

第 61 回放射線科学研究会聴講記

標記研究会は平成 28 年 10 月 21 日（金）午後 1 時半から 5 時半まで住友クラブにおいて、神野郁夫氏（京都大学）、平井敦彦氏（京都ニュートロニクス）、佐藤勝也氏（量子科学技術研究開発機構）、福元謙一氏（福井大学）の 4 名の講師をお招きして開催した。座長は前半 2 件を義家 ONSA 専務理事が務め、後半 2 件を岩瀬彰宏氏（大阪府大）にお願いした。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. transXend 検出器を用いたエネルギー分解コンピュータ断層撮影法

国立大学法人 京都大学 大学院工学研究科 原子核工学専攻 神野郁夫

最初にX線の透過撮影について非常に分かりやすい説明があり、次にヨウ素造影剤について話された。コンピュータ断層撮影（CT）が電流測定であり、エネルギー情報利用が不十分であるとの説明があった。その後、講師が開発しているtransXend検出器について、最後に今後の課題が述べられた。

人体では骨はX線のエネルギーを吸収し易く、筋肉、血が中間で脂肪が一番吸収しない。人体の厚さが0、3、10、30cmと増加するに従って、X線の平均エネルギーは56.3、59.7、66.0、76.2keVと増加する。これはビームハードニングと呼ばれ、低いエネルギーが吸収されることによる。X線の強度測定は電流測定であるので、平均エネルギーのX線を測定していることになる。X線の強弱は臓器の形状の変化を示すので、病巣を発見できる。がん細胞は健全な細胞と減弱係数は殆ど同じであるが、細胞分裂が活発なため血管の割合が多い。そのためヨウ素造影剤を血管に注入すれば、X線減弱係数が大きくなり、がん組織を検出できる。しかし、ヨウ素に副作用がある人もおり、1万人に1人が死亡するそうである。そのためヨウ素をできるだけ減らすことが必要である。

また、CTスキャンでは人体を一周する間に約1000枚の写真を撮影する。被ばくを防ぐためにはX線のエネルギー情報の利用が必要である。

transXend検出器は図2のように検出器をX線入射方向に重ねて並べ、低エネルギーは前方の、高エネルギーは後方の検出器から検出することによりX線のエネルギー分布を求めることができる。図3はE1=



図 1 講演中の神野講師

15~33、E2=33~40、E3=40~120keVのX線で撮影したものである。アクリル中に2つの物質が埋め込まれているのが2つの明るい○に現れている。これは図4に示すように物質の質量減弱係数の違いを示し、実際は図5に示すようにヨウ素とカルシウムが埋め込まれていた。

検出器をX線入射方向に重ねて並べ、低エネルギーは前方の、高エネルギーのX線は後方で検出するtransXend検出器は年ごとに発展し、2013~14年には分解能 1.6 ± 0.15 mmの格子状吸収体が、更に2015年には帯状吸収体で高い分解能 0.18 ± 0.04 mmを達成している。

エネルギー分解CTを用いた結石の成分分析では、線減弱係数のエネルギー依存より実効原子番号が求めることに成功した。その結果より組織識別が可能になり、より効果的な粒子線治療に繋がることが期待されている。

最後に円柱ファントム測定の例では2枚の撮影で3次元情報が得られることが説明された。これは通常では1000枚必要なCT撮影が大幅に減少する可能性を示唆するものである。被ばくの低減に直接関係する重要な研究であることが、聴講者に認識された。

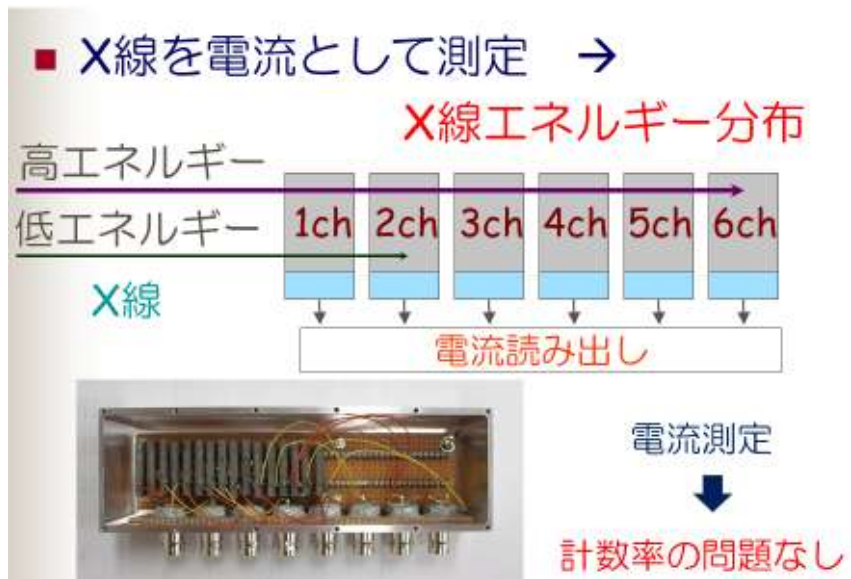


図2 transXend 検出器の原理

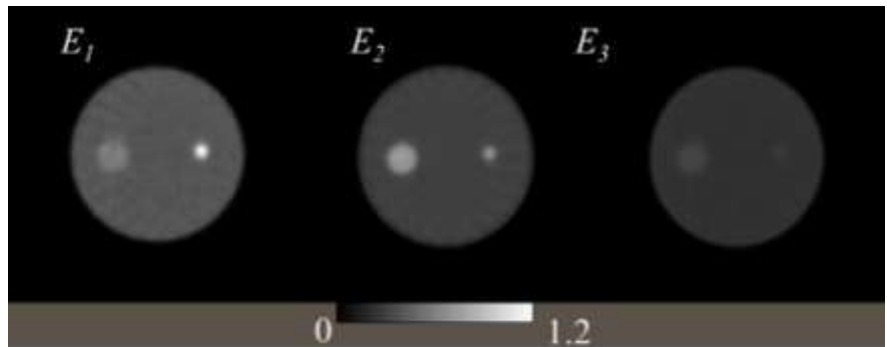


図3 transXend 検出器による測定結果

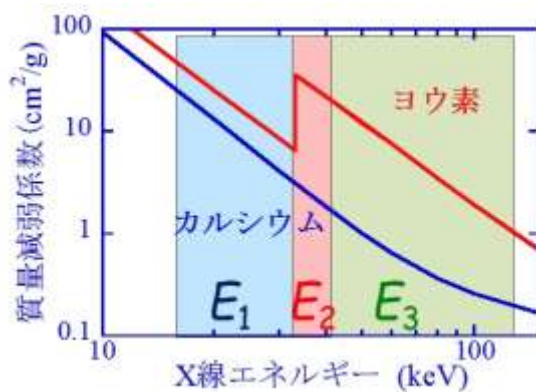


図4 カルシウムとヨウ素の質量減弱係数



図5 図3の中身

(義家敏正記)

2. 小型加速器中性子源によるMo-99 製造装置の開発

株式会社 京都ニュートロニクス 平井敦彦

京都ニュートロニクスは2013年7月3日に設立されたベンチャー企業であり、発起人には堀場製作所を創業した堀場雅夫氏も名を連ねている。業務は加速器中性子源と応用技術の開発であり、2014年3月京都市ベンチャー企業目録委員会にてAランク認定されている。2016年2月2日には経産省認可のニュートロン非破壊検査技術研究組合を設立した。開発拠点は産総研九州センターと熊本大学であるとのこと。

次に研究開発に話が移った。脳や心臓の核医学検査薬の検査に使われる放射性医薬品「テクネチウム製剤」は半減期66時間のMo-99から半減期6時間のTc-99mを抽出して製造される。核医学検査を実施している医療施設は国内で1,170施設、年間約115万回の検査が実施されている(2013年の例)。しかしそのアイソトープは海外の原子炉からの100%輸入に頼っている。国内での生産が緊急の課題である。国内で生産可能な原子炉はJMTRであるが福島事故以前から補修のため停止しており、最近では廃炉の話もでてきている。そのため、京都ニュートロニクスでは原子炉を使わずに小型加速器を利用したMo-99製造装置の開発を行っている。

従来の小型加速器では、ターゲットに衝突させるイオン1個当たりの中性子発生数が少ない。又中性子照射前後の試料製造プロセスを同じ場所で行うためには小型化が必要である。そのため、SiCパワー半導体を利用した多段両極性パルス加速により大電流生成、高い安全性と小型化を実現させ、設置容積75m³以内を目指している。図2に新型加速器「i-CAN」の加速原理を示す。イオン源アースの設置、高周波矩形パルスによる加速で大電流加速、1段あたり100kV以下で絶縁対策が容易な多段加速、各電極ごとにパルスを印加し調節できるため設置の容易さ、半導体を利用した駆動電源による長寿命化等を目指している。

既存の小型イオン注入装置(静電型)を改造して、ポリエチレン性の両極性パルス加速管を設置し原理検証研究を行い、Arイオン注入試料のRBS測定やE×B質量分析器によるイオンのエネルギー測定を行



図1 講演中の平井講師

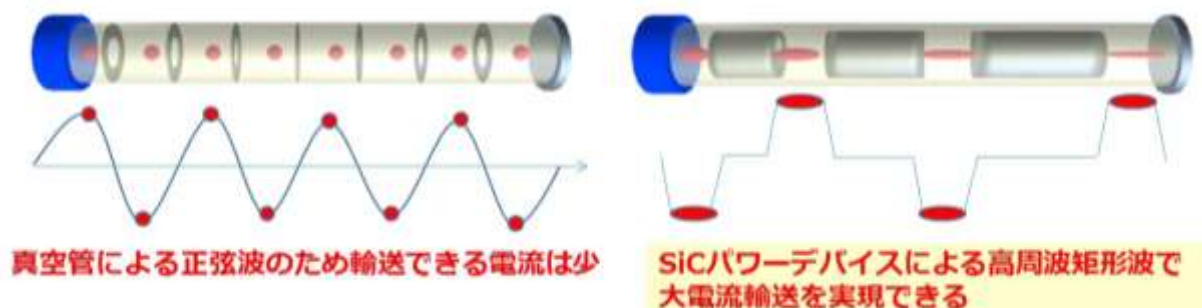


図2 従来の高周波加速器(左)と開発中のi-CAN(右)の比較

い多くの基礎データを取得している。

1MV 程度の重陽子を Be ターゲットに照射して中性子を発生させ、それを減速させ天然に存在する Mo-98 に照射することで Mo-99 を製造する。1MeV 以上では発生する中性子のエネルギーが高くなり減速体系も巨大化し、ターゲットの取り扱いが産業利用には難しくなるからである。

今後の展望としては、開発したパルス電源により、両極性パルスによる実証ができていますので、電極を増設して多段加速の実証。D⁺:100mA 出力のイオン源、±50kV, 100kpps のパルス電源を開発して、中性子発生を伴うプロト機や実用機を開発し、照射する天然 MoO₃ 製造装置、照射後の MoO₃ から Mo-99 を取り出し、Tc-99m を精製しテクネチウム製剤を出荷するシステムの構築を予定している。

イオン源開発のための高効率 D⁺イオン源開発のために、電磁石質量分析器、中性子検出機、その他中性子アプリケーションの協力要請で講演は終了した。

理化学研究所、高崎量子応用研究所との技術協力はどの質問には、前向きに進めていきたいとのことであった。照射前後の試料製造プロセスを同じ場所で行うため、オンデマンド製造が可能で Mo-99 の減衰を低減できる。そのため Mo-99 の製造コストが下がり、テクネチウム製剤の価格を 1/8 以下に設定可能とのこと。早急な実現が望まれる。

講演中に地震が発生したため、参加者の携帯電話が一斉に警報を発し、建物も揺れたが、鳥取県とのことで、継続された。

(義家敏正記)

3. 量子ビームを用いた有用微生物資源の創成に関する研究

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門 高崎量子応用研究所
放射線生物応用研究部プロジェクト「イオンビーム変異誘発研究」 佐藤勝也

量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所では、イオン照射施設 TIARA の AVF サイクロトロン加速器を用いて、放射線による突然変異を促進することにより、環境耐性や新機能を有する幅広い生物資源創成に取り組んでいる。本講演では、その中から特に産業微生物の突然変異育種に関する最近の成果を紹介いただいた。

講演では、まずイオンビーム照射研究施設 TIARA の説明に続き、従来、よく育種に用いられてきたガンマ線と比べて高エネルギーイオンビームは LET (電子の阻止能) が大きいために、狭い領域に集中的にエネルギーを付与することができ、極少数の遺伝子を確実に変異させ、効率的に新しい形質を誘発可能といった特徴を持つことが示された (図 2)。



図 3 原理実証用の加速器

次に本題の産業微生物（麹菌、酵母、根粒菌など）の品種改良に関する話に移った。産業微生物の品種改良には、遺伝子組み換え技術によるものがあるが、パブリックアクセプタンスの観点から産業利用は難しく、一方、薬剤やガンマ線を使う育種では突然変異率が低く、また目的形質以外の付随変異も多く発生する。そこで、このような従来技術の欠点を克服する新たな突然変異育種法として、イオンビーム育種技術が注目を集めるようになった。次に、吟醸用清酒酵母、昆虫病原糸状菌、根粒菌に関する具体的な研究例が紹介された。

醤油醸造に用いる麹菌は、原料である大豆や小麦のタンパク質を高分解する性質を付与することで醤油の生産性を向上させることができるが、従来法では付随変異が多く、有望な変異株を得ることが難しい。そこで、イオンビームを用いることによってタンパク質分解酵素であるプロテアーゼを高生産する新規の醤油醸造用麹菌の作製に成功した。

また、清酒酵母においては、イオンビーム照射により、吟醸酒特有の香りの主成分であるカブロン酸エチルの生産量を5倍に向上させることができている（図3）。この新規清酒酵母は、高崎量子応用研のある群馬県内の酒造蔵に頒布されていて、それを用いた吟醸酒が2013年4月より販売開始されているとのことである。イオンビームは、農業や環境分野での利用が期待される微生物育種にも応用されている。生物農薬として利用されている昆虫病原糸状菌（イザリア菌、ボーベリア菌、メタリジウム菌）を対象に、イオンビームを用いた有用変異株の創製に着手した。その結果、イザリア菌、ボーベリア菌変異株では、親株よりも500-3500倍もの薬剤耐性を示す形質の獲得に成功した。さらに、メタリジウム菌変異株では、従来よりも高温耐性を持つ変異株が得られている。いずれの変異株においても、病害虫に対する生物農薬としての病原力を低下させることなく、有用形質の高度化に成功しており、今後生物農薬としての利用が期待される。さらにバイオ肥料の供試菌である根粒菌では、イオンビームによる品種改良により、高温耐性を持つ変異種が得られており、バイオ肥料微生物としての利用が期待できる。

最後に、福島第一原発の事故によって多量に飛散した放射性物質の回収・除去のための微生物バイオレメディエーション技術への応用について話された。放射線汚染環境下では、放射線に耐性を有する微生物の利用が適している。そこで、放射線抵抗性細菌ダイノコッカス・ラジオデュラン



図1 講演中の佐藤講師

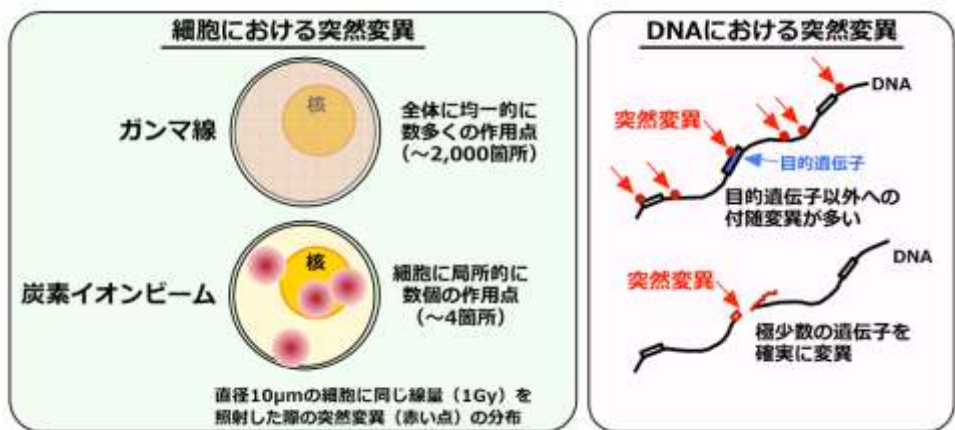


図2 異なる変異源による突然変異誘発の違いを示す模式

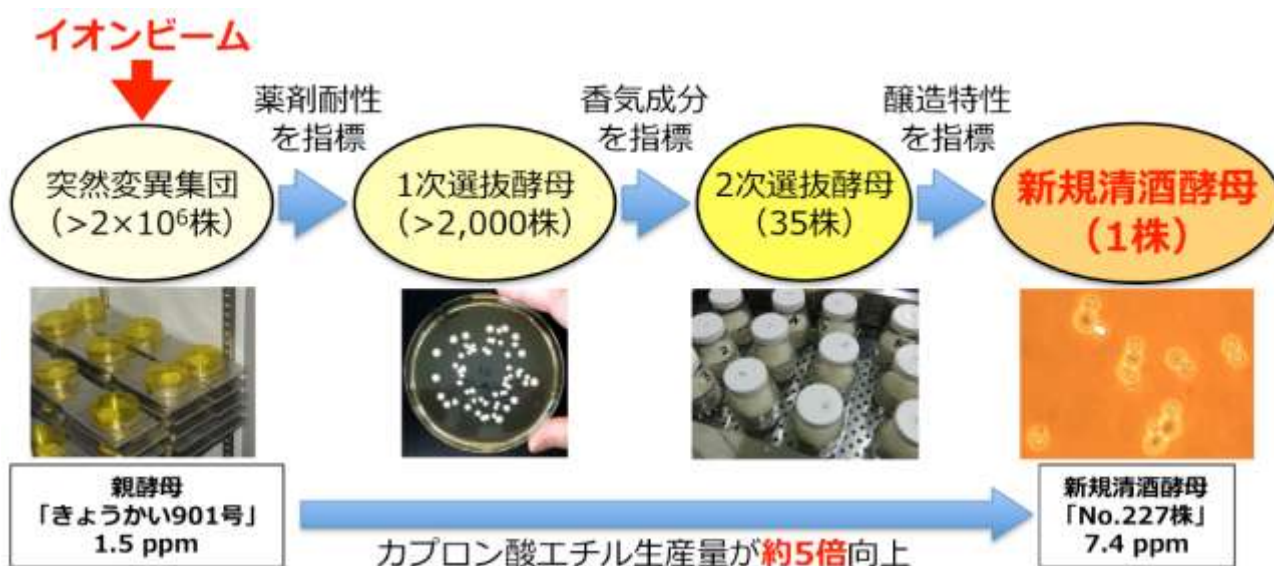


図3 カプロン酸エチル高生産清酒酵母の開発

スの有する高い放射線耐性に注目して、セシウム蓄積能の向上した変異株の創成を試みた。その結果、野生株より2倍以上セシウムを濃縮できる変異株を選抜できた。このようなセシウム高蓄積候補株は、バイオレメディエーション技術の供試菌としての利用が大いに期待できる。

本講演によって、イオンビーム育種は、花や稲などの植物だけでなく有用微生物資源創成にも大いに役立つ技術であることが良く理解できた。その対象が、醤油、味噌などの醸造やバイオ肥料など、食物関係にまで応用が広がるにつれて、本技術は遺伝子組み換えではなく、自然界でも起こっている突然変異を促進させている技術であるということを理解してもらうことが、まさに、パブリックアクセプタンスの観点から非常に重要であると思われる。

(岩瀬彰宏記)

4. 福井大学附属国際原子力工学研究所における放射線・原子力教育の取り組み

国立大学法人 福井大学 附属国際原子力工学研究所 福元謙一

3.11の福島第一原子力発電所の事故以降、大学の原子力関連の専攻・学科は、どのように学部・大学院教育に取り組んでいるか、大変関心のあるところである。今回は、平成21年4月に設立された福井大学附属国際原子力工学研究所（以下、研究所とよぶ）における設立経緯、組織、教育体制の現状、そして今後の課題と展望について、同研究所の福元教授にお話いただいた。

設立の経緯だが、平成16年4月に大学院における独立専攻（原子力専攻）設立が発端で、その後、福井市文京キャンパスの研究所設置、工学部への副専攻開設を経て、24年4月に敦賀キャンパスに移転、26年「原子力構造システム・廃止措置部門」設置、28年4月に工学部における「原子力安全工学コース」開設、そして現在に至っている。この設立経緯からも分かるように、設立当初はもんじゅなど、近隣の原子力施設の活用による高速炉研究を中心とした原子力研究の組織として発足したが、3.11の事故以降、原子力防災・危機管理部門、原子力構造システム・廃止措置部門を設置し、廃炉時代の到来が予想される中、いろいろな環境の変化に対応できるよう、組織の見直しを進めているとのことである。一方で、28年4月から学部学生に対する原子力安全工学コースの設置が行われた。学部学生に対する原子力学科・コースの設立は国立大学においては実におよそ20年ぶりということであり、福井大学の原子

力教育への強い思いが感じられる。次に研究体制に関する紹介があった。研究所は6つの部門を有し、原子力の基礎基盤研究、安全性・防災危機管理向上を目指した実学的研究などに加え、米仏はじめ海外研究機関との学術交流を行っている。次に原子力教育体制に関する説明があった。研究所に配属される院生は原子力・安全エネルギー工学専攻の原子力工学コースに属する。28年度の配属学生は修士課程21名、博士課程が7名である。一部、学部学生の受け入れも行い、機械、物理、材料の各学科から4年生の卒研生として9名の学生を受け入れている。



図1 講演中の福元講師

大学院教育では、「安全と共生」をキーワードに、原子力とエネルギーの分野で高い倫理観を有した高度専門技術者の育成を目的とする。大きな特徴としては、多くの原子力発電所が立地する福井県に位置する立場を活かして、より実践的な研究教育を行うことである。表1に、原子力・エネルギー安全工学専攻原子力工学分野

の博士前期課程のカリキュラムを示す。特徴あるカリキュラムとして、金沢大、東工大、茨城大など全国8大学と原子力機構の間で構築した「原子力教育大学連携ネットワーク」のもとで、原子力関連科目を共通化し、共通講座を開講する取り組みも行っている。

学部教育では、機械・システム工学科（定員155名）の学部生の中から、1年後期に原子力安全工学コースに振り分けられた25名の学生の教育を担当し、3年次からは敦賀キャンパスにおいて学部教育を平成30年4月から行う予定である。安全工学専攻の理念である「安全と共生」を、学部教育にも展開し、学部3年次から修士課程2年間の計4年間の一貫教育としての原子力教育を、敦賀キャンパスで展開すべく検討を行っている。さらに、研究所では、敦賀サマースクール、原子力体感セミナー、福島県

表1 原子力・エネルギー安全工学専攻原子力工学分野のカリキュラム

専攻共通科目		原子力工学分野科目
原子力工学概論 ○	科学英語コミュニケーションA ●	原子核物理・原子核反応
原子力防災・危機管理 ○	科学英語表現A ●	原子炉物理学
エネルギー変換工学 ○	科学英語コミュニケーションB ●	原子炉制御工学
安全工学 ○	科学英語表現B ●	次世代炉システム
原子力・エネルギー法規	科学英語PBL1 ●	原子力材料学
原子核工学概論	科学英語PBL2 ●	核燃料工学
核燃料サイクル工学	原子力・エネルギー安全創成演習 ○	冷却材環境工学
原子炉工学実験	原子力・エネルギー安全特別実験 ○	放射線物理学・放射線化学
核燃料サイクル実習	長期インターンシップ	放射線生物学
原子力・エネルギー安全工学特別講義第1	原子力工学PBL1	放射線防護・遮蔽学
原子力・エネルギー安全工学特別講義第2	原子力工学PBL2	原子力・地震防災工学
原子力安全工学実習	エネルギー安全工学PBL1	廃止措置工学
計算機科学	エネルギー安全工学PBL2	熱水力安全工学
原子力基礎科学	PBL H-I	
原子力基礎実験	PBL H-II	
原子力応用実験	PBL W	
○は必修科目	●は選択必修科目(2科目取得が必要)	

楡葉での廃止措置セミナー、原子力危機管理スクールなどの実施、原子炉シミュレータ、放射線計測などの体験学習なども通常の大学院・学部教育とは別に実施してきた。外国人研究者の受け入れや留学生教育、研究・教育における国際交流も積極的に進めており、フランス CEA/INSTN からの研究者受け入れ、ベトナムでの原子力講座の実施、チェコ共和国科学アカデミーやチェコ工科大学での講演などを行っている。

研究所設立以来毎年大学院生を世に送り出し、平成 28 年度末までに 55 名の修士学生と 4 名の博士学生を輩出してきた。図 2 には、研究所の卒業生の就職先割合を示す。就職先は福井県内の原子力関連機関が多く、原子力機構や電力会社、メーカー、自治体などへも広く就職している。

さらに講演では福井県嶺南の原子力研究機関、行政団体、教育機関との連携のもとでの人材育成、研究の拠点化、さらには福井高専、若狭湾エネルギー研究センターとの連携など、立地条件を活かした人材育成、研究の展開を図っているということも紹介された。

最後に、今後の課題、展望としては、100 人規模の学生を教育する「敦賀キャンパス」としての本格整備が急がれること、100 人規模の教育体制を見据えた敦賀市の新たな連携などを挙げられた。福島原発事故以降の原子力に対する国民の不信感を払拭するために、様々な方向からの取り組みを行っている福井大学及び同研究所に敬意を表するものである。

(岩瀬彰宏記)

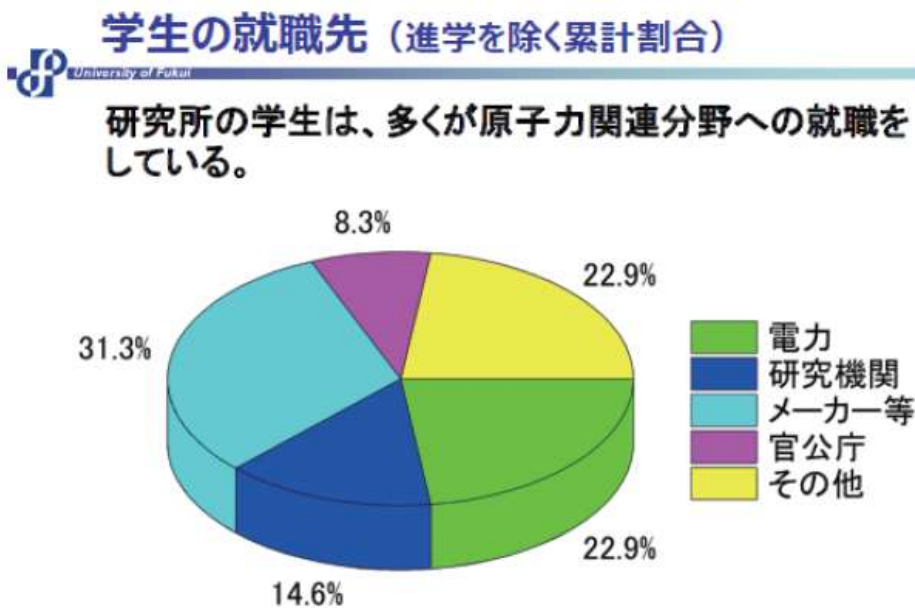


図 2 研究所卒業生の就職先割合 (H21-26)