

第 24 回放射線利用総合シンポジウム 聴講記

標記シンポジウムは、平成 28 年 1 月 24 日（月）午前 9 時 50 分から午後 5 時まで、大阪大学中之島センターにおいて、坂東昌子氏（NPO 法人あいんしゅたいん）、工藤博幸氏（奈良学園中学校・高等学校）、高橋信幸氏（京都府立桃山高等学校）、松浦寛人氏（ONSA 賞授賞者、大阪府立大学）、齋藤茂芳氏（ONSA 奨励賞受賞者、大阪大学）、島田斉氏（放射線医学総合研究所）河村弘氏（日本原子力研究開発機構）、兵頭俊夫氏（高エネルギー加速器研究機構）の 8 氏を迎えて盛大に開催された。

講演開始に先立って、大阪府立大学 地域連携研究機構 放射線研究センター長 奥田修一教授から開会の挨拶があった。朝早くから集まって頂いた講演者や参加者への謝辞、現在放射線の応用分野が高度化するに従って基礎研究が重要になっていること、最初の講演に関連して、湯川先生の講演を阪大松下講堂で聞いた思い出が述べられた。

座長は午前の 3 件を大嶋隆一郎専務理事が、午後の最初の 3 件を児玉靖司教授（大阪府立大学）に、最後の 2 件を岩瀬彰宏教授（大阪府立大学）をお願いした。シンポジウムの参加者は 88 名であった。



奥田副会長による開会の挨拶

1. 湯川博士と原子力

NPO 法人あいんしゅたいん理事長 愛知大学名誉教授 坂東昌子

講演の前半は湯川博士の原子力との関わりについて、後半は講師の 3.11 事故後の取り組みについて話された。

湯川博士が京大に設立された基礎物理学研究所（Yukawa Institute for Theoretical Physics）は、決して素粒子理論の研究所ではなく、生物物理や情報理論までもを網羅する幅広い研究がなされていた。現在の科学の問題点は分野横断的に物事を考える姿勢がないことであるという話から講演が始まった。図 2 は講師が大学院修士課程在学中の写真である。湯川博士の隣にるのが講師である。

1954 年のビキニ水爆実験による第五福竜丸事件の衝撃が、湯川博士のその後の平和運動、パグウォッシュ運動へ参加する原因となった。第 1 回の会議では博士は専門外の放射線の影響を討論する第 1 分科会に出席したことからそれが伺われる。第 1 分科会では放射線量の基準を決める科学的結論と人道的立場による判断を明確に区別することが話合われた。これは福島事故以降の議論に欠けている点であるとの指摘がなされた。

日本の原子力推進は民主・自主・公開を原則としているが、当時の科学者は公開が先頭と考えていた。



図 1 坂東講師

公開は NO SECRET であったが、法律ができてその英語訳では OPEN となっており、科学者の考えとは異なっていた。

次に福島事故の話に移った。福島事故の後、核廃棄物問題が明らかになった。種々の問題がある軽水炉が世界中で選択された理由について、トリウム型原子炉はプルトニウムを生産できないためという見方もできるとのこと。多くの国の原子力研究は核兵器の開発から始まったが、日本とフランスの原子力研究は原爆からでなく平和利用から始まったことが、その後両国の原子力技術が世界に先駆けていた理由の1つと考えられるとのこと。残念ながらフランスはその後核兵器所有国になってしまったが。



図2 湯川博士と講師

Muller の LNT (Linear No Threshold) 仮説に疑問をもった講師達は、Russel の線量率と修復能力を高度化したモデルを作成した。それを用いると、線量率が低いと放射線の影響はすぐ頭打ちし、強いと効果が続くという多くのデータを上手く説明できた。

市民と科学者、異分野の科学者が議論することは科学の内容がより豊かになり、正しい知見が皆のものになる。科学者への不信や科学そのものへの不信を払拭して、「本当のことを知ることは力になるのだ」と分かる必要がある。福島事故後は 1mSv でも危険と言わざるを得ない雰囲気があったが、1mSv は安全というのは科学的事実、その線量を受けた被災者を支援するかしないかは人道的問題、しかしそのために科学的事実を曲げてはいけない。原子力発電所が危険か安全かの議論では、その間の意見がない。また普通は議論すれば真ん中に行くはずであるが行かない。原発賛成・反対と科学的事実とは異なることを自覚することが大切等の重要な意見が述べられた。

1954年のビキニ水爆実験と1956年の原子力委員会、日本原子力研究所設立と始まった日本の原子力推進の間に何が起きたのか、水爆実験と原子力発電とを区別できていたのか、或いは日本人の特質として片方から片方へ振れてしまったのかとの質問に対しては、その2つはパグウォッシュ会議では区別すべきであるとの意見であった、との回答であった。低線量では影響が飽和する講師らの研究成果についての質問については、がんは体細胞が、遺伝は生殖細胞が関係しているが、両方とも変異細胞が増えると増加するので、変位率が重要でありそれを議論したとのことである。

講師を中心に分野横断的な低線量放射線の生体影響の研究会が開かれている。データに基づく科学的情報の必要性を痛感した講師らは、データ集を編集した。放射線の生体影響データ集「放射線必須データ32」が創元社から刊行された。放射線影響の議論をするためには必要不可欠のデータが掲載されている。ぜひ多くの方が手に取って勉強して頂きたい。

(義家敏正記)

2. 放射線計測と聞き取りを通して生徒達と学んだ広島・福島

奈良学園中学校・高等学校 教諭 工藤博幸

講師の勤務する奈良学園では、科学部に所属する中学校・高校生達が、2002年から2010年にかけて被曝地広島市内での放射線量測定を行ってきた。学園周辺の放射線量測定から始まり、広島は現在でも汚染しているのではないか、という疑問を自分たちで調べたいということからの発展であった。

広島市内の600地点の γ 線計測では最高 $0.1\mu\text{Sv/h}$ （市街化されたコンクリート部分）平均 $0.07\mu\text{Sv/h}$ と、最早黒い雨降雨地域の内外で区別がつかないほどに浄化していたことが分かった。

「私たちと同じ誤解は全国の人にはないのだろうか」との問いかけから、被曝地への意識調査が行われた。街頭アンケートを全国で実施し、広島・大阪・兵庫（豊岡・姫路・淡路島）・東京などで被曝59～60年へ向けて約1500件の回答を、被曝64～65年へ向けて約400件の回答を得た。広島市内、広島県内とも約30%が他県と同じ放射線量と考えているが、30%は他県より強いと思っている。無視できないくらい強いと考えている人も5%以上いる。また他府県の在住者では30%近くが広島は他府県より強く、30%が無視できないくらい強いと考えている。被曝地に対する差別や偏見を知っているかとの間に対しては、広島県内では60%以上が知らないという回答であるが、他府県の在住者では80%が知らないである。これらの結果から被曝された方々、広島に住む方々の今なお続く苦しみを生徒たちは実感したとのことである。

東日本大震災後、陸前高田の松を京都の五山の送り火で使えなかったことに生徒が憤り、2011年からは福島における放射線量に関心を移した。モニタリングポストから予想される外部被曝の予測と、実際に身につけた線量計による被曝量との間にずれがあることを福島県伊達市を例にした調査で知り、小型線量計D-シャトルによる高校生の実際の外部被曝状況調査を、2014年6/18(水)～7/1(火)の14日間、福島県内の6つの高校を含む各地の12校が参加して行った。各校とも生徒10名、教員1名が同時にD-シャトルを携帯（体育の授業も就寝時も）し、各校生徒の学校内で過ごした部分の線量を平均して比較した。福島の生徒さんは自宅に帰ると高い場合もあるが概ね校内では低い。また岐阜県の高校生の線量が高いことが判明したが、これは地質学的原因である。

広島での手法と同様のアンケートによる聞き取り調査を、JR福島駅前（在来線側である東口の駅前広場）で、5年間同一内容の対面式聞き取り型形式で実施した。5年間の差を比較することにより、福島の人々の心の変化を分析した。回答者数は、750人を超える。毎年多い回答は、何時になれば安全になるのか、政府の政策への不満、健康面や子供への影響の心配である。しかし健康面や食品への不安は最近減少しているとのこと。

科学部の生徒は広島、福島へ行き、分かる喜びを実感している。しかし、学校や父兄の理解はまだ課



図1 講演中の工藤講師

題が残る。理解を深めるために、測定結果等をホームルームで全校生徒に知らせる試みが行われている。広島行きでは25,000円、福島行きでは45,000円を父兄が負担している。広島では被曝する心配はなかったが、福島での測定が始まると、毎年数人が親の反対で部員になれなかった。NHKのクローズアップ現代で、福島を調査したことが2011年11月12日に放送されると、学外からクレームがあった。近畿大学の原子炉の見学も含まれる原子展に生徒を連れて行くと、高校の所在地である大和郡山の市役所の職員から、子供を殺す行為とのクレームがあり、市の人権擁護委員会に相談して解決した話等があり、まだ世間の理解を得ているとは言えないとのことであった。

生徒たちの成果は、日本化学会近畿支部「中高生のための化学研究発表会」で2002年から連続して発表している。また、「みんなのくらしと放射線展」でも福島での調査結果を発表し好評を得ている。指導者の熱意が生徒に伝わり、素晴らしい成果を挙げていることが聴衆に良く分かり、皆感銘を受けた。

(義家敏正記)

3. 放射線教育の現状と課題

－放射線は魅力的な探究活動のテーマ－

京都府立桃山高等学校 教諭 高橋信幸

高校生がもつ「原子力」という言葉の印象についての2015年の意識調査では、半数が原発事故であったが、同じ調査の30年前の結果では原爆であったとの話から講演が始まった。中学校、高校の放射線教育の実態が厳しいことの紹介がなされた。中学校では、1958年から放射性同位体や α 、 β 、 γ 線について学習していたが、1977年より削除された。2008年からエネルギー教育として放射線の性質と利用として理科「科学技術と人間」の「エネルギー資源」の中で復活した。



図1 講演中の高橋講師

高校では1994年に施行された物理Ⅰ・物理Ⅱの中で放射線は最後の第5章であり、4章と5章は選択制のため大半の高校は入試対応で4章を選択し、放射線は5%程度のごく少数の生徒しか履修していなかった。しかし、2012年に原子力や放射線が物理基礎に導入された。理科の必修科目が4分野の基礎科目の中から3科目となったため、高校生の物理基礎履修率は大きく向上し65%前後となった。物理基礎の「エネルギーとその利用」では様々なエネルギーに併せて核エネルギーを紹介し、原子力発電の仕組み、放射線の利用、X線の利用等を学ぶ。しかし教科書の最後の章であり、実際の授業時間は1時間程度か、その時間もままならない場合もある。エネルギー保存や運動量保存などの高校物理で扱う法則でも完全な説明は難しい。放射線については現代物理の理論に基づく理解が必要であり、現代物理の面白さを教えるという意味では必要であるが、学習の積み重ねから科学的な思考力・表現力、概念を理解するうえでの接続性が良くない単元と見なされている。実験観察や探究的な活動を重視する物理の学習内容を精

選すると、放射線は省略する単元の有力候補とされやすいとのことである。

しかし講師はこの考え方に反対で、放射線の教育は実験/実習の教材として最適と考えてきた。講師の桃山高校では、グローバルサイエンス部のクラブ活動として、巨椋池干拓地の放射線の計測とその解析を、生徒が熱心に行っていることが紹介された。巨椋池は宇治川と木津川の合流する手前に存在した浅い池である。昭和に入ってから干拓により農地となった(図2参照)。



巨椋池干拓地の放射線量を測定すると北部と南部で大きく異なり、それは木津川と宇治川の運ぶ土の違いであることを見出した。更に放射能の種類を、シンチレーション式γ線モニターにより識別する方法を開発した。高校生が5年間毎年研究内容を深めながら、先輩から後輩へと研究が引き継がれ、それぞれ熱心に、そして何よりも楽しそうに、この研究に取り組んできたことは偶然ではなく、放射線についての課題研究が高校生にとって魅力的であることの証拠である。(1)実験観察から得られた結果を考察する。(2)そこから仮説を設定する。(3)その仮説を検証するための実験観察方法を考案する。(4)その実験観察結果を再び考察して仮説の検討を行う、という探求活動が可能である。



図2 大正時代の巨椋池(上)と現在の巨椋池干拓地(下)

放射線計測には測定の際のばらつきがあるため、統計処理が必要である。しかし統計についての教育が学校では殆ど行われていない。放射線はその良い事例になるのでないかとのコメントが会場からあった。それに対して講師からは、統計が最近センター試験に出題されたため、数学でも重視され始めたとの返答であった。それならば大学入試で放射線が出題されるように運動すれば良い、との座長のコメントもあり会場を和ませた。更に放射線や原子力は理科の教育としてだけでなく、社会学、心理学等学祭的なテーマとしての可能性を秘めているとのコメントもあった。

桃山高校グローバルサイエンス部は、「みんなのくらしと放射線展」で第3回と4回のハイスクール放射線サマースクールで最優秀賞を授賞しているだけでなく、「科学技術フェスタ 2012」でのポスター発表、京都大学主催のELCASの代表として「平成26年度GSC全国受講生研究発表会」で発表、京都サイエンスフェスタでの口頭発表など活発な活動を行っている。生徒たちが自分たちで考えて何が問題であるかを見出し、それを解決して次のステップを目指しているということは、放射線に関する課題が教材として優れているという講師の意見を支持していると強く感じた。

(義家敏正記)

4. [ONSA 賞受賞講演] 核融合プラズマおよび大気圧プラズマの熱流束計測

大阪府立大学 地域連携研究機構 准教授 松浦寛人

講演の導入として、水素爆弾とは何かを紹介された。講師の松浦氏によると、水爆とは爆発的核融合連鎖反応のことである。水爆の規模は TNT (トリニトロトルエン) 換算で 10 キロトンを超える爆発ということになるが、水素の燃焼でこの規模に達するには水素ガス 30 トンが必要であり、現実的にはこれを一瞬で燃焼させることは不可能である。一方、水素爆弾は重水素 (^2D) と三重水素 (^3H) の核融合反応であり、5g の重水素と 7.5 g の三重水素が核融合を起こせば生じることになる。核融合炉というのは、

出力制御装置によって少数の核融合連鎖反応を長時間保持するものであり、その例は実は天然にたくさん存在する。例えば、星のエネルギーは核融合によって生み出されており、太陽も核融合反応で光を発する恒星であり、プラズマ状態で存在している。

さて、地上での核融合炉開発の研究は 1950 年代から 60 年くらい続けられているが、実現には様々な課題があり実現までにはまだほど遠いのが現状である。核融合炉は、水爆と同じ重水素と三重水素を約 1 億度に加熱して融合する反応を用いる。現存の JET 装置で、ピーク値で $100\text{kW}/\text{m}^3$ の記録を出している。制御核融合での最重要課題は熱の制御である。特に核融合炉のダイバーターとよばれる場所は太陽表面に匹敵する熱流束が集中するので、ここの熱制御が問題となる。しかし、ダイバーターの熱流束測定には様々な困難が存在する。松浦氏は、京都大学のヘリオトロン J 装置や核融合研究所の大型ヘリカル装置を用いて熱流束測定実験を行い、その評価に関わってきた。プラズマの時間変化に追従する今後のサーマルプローブの研究開発は、将来のモニタリングツールとして期待されるものである。

さて、あらためてプラズマとは何かというと、気体を構成する分子が電離し、陽イオンと電子に分かれて運動している状態であり、電離した気体である。プラズマ研究の今後に目を向けると、最近ではプラズマ医療、あるいはプラズマ農学といった分野も盛んになってきている。これらの分野の特徴は、大気圧状態のプラズマを応用しようというものであり、例えば、微粒子生成、表面改質、環境有害物質処理、プラズマ滅菌、がん治療、植物成長促進など、放射線化学との共通点が多いことが分かる。この大気圧プラズマの熱流束を調べてみたところ、中性ガスやラジカルの寄与が大きいことが明らかとなった。今後、これらの表面反応を考慮した計測に興味深い結果が期待される。

(児玉靖司記)



図 1 講演中の松浦講師

5. [ONSA 奨励賞受賞講演]

小動物用マイクロ CT を用いた生体微細構造評価と病態モデルへの応用

大阪大学医学系研究科保健学専攻 医用工学講座 助教 齋藤茂芳

小動物用のマイクロ CT は、周辺機器として麻酔機器があれば後は特に必要なく、撮影が簡単で撮影範囲も広いという利点を有している。肺や体幹部の撮影は MRI より優れているが、その反面、軟部組織のコントラストは MRI に到底及ばないのが欠点であった。そこで、講師の齋藤氏はマイクロ CT 画像において、中枢神経組織での画像コントラストをあげるための条件を検討した。8 週齢マウス (C57BL/6) を用いて、脳組織を灌流固定後、造影剤に 3 日～14 日間浸透し、マイクロ CT 撮影を行ったところ、造影剤の浸透時間が長いほど組織コントラストの良い画像を取得できることが分かった。また、撮影時間を 17 秒、2 分、8 分と変えて検討したところ、8 分撮影でもっともコントラストが高くなることが分かった。組織コントラストが生じるメカニズムを明らかにするために、組織染色と対比して調べた結果、白質に比べ灰白質に造影剤がより浸透しやすいことが明らかとなった。これは、神経線維密度が高いほど造影剤の浸透が少ないことが原因と考えられ、本手法の画像コントラストは神経線維の密度の差を反映していることを意味している。

次に、造影剤浸透法を用いて、マウス脊髄の CT 画像について検討した。その結果、1 mm 以下の脊髄神経、背根、腹根などのマウス脊髄の微細構造の可視化が可能であることが明らかとなった。

最後に、マイクロ CT を用いた放射線誘発肺組織変性の早期検出の可能性について検討した。放射線肺臓炎や放射線肺線維症は、肺野領域における放射線治療後の副作用の典型例であり、治療早期から肺組織障害のモニタリングを行うことは重要である。マウスの全胸部に X 線 20Gy を照射して放射線による肺組織障害を誘発し、マイクロ CT による撮影を、照射前、照射 1 日～14 日後で行った。その結果、照射後の肺組織において CT 値の有意な低下が観察された。このことは、CT 撮影により、放射線照射早期における非侵襲的な肺組織障害のモニタリングが可能であることを示している。



図 1 質疑応答中の齋藤講師と児玉座長

このように本手法は、低侵襲性の長期的観察を主眼にした用途と、造影剤を使うことによる高分解能な組織観察という 2 つの応用が可能である。今後は人への応用を目指したトランスレーショナル研究につなげていくことが望まれる。(児玉靖司記)

6. 認知症の分子イメージング研究

放射線医学総合研究所 分子イメージング研究センター 主任研究員 島田 齊

我が国は、先進国中でも随一の超高齢化社会を迎えており、それを背景に増え続ける認知症は大きな社会問題となっている。物忘れやそれに関連する脳の機能低下によって日常生活や仕事などに支障が出る状態が認知症である。全認知症のうち、40%を占めるアルツハイマー病が一番多く、ついでレヴィ小体型認知症が20%程度を占める。これら変性性認知症では、脳内に様々な異常タンパク質が蓄積することが知られている。例えば、アルツハイマー病ではアミロイドβタンパク質やタウタンパク質が脳組織に沈着する。これらのいわば“脳内にたまるゴミ”は、炎症の原因となり、最終的に神経細胞死を引き起こすと想定されている。アルツハイマー病では、アミロイドβやタウの沈着は臨床症状がでるおよそ15~20年前には始まっていると想定されているが、CTやMRI画像でこれら異常タンパク質の蓄積を確認することは困難であった。



図1 講演中の島田講師

この状況は、2004年に公表されたPiBという化合物を用いたPETによるアミロイドイメージングで一変した。アルツハイマー病患者の脳皮質には ^{11}C PiBの高集積がPET画像でみられ、これは確かにアミロイドβの局所的な集積を反映していることが明らかになっている。このようにアミロイドイメージングは、軽度認知機能障害患者のような早期の診断には有効であることが分かったが、新たな問題点が浮かび上がってきた。一つには、物忘れの症状が進行してもアミロイド蓄積量がほぼ頭打ちになるために、重症化の予測には使えないことが分かってきた。二つめには、ワクチンを用いた臨床試験の結果、アミロイドβの蓄積をアミロイドワクチンで抑えても治療効果がないことが明らかになってきた。

このアミロイドワクチンにアルツハイマー病の進行抑制効果が無かった理由について2つの可能性が指摘されている。一つは、治療介入のタイミングが遅すぎる可能性である。アミロイドβの蓄積は、臨床症状がでる20年前から神経細胞毒性を示すと考えられており、アルツハイマー病発症前に治療介入が必要であるという考え方である。二つめは、アミロイドβ以外に、タウタンパク質の蓄積を抑制しなければ症状は進行するという可能性である。患者の剖検により、アミロイドβの消失が見られても、タウの蓄積は進行していたことが確認されている。そこで、このタウ病変が画像診断並びに治療の標的として再認識されることになった。

タウイメージングPET用の薬剤として、放射線医学総合研究所は ^{11}C PBB3を開発した。これを用いたタウイメージングにより、タウ蓄積量と神経障害の重症度が相関し、蓄積部位に関連する神経障害が認められることが明らかになった。

このように、認知症研究は、異常蓄積タンパク質を可視化するイメージングによって飛躍的な進展を遂げた。今後、分子イメージングは病態の解明はもちろん、創薬分野においても欠かすことのできない基幹的技術になるものと期待される。

(児玉靖司記)

7. 東電福島第1原発の廃炉のための研究基盤創生

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究基盤創生センター 所長 河村弘

2011年3月11日の東日本大震災の際に起こった東電福島第一原発の廃炉作業が急がれる。そのためには、遠隔機器を用いた調査・作業と、サイト内の多量の放射線物質を放射性廃棄物として処分することが不可欠となる。これら廃炉作業を効率的に行うために整備中の2つの研究施設（檜葉、大熊）と研究開発の現状について報告していただいた。

講演では、まず廃炉に向けた取り組みの経緯について説明があった。2013年3月の廃炉対策推進会議において、「遠隔操作機器・装置開発・実証試験施設」、「放射性物質の分析・研究施設」の整備を原子力機構が行うことが決定し、その後の会合もあって、前者は檜葉町、後者は大熊町に設置することが確認



図1 講演中の河村講師

された。2014年8月には、以前にあった組織が原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）に改組され、その後、NDFによる研究開発の一元的管理が行われるようになった。図2に、NDFの位置づけと、各組織の役割分担を示す。この中で、原子力機構は、先に述べた2つの研究開発拠点の設置・運営を担う。2つの研究拠点（大熊分析研究センター（分析・研究施設）、檜葉遠隔技術開発センター（モックアップ試験施設））の建設地と拠点施設の概要を図3に示す。モックアップ試験施設は事務機能を担う「研究管理棟」と実証試験を担う「試験棟」から構成される。モックアップ試験施設は2016年度から本格的な運用を開始するが、それに先立ち、2015年10月には、首相、福島県知事、文科相らの列席のもと、開所式が行われた。

次に、実際の研究開発の内容、進捗状況に関する説明があった。廃炉作業の第一歩として、炉内の状況調査や炉室内除染などが必要となるが、これらの作業は高放射線量率下で行われるため、遠隔操作機器（ロボット）を用いて行うことが必要である。そこで、モックアップ試験棟に福島第一原発炉室内の模擬環境を作り出し、実証試験を行ったのち、第一原発現場で、開発した技術を実用することになる。モックアップ試験施設の研究管理棟には最新の没入型バーチャルリアリティシステムを導入し、容易に立ち入れない現場における作業を仮想現実空間で体験できる。

放射性廃棄物の処理・処分に関しては、性状評価、安全性評価、などが必要となり、これらの技術開発を行うために、大熊町の福島第一原発隣接地域に、分析・研究施設の整備を進めている。この施設は2018-2020年度運用開始を目指す。現在、詳細設計を開始するとともに、敷地内の線量分析、土壌分析

を実施中である。

さらに、福島第一原発の廃炉に関する研究基盤強化のために、中長期視点から、現場解決型研究開発だけでなく、高専・大学、産業界の研究者・技術者が幅広く集い、教育・研修に、檜葉、大熊に建設する施設の活用が重要であること。そして、そのためには、地元教育機関等と連携し、研究員などの原子力機構への受け入れ、人材の相互派遣などを行って、中長期的に持続可能な人材育成システム、研究活動支援システムの構築の重要性を強調された。

最後に、多様な研究者を集め、目標を共有しながら相互に有益な産業共創を促進する「場」としての橋渡しの機能、研究拠点のワールドネットワークを活用した国内外の研究開発の橋渡しの機能、民間では困難な実証試験、ロボット標準試験基準の策定、といった機能を担える研究拠点の整備を行っていく決意を示されて講演を締めくくられた。

福島第一原発の廃炉作業には、多くの公的、民間機関の連携、長期にわたる研究開発を担うべき若手研究者・技術者の育成が不可欠であり、原子力機構の檜葉、大熊の2つの研究施設が、それに向けて大きな役割を果たしていただけることを大いに期待している。

(岩瀬彰宏記)

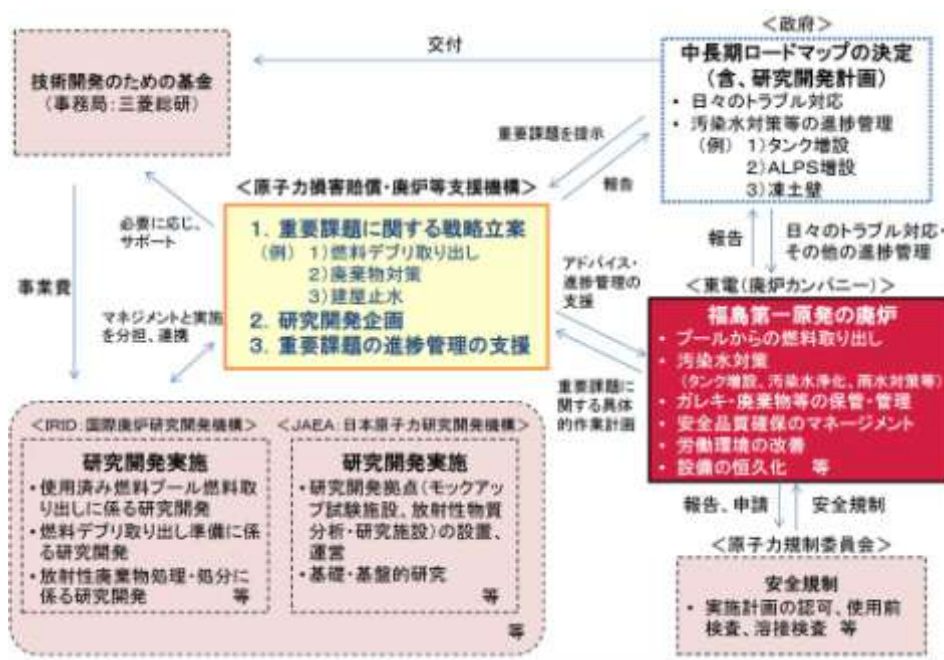


図2 原子力損害賠償・廃炉等支援機構の位置づけと役割分担

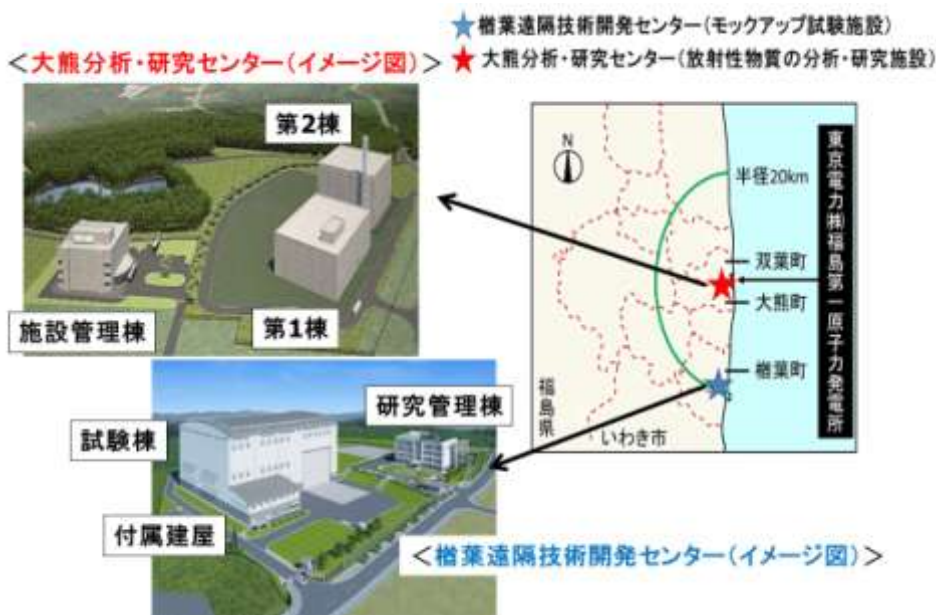


図3 施設建設地と研究拠点施設の概要

8. 陽電子：身近で役に立つ反粒子

高エネルギー加速器研究機構特定教授 東大名誉教授 兵頭俊夫

陽電子は電子の反粒子で、電荷が正である以外電子と同じ性質を持つ。陽電子と電子が会すると、対消滅により質量がエネルギーに変換され、高エネルギーのガンマ線が発生する。このように書くと、陽電子とは難しい素粒子物理の世界の話で、日常とは程遠いものと思ってしまうが、実は陽電子は、医学や材料科学分野など、身近なところですでに使われている。今回の講演は、我々の身近で役に立っている陽電子について、その基礎的な説明から応用まで、陽電子研究の第一人者である兵頭先生にお話いただいた。



図1 講演中の兵頭講師

まず、陽電子発見の歴史とその発生法に関する説明があった。陽電子は 1932 年にアンダーソンにより発見されており、その 1 年前にディラックによって理論的に存在が预言されていたが、アンダーソンはその理論を知らずに発見したそうである。陽電子の発生法としては、放射性同位体から β 崩壊により放出させるのが一般的である。よく使われる同位体としては、 ^{22}Na , ^{18}F などがある。前者は材料分析実験によく用いられ、後者は、がん診断 (PET) に用いられる。次に、陽電子の固体中での振る舞いに関して説明された。陽電子が固体中に入ると、固体中の電子と対消滅し、2 本のガンマ線を発生する。ガンマ線は非常にエネルギーの高い X 線 (光) なので、固体の外迄到達し検出器で観測できる。このガンマ線を観測することにより、固体中の電子の様子を調べることができる。

その最も身近な応用例として PET を紹介された。PET はいまや全国で約 400 か所の病院で診察可能ながん診断法である。まず β^+ 崩壊する性質を持つ ^{18}F をブドウ糖の OH と置き換える (FDG)。FDG を体に投与すると、体内のがん細胞など、細胞分裂の盛んな個所に集まり、そこで体内の電子と対消滅して 2 本のガンマ線が正反対方向に放出される。体の周囲にガンマ線検出器を設置し、いろいろな角度でのガンマ線発生を検出することで、対消滅が起こった箇所を特定できる (図 2)。ただし、FDG は、肝臓、腎臓、膀胱などの正常組織にも取り込まれるため、PET で特定できた箇所のさらに詳細な診断は必要となる。PET 法は、がん診断だけでなく、アルツハイマー診断にも用いられる。アルツハイマー患者の脳には β アミロイドやタウタンパクの蓄

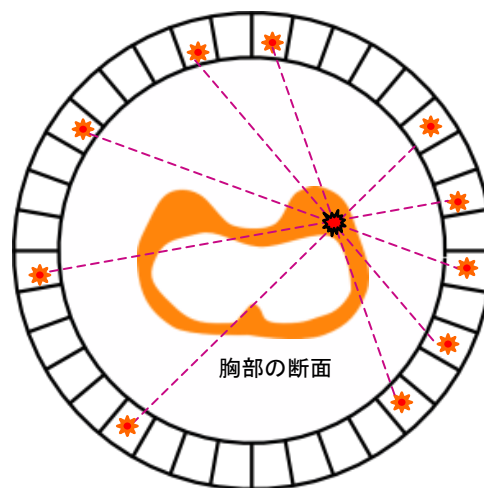


図 2 PET (陽電子放出断層撮影) の原理。 ^{18}F でラベルしたブドウ糖はがん集まる。 ^{18}F から出た陽電子はその場で消滅し 2 本の γ 線を真反対方向に放出する。それを同時検出すると、検出した検出器を結んだ多くの線の交点にがんがあることが分かる。

積がみられるので、これらに結合する[11C]PIB, [11C]PBB3といった陽電子放射薬剤を用いて診断する。

次に、金属合金中の原子空孔や絶縁体中の細孔の評価に陽電子を用いる応用例が紹介された。陽電子は正の電荷をもっているため、金属合金中の原子サイズの穴（原子空孔）にトラップされ、完全結晶の部分で消滅するときと比べ、その寿命は長くなったり、消滅相手の電子の運動量に依存して放出ガンマ線のエネルギーが変化する。金属合金中の原子サイズの格子欠陥や電子状態の検出は、陽電子でなければできないことも多く、多種多様な研究がなされてきている。また、絶縁体中では、陽電子は、金属と異なり電子と結合してポジトロニウムを形成する。

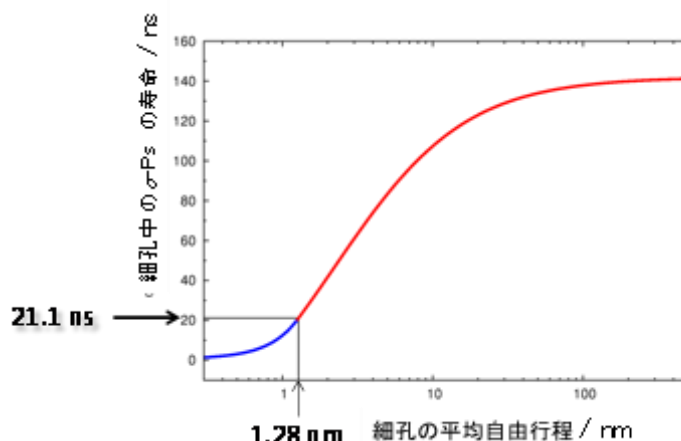


図 3 絶縁体中の細孔のサイズとオルソポジトロニウムの寿命の関係 [K. Wada and T. Hyodo, J. Phys., Conf. Ser., 443 (2013) 012003]

ポジトロニウムとは、水素原子において陽子が陽電子に置き換わったいわば、水素の軽い「同位体」である。ポジトロニウムには、オルソポジトロニウム (O-Ps) とパラポジトロニウム (P-Ps) の2種類ある。真空中での寿命は、O-Psが142nsと長く、P-Psでは、125psと短い。O-Psが細孔にトラップされると、ピックアップ消滅という現象により、その寿命は、真空中に置かれた場合より短くなる。O-Psの絶縁体中での寿命と細孔サイズには、図3のような関係があるので、O-Psの寿命を測定することにより、細孔サイズが精密にわかるのである。

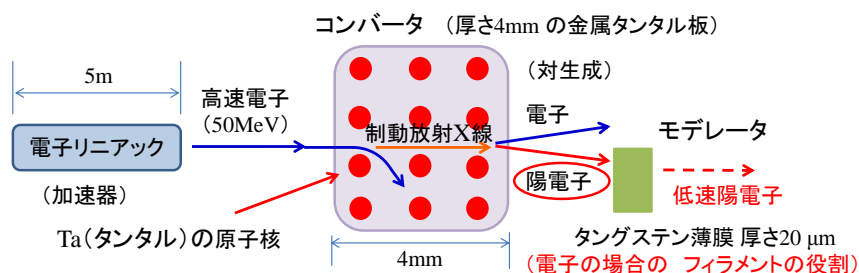


図 4 対生成による陽電子生成。電子リニアックで加速した電子を Ta 板のコンバータに当てると、制動放射 X 線が発生する。その X 線が Ta 板から出る前に、電子・陽電子対生成を起こす。生じた陽電子のエネルギーは高いが、タングステン薄膜のモデレータ（減速材）によって低速陽電子にする

今までの応用例は、主に、 β^+ 崩壊する放射性同位体を用いた方法であったが、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、高エネルギー電子加速器を用いた陽電子発生を試みている。電子リニアック加速器で 50MeV にまで加速した高速電子をコンバータ (タンタル板) に当てて発生する制動 X 線の対生成により、陽電子を生成するという方法である (図 4 参照)。この陽電子をタングステン薄膜に通して減速し、低速陽電子として用いる。この KEK 低速陽電子施設を用いた実験として、全反射高速陽電子回折法があり、Ge-Pt ナノワイヤ構造、Ag 表面上シリセンの構造決定など、他の方法では困難であった表面精密構造を明らかにしている。全反射高速陽電子回折法に関しては、さらに詳しいお話が聞けるとよかったです。時間の関係上、短い時間での解説になったのは残念であった。改めてまたお話をお聞きできる機会があれば幸いです。

(岩瀬彰宏記)

最後に大阪ニュークリアサイエンス協会 豊松秀己会長の閉会の挨拶がなされた。このシンポジウムが大阪府立大学地域連携研究機構との共催で、文部科学省や近畿経済産業局等の後援を受け、多くの学協会との協賛で行われたこと、湯川先生を中心に戦後の物理学者が原子力について考えていたこと、理科で放射線とエネルギーを教えている教育現場、認知症・がん診断、福島問題、陽電子等幅広い分野での講演を頂いたことが述べられた。最後に講演された講師の先生方へ感謝の意を表して締めくくられた。

シンポジウム終了後、講師の先生方にも参加していただき、会場を9階のサロンに移して、会員・参与間の親睦を高めるために交流会が盛大に開催された。交流会の参加者は46名であった。



豊松会長による閉会の挨拶



交流会