活発な議論が展開されました。3月には放射線の生体影響と利用に関する国際会議BEAR2024を開催し、海外から4名の招待講演者を含め、80名以上が集まりました。2025年3月には日本放射線腫瘍学会放射線生物学セミナーを開催し、オンライン参加者、オンデマンド聴講者を含め、約150名の参加がありました。

放射線生物学という学際的な分野で、基礎から応用まで一貫した視点で学び、研究に取り組みたい方にとって、松本研究室は極めて魅力的な環境です。多様性に富んだ仲間とともに、ぜひ一緒に研究しましょう。(近藤 菜月)



写真2 第24回菅原・大西記念癌治療増感シンポジウム(2024年2月17日)

研究紹介① DNA修復タンパク質の機能に関する研究

常染色体劣性遺伝疾患 (MCSZ) は、先天性な小頭症、乳児期に発症する難治性のけいれん、発達遅延と多動をはじめとするさまざまな行動異常を主症状とし、DNA修復酵素であるPNKP (Polynucleotide kinase phosphatase) 遺伝子の異常により発症することが知られています¹⁾。当研究室では、PNKPに着目し、機能解析に関する研究を進めてきました。本研究は、2021年度に博士修了した塚田海馬さんの研究成果を基盤としており、PNKPがDNA二重鎖切断修復において果たす役割、および患者細胞においてPNKPの変異が引き起こす損傷の由来や細胞機能への影響をさらに深く検討するものです。タンパク質には、他のタンパク質と共通するアミノ酸構造 (ドメイン) があり、ドメインの間にあるペプチド結合をリンカーと呼びますが、塚田さんは、PNKPのリンカードメインに存在するスレオニン118 (T118) が新規のリン酸化部位であることを同定し、さらにこのリン酸化がDNA複製におけるDNA末端処理に必要であることも明らかになりました。その成果をまとめた論文は最近eLife誌に掲載されました²⁾。私は、このT118リン酸化がDNA修復にも関与していることを示し、その成果を修士論文にまとめるとともに、学会で発表しました。PNKPが関与するDNA修復 (一本鎖切断修復と非相同末端結合による二本鎖切断修復) は非常に迅速に進行し、かつ細胞内での集積量も多くないため、DNA損傷を引き起こした後にPNKPの細胞内での動的挙動を正確に追跡することは非常に困難です。また、PNKP変異が母胎内の胎児の脳の発達に与える影響を再現するためには、iPS細胞を用いたモデル (iPSから神経細胞へ) でPNKPや、関連するXRCC4 (X-ray repair cross-complementing4) などの動態を生細胞内で観察することが不可欠です。現在、高精度な生細胞内でのPNKPのリアルタイム観察システムの確立を目指し、XRCC4との協調的なDNA修復メカニズムの解明に取り組んでいます。上記の研究はいずれも体細胞を用いて行われてきましたが、幹細胞は一般的な体細胞とは異なるDNA損傷応答を示すことが示唆されており、より患者の病態を正確に模倣するためには、引き続き幹細胞を用いたモデルの研究が重要です。これに関連して島田助教は、遺伝病患者由来の細胞からiPS細胞を樹立し、神経細胞や各種臓器細胞へと分化

させることにより、疾患の分子メカニズムの解明を目指す研究を行っています。 (傳 凌彦)

研究紹介② DNA修復遺伝子と放射線感受性の個人差に関する研究

放射線感受性、すなわち放射線影響の現れ方には個人差があり、放射線治療と放射線防護において注目されています。放射線治療においては、有害事象の現れ方を治療前に予測し、個人ごとに適した放射線治療の線量を投与する「個別化放射線治療」が期待されています。また、放射線防護においては、国際放射線防護委員会 (ICRP) からの次期主勧告における最大の注目点の一つとなっています。松本研究室では、DNA二重鎖切断 (DSB) のセンサー分子であるDNA依存性プロテインキナーゼ (DNA-PK) の性質、機能を中心にDSBの認識、修復の分子機構と放射線治療への応用に関する研究を行ってきました。そのDNA-PKの重要な標的としてXRCC4に注目して解析を進めてきました。また、DNA-PKやXRCC4の発現量とがん罹患性 (かかりやすさ、リスク)、放射線治療効果や予後、有害事象との相関に関する臨床との共同研究を行ってきました³⁾。

XRCC4については、ヒトにおいてこれまでに70種類ほどのバリエーション (遺伝子の塩基1個~数個の違い) が報告されています。そのうち、約10種類は小頭症、発育不全を示す遺伝病患者で見られる変異で、頻度は極めて低いです。2021年6月に博士修了したAnie Day Asaさんはこのうち6種類の変異型XRCC4の機能解析を行い、DNA修復機能が低下していることを示しました⁴⁾。小頭症、発育不全などを示さないXRCC4のバリエーションの一つであるXRCC4^{A247S}については、一部のがんのリスクとの相関が報告されています⁵⁾。このXRCC4^{A247S}は東アジアで特に頻度が高く、日本ではおよそ5人に1人がヘテロ、100人に1人がホモであると考えられます。Asaさんの博士論文研究では、このXRCC4^{A247S}も正常型XRCC4に比べてDNA修復機能が低下していることを示しました。これらのことから、XRCC4^{A247S}バリエーションが特に日本人の中での放射線感受性の個人差に寄与している可能性が考えられます。私を含め数名の大学院生が「XRCC4^{A247S}バリエーションがどれくらい放射線感受性に影響を与えるか」、「なぜDNA修復機能が低下するのか」という問題に取り組んでおり、これを通して次世代の放射線治療

と放射線防護に貢献したいと考えています。
(エイハンサントス マンド)

研究紹介③ 分子動力学を用いたDNA損傷認識機構の解析

コンピュータ技術は多くの科学の分野で急速に重要性を増しており、原子核工学、放射線医学分野も例外ではありません。分子動力学 (MD) シミュレーションは、原子間の相互作用とその時間発展を記述することにより、放射線の生体分子への影響の原子スケールでの理解につながると考えられます。2001年にペンシルバニア大学のvan Duin教授らによって開発された反応分子動力学計算プログラムReaxFFは、それまでのMDシミュレーションと異なり、反応力場 (Reactive Force Field) を取り入れ、化学結合の生成や開裂も扱うことができます⁶⁾。そのため、ヒドロキシラジカルによるDNA損傷誘発の解析などが可能となります。

こうしたDNA損傷誘発過程の理解に加え、DNA損傷の認識と修復過程の理解にもMDシミュレーションは有用なのではないかと考えられます。主要なDNA二本鎖切断修復機構の一つである非同源末端結合 (NHEJ) では、最初にリング状の構造を持つKu70/80ヘテロダイマー (2種のタンパク質Ku70とKu80が結合したもの) が、針の穴に糸を通すようにして、DNA末端に結合し、DNA-PK触媒サブユニット (DNA-PKcs)、XRCC4などの修復に関わる分子を呼び込みます⁷⁾。私は、現在、Ku70/80ヘテロダイマーとDNAとの相互作用のダイナミクスをMDシミュレーションで解析する研究に取り組んでいます。これまでに明らかにされているKu70/80-DNAの複合体の静的な構造に加え、複合体形成の動的過程を明らかにすることで、放射線増感剤などの創薬や精密医療に貢献したいと思っています。

(張 慧芳)

松本教授からのメッセージ

「私は当初、細胞が自ら死ぬことによって個体ががんから、また、種を遺伝性影響から守る『アポトーシス』に興味を持ち、その分子機構を明らかにしたいと考えて放射線生物学・医学分野に入りました。特に、細胞がDNA二重鎖切断を認識し、さまざまな細胞応答を引き起こすところが重要と考えて、DNA-PKに注目し、以来30年以上研究を続け

てきました。研究のコンセプトは、『The end is the beginning (DNAの端から全てが始まる)』、『最初の3分間で決まる・分かる・変わる』の2つに集約されると思います。言うまでもなく、DNAは生命にとって重要な分子です。DNAに傷がつくと言うことは生命にとってまさしく一大事であり、細胞、個体、あるいは種として生き延びるためにさまざまな反応を引き起こします。ですから、放射線生物学は生命の本質に触れ、生物の精巧さを見ることができる分野です。また、放射線を用いた医療、原子力を通じたカーボンニュートラル実現への貢献、宇宙開発など、これからの人類にとって、とても重要な分野であると思います。

また、研究室のポリシーとして、以下の4つのことを伝えています。1. Ask not only what the laboratory can do for you, but also ask what you can do for the laboratory. 2. Be second to none. Be different from others. 3. Be proud of yourself and laboratory. 4. Trust yourself and laboratory members. 学生の皆さんにはこれらを胸に、研究室では研究に励み、卒業後は研究を含め、社会で活躍してほしいと願っています。」

参考文献

- 1) Shen J et al. Mutations in PNKP cause microcephaly, seizures and defects in DNA repair. *Nat Genet* **42**, 245-9 (2010).
- 2) Tsukada K et al. CDKs-mediated phosphorylation of PNKP is required for end processing of single-strand DNA gaps on Okazaki Fragments and genome stability. *eLife* **14**, e99217 (2025).
- 3) Someya M et al. Prediction of treatment response from the microenvironment of tumor immunity in cervical cancer patients treated with chemoradiotherapy. *Medical Molecular Morphology* **54**, 245-252 (2021).
- 4) Asa ADDC et al. Functional analysis of XRCC4 mutations in reported microcephaly and growth defect patients in terms of radiosensitivity. *J Radiat Res* **62**, 380-389 (2021).
- 5) He M et al. A recessive variant of XRCC4 predisposes to non-BRCA 1/2 breast cancer in Chinese women and impairs the DNA damage response via dysregulated nuclear localization. *Oncotarget* **5**, 12218-32 (2014).
- 6) van Duin ACT et al. ReaxFF: A Reactive Force Field for Hydrocarbons. *J Phys Chem A* **105**, 9396-9409 (2001).
- 7) Walker JR et al. Structure of the Ku heterodimer bound to DNA and its implication for double-strand break repair. *Nature* **412**, 607-614 (2001).

放射能・放射線 単位・元素名の由来

高橋 正

第 11 回

マイトネリウム $_{109}\text{Mt}$: meitnerium

★放射線関連分野での大きな功績を称え、その名前が単位や元素名に用いられている科学者の人物像や功績を紹介するシリーズ★

109番元素のマイトネリウムは、1982年にドイツの重イオン研究所 (GSI) で ^{209}Bi (^{58}Fe , n) ^{266}Mt の核反応で合成された。同位体は8核種知られているが、最も半減期が長いのは ^{278}Mt で4.4sである。化学的な性質はまだ知られていない。元素名はアインシュタインが「ドイツのマリ・キュリー」とよんだリーゼ・マイトナー (Lise Meitner, 1878-1968) を讃えるもので、マイトナーは核分裂の理論的解明やプロトアクチニウムの発見をはじめとして核物理学や放射化学において多岐にわたる足跡を残した。

マイトナーはユダヤ系の知的な家庭に生まれた。父は進歩的な弁護士で、母はピアニストだった。小さいころから数学と物理学が好きだったが、当時の女性に高等教育の道は閉ざされていた。1897年になって女性にも大学が開かれるようになると、1901年にウィーン大学に23歳で入学した。ここでボルツマン (Ludwig Boltzmann, 1844-1906) の講義に感銘を受け、1906年に物理学で学位を得た。学位取得後は、マイヤー (Stefan Meyer) と放射能の研究に取り組み、金属による α 線の散乱と原子量の関係を調べた。

28歳の1907年、マイトナーはベルリンに移った。フリードリッヒ・ヴィルヘルム大学 (ベルリン大学) でプランク (Max Planck) の知遇を得た。ここで1歳違いの化学者オットー・ハーン (Otto Hahn) と実験を始めた。プロイセン王国は女性には大学を閉じており、ハーンの実験室を使うことは許されず、地下の旧木工室で研究を行った。マイトナーはハーンとともに、 α 壊変にともなう反跳を物理的な分離に使う、トリウムC¹ [^{208}Tl]* やアクチニウムC¹ [^{207}Tl]* を単離し、半減期を決めた。

1912年ベルリン郊外のダーレムにカイザー・ヴィルヘルム化学研究所 (KWI) が設立されると、ハーンは研究員となり、放射能部門を担当した。マイトナーは無給の研究員として籍を置き、ハーン・マイトナー研究室ができた。マイトナーは放射能汚染を防ぐために厳格な取扱マニュアルを作った。そのおかげで長年経っても微弱な放射線の測定が可能で、障害も防止できた。マイトナーは1912年から3年間、プランクの助手も兼任したが、プロイセンで初の女性教員であった。

1914年に第一次世界大戦が勃発すると、1915年7月から1年あまりマイトナーはX線技師兼看護婦として従軍し、戦場の凄惨な現場を目の当たりにした。1917年にKWIに物理部門が設置されると部長となり、経済的にも研究的にも独立し、放射能・放射線の研究に邁進した。磁気 β スペクトルの研究では、オージェ効果

をオージェ (Pierre Auger) よりも先に見つけた。

マイトナーは1922年に教授資格を得て、1926年にドイツ初の女性の物理学教授となった。1933年にナチが政権を掌握すると、ユダヤ人のマイトナーはオーストリア国籍だったためKWIの地位は保たれたものの、教授職を剥奪された。1938年3月オーストリアがドイツに併合されると、ドイツに留まることができなくなり、ボーア (Niels Bohr) たちの支援により7月12日オランダに脱出し、コペンハーゲンを経て8月初旬にストックホルムに移った。60歳にして資産と研究環境のすべてを失った。

1934年にローマ大学のフェルミ (Enrico Fermi) らが、ウランに中性子を照射すると超ウラン元素が生成すると報告したが、本当のことは分かっていなかった。マイトナーはハーンに共同研究を持ちかけ、この問題に取り組んだ。1935年からはシュトラスマン (Fritz Strassman) が加わった。研究はマイトナーが牽引し、亡命後も手紙のやり取りをしながら研究を進めた。1938年12月19日付けの手紙で、核反応の生成物にバリウムが含まれているという予想外の結果を知った。ハーンはこれを説明できずにいた。クリスマスのとき、マイトナーは甥のフリッシュ (Otto R. Frisch) とこのことを議論し、ボーアの液滴モデルを使って中性子照射で原子核が二つになることを見つけた。マイトナーはこの可能性をハーンに伝えるとともに、年明けすぐにフリッシュとの連名で投稿した。この論文で核分裂という言葉が初めて使ったが、細胞分裂のよびかたに倣った。フリッシュはボーア研に戻り、ウランに中性子を照射して核分裂生成物を確認した。核分裂が明らかになると、大騒ぎになった。マイトナーは原爆開発への参画を打診されたが、断った。

核分裂の発見によってハーンは1944年のノーベル化学賞を単独で受賞した。マイトナーの貢献は評価されなかったが、選考委員会に問題があったといわれている。マイトナーはノーベル賞に物理学賞と化学賞を合わせると50回近く推薦されたが、受賞することはなかった。しかし1997年に109番元素がマイトネリウムと命名され、その名が永く我々の記憶に残ることになった。

戦後マイトナーはスウェーデン王立工科大学に移り、研究を再開するとともに、スウェーデンの原子力政策に協力した。ドイツに対しては、研究者仲間を訪問することはあったが、旧職に復帰することは断り賓客に徹した。1954年75歳で退職し、1960年フリッシュが住むケンブリッジに移住し、あと10日で90歳というときに天界に昇った。3ヶ月前にはハーンもこの世を去っていた。

・現代的な表記を [] 内に示す。

令和7年度放射線安全取扱部会年次大会 (第66回放射線管理研修会)

開催日：令和7年10月16日(木)、17日(金)

会場：ピアザ淡海（おうみ）（滋賀県大津市におの浜1-1-20）

テーマ：放射線の三方よし！～管理・利用・世間を主任者が紡ぐ～

参加費：事前登録7,000円（学生会員無料）

当日登録9,000円

交流会は事前登録のみで8,000円（定員になり次第締切）

会場受付で現金による参加登録はできません（Web受付のみ）

参加登録の詳細はWebサイトをご確認ください

今年度の年次大会は滋賀県大津市で現地開催とします。またびわ湖クルージング船で交流会を行います。担当は近畿支部です。多くの皆様のご参加をお待ち申し上げます。

プログラム概要（予定）

◆1日目

特別講演Ⅰ 「最近の放射線安全規制の動向（仮題）」

相談コーナー、ポスター発表

特別講演Ⅱ 「核医学治療の最新動向と現場状況」

特別講演Ⅲ 「原子力災害への対応と自治体における取り組み」

交流会（びわ湖クルージング船）

◆2日目

シンポジウムⅠ 「大線量照射事業の現状と将来予測」

シンポジウムⅡ ・ ・ 企画専門委員会企画 ・ ・

この他に機器展示（2日間）を予定しています。

【連絡先】：（公社）日本アイソトープ協会放射線安全取扱部会事務局

〒113-8941 東京都文京区本駒込2-28-45

Tel. 03-5395-8081 Fax. 03-5395-8053

E-mail nenjitaikai@jrias.or.jp

・詳しくはホームページをご参照ください。

(https://www.jrias.or.jp/annual_meeting/index.html)



サービス部門からのお願い

ファスナーは固定してご返送ください

平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださりまして、誠にありがとうございます。
 宅配便をご利用のお客様には、ガラスバッジの紛失を防ぐため、**【宅配便(小)の場合】**
 測定依頼の際にファスナーを結束バンドで固定していただいたうえで、ご返送をお願いしております。

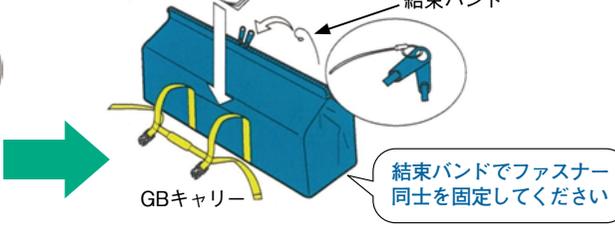
結束バンドは、各サイズともGBキャリアの内側にある黒いポケットに収納してあります。入っていない場合には、弊社測定センターまでご連絡ください。

●測定センターTEL：0120-506-997



GBキャリアのファスナー両端にあるスナップボタンをマチ部分に折り込むように留めてから、左右のファスナーを開けてください

【宅配便(中・大・特大)の場合】



訃報

令和7年6月12日、FBNews編集委員の古田悦子先生がご逝去されました。
 ここに故人のご冥福をお祈りし、謹んでお知らせ申し上げます。

記事に関するご意見や掲載希望の記事案については、こちらまでお送りください ctc-fbnews@c-technol.co.jp

編集後記

- 『核物質を含む中性子増倍系のγ線スペクトル測定による特性把握』と題して、一般財団法人電力中央研究所 名内先生にご執筆いただきました。タイトルからしてかなり難しいお話が始まりそうな印象ではありますが、昨今の福島第一原子力発電所における燃料デブリ問題に対し適切な形で取り組めることは非常に有意義なことであると感じました。読者の皆様も一読いただければ幸いです。
- 施設訪問記として福井県立恐竜博物館・福井県立大学恐竜学研究所訪問ということで、さきほどの話題とは打って変わり、放射線とは関係ないのでは?と考えがちですが、そこはFBNews。こういうところにも放射線が利用されているのだと、広く普及していることがうかがえます。今回の施設訪問に関しては放射線のお話もそうですが、恐竜にご興味のある方にはさらに楽しめる内容となっています。福井県立恐竜博物館に行ってみたくはないですか??
- 今月中川先生のコラムは何だろうと思って読み解いていくと、

- 千代田テクノルが取り扱っている商品の紹介をしていただけたかと思いきや、なんと福島第一原子力発電所のデブリ取り出し装置に発展。やはり、被ばく防護の三原則を考えると放射能を取り扱う装置には何かしらの共通点があるのは必然なのかなと思われました。
- 学生応援企画として今回は東京科学大学の松本義久教授研究室の皆様方から様々な取組みをご紹介いただいております。グローバルな教室となっている印象で、新しい名前の東京科学大学にふさわしい活気あふれる未来の学生達に期待ができます。
- 今回高橋正先生のコラムは109番元素のマイタネリウムの由来をご紹介いただいております。そもそもマイタネリウムという元素になじみがありませんが、紐解いてみると興味深いお話が聞けそうです。
- 近年、春から夏への移り変わりが早くなったように感じますが、原稿を書いている現在は6月初旬で梅雨入りしたところですが、この号が出る頃には夏真っ盛りのため、猛暑や豪雨などの災害にも注意してお過ごしください。(S.T)

FBNews No.584

発行日/2025年8月1日

発行人/井上任

編集委員/小山重成 小口靖弘 中村尚司 野村貴美 青山伸 福田達也 藤森昭彦 篠崎和佳子
 高橋英典 田谷玲子 東元周平 堀口亜由美 松本和樹 丸山百合子 村山賢太郎

発行所/株式会社千代田テクノル

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/03-3518-5665 FAX/03-3518-5026

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)