

## 第 26 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 30 年 1 月 22 日（月）午前 10 時から午後 5 時まで大阪大学中之島センターにおいて開催された。講演に先立って豊松会長の挨拶があり、引き続いて午前 3 件、午後 4 件の講演が行われた。最初に櫻井庸明氏（京都大学）による平成 28 年度の ONSA 奨励賞、堀邊英夫氏（大阪市立大学）による ONSA 賞受賞講演が行われた。引き続いて、岸田哲二氏（原子力安全システム研究所）による日本のエネルギー事情に関する講演、工藤和彦氏（九州大学名誉教授）による中学・高校の教科書における放射線教育についての講演、室賀健夫氏（核融合科学研究所）による将来の原子力エネルギーとして期待されている核融合に関する講演、中川毅氏（立命館大学）による水中の堆積物からの年代測定に関する講演、佐藤勝彦氏（日本学術振興会）によるビックバンによる宇宙の始まりに関する講演と盛りだくさんの内容であった。午前の座長は関西大学・工藤宏人教授、午後前半は義家敏正専務理事、後半は大阪府立大学・岩瀬彰宏教授にお願いした。

## 1. [ONSA 奨励賞（基礎研究部門）受賞講演]

## 粒子線照射が誘起する固相重合反応を活用した機能性ナノワイヤの開拓と粒子線の飛跡検出

— 1 個の粒子が引き起こす化学反応 —

京都大学 大学院工学研究科 助教 櫻井庸明

MeV を超えるエネルギーで入射された荷電粒子は、非弾性散乱を高密度で繰り返しながら物質中を進む。するとスパーとよばれるイオンラジカルや励起種がクラスター状をなして生成する場所ができる。それが重なりあって、イオントラックと呼ばれる空間を形成する。

イオントラック一つ一つをナノサイズの円柱空間と考えると、その空間内で有機化合物の化学反応により不溶化したナノサイズのゲルを構築すれば、ワイヤ状ナノ構造体を得ることができる（単一粒子ナノ加工法、図 2 参照）。

この手法は高分子薄膜では、2001 年現に京都大学の関修平教授らによって報告され、高分子薄膜に垂直入射した高エネルギー粒子線の単一粒子の飛跡（イオントラック）内で架橋反応が生じ、その後有機溶媒で現像操作を行うことで、未照射部位を留去しナノ構造体のみを単離するという方法論が実演されている。この詳細については、29 年 6 月 9 日に開催された第 65 回 UV/EB 研究会において、関教授により「Rays から Ray へ：単数として扱う放射線の物理と化学」というタイトルで講演がなされている。

講演者はこの背景の中、低分子化合物を素材として同様にナノ構造体を得る「単一粒子誘発固相重合法（Single Particle-Triggered Linear Polymerization: STLiP 法）」を試みた。同じ有機化合物ではあるが、高分子鎖と低分子化合物とでは分子のサイズに圧倒的な差があるため、照射部位の不溶化を可能にするには、十分な化学反応を起こすことが必要である。そしてこれが実現できれば、低分子化合物の特徴を活かして未照射部位を迅速に溶解し除去することや、ナノワイヤ間の相互作用の大きなバンドル構造を得ることも可能になる。本講演では、低分子化合物を素材としたナノ構造体形成のための分子設計指針、並びに低分子化合物を用いた故に見えてきた高分子系との差異について発表がなされた。



図 1 講演中の櫻井講師。

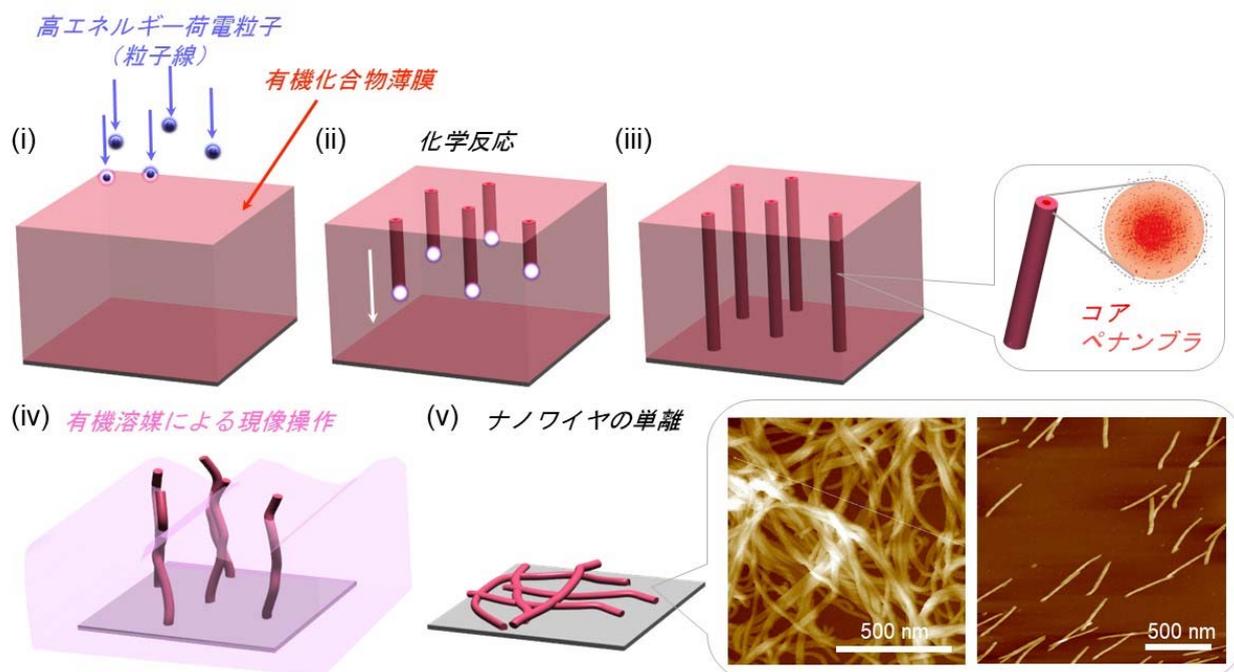


図2 粒子線固相重合によるナノワイヤの形成。

また低分子材料を原料としたナノ構造体の形成の実際として、芳香族アミンからなるナノワイヤの形成が示された。典型的な事例として3つの窒素原子を有する1,3,5-トリス[(3-メチルフェニル)フェニルアミノ]ベンゼンでの結果が述べられた。複数種の有機溶媒を用いた多段階現像操作により、形成されたナノワイヤの崩壊過程が原子間力顕微鏡 (AFM) で鮮明に観察された (図3)。崩壊したナノワイヤを電子スピン共鳴分光法・ゲル浸透クロマトグラフィーにより分析したところ、粒子線照射によるラジカル生成と高分子量化合物の生成が確認された。以上より得られたナノワイヤは、主としてラジカル重合反応に伴う高分子量体が絡まり合うことで形成されていることが示唆された。その他、ポルフィリンからなるナノワイヤ、芳香族のハロゲン化によるナノワイヤ形成能の向上、固体発光能を有するナノワイヤ等が紹介された。

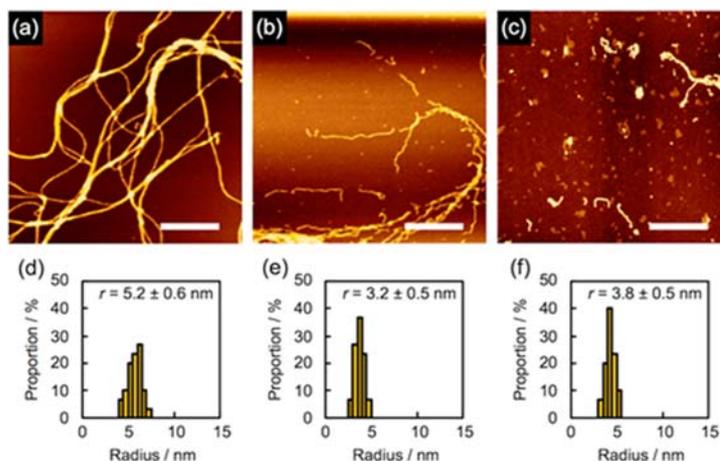


図3 1,3,5-トリス[(3-メチルフェニル)フェニルアミノ]ベンゼン薄膜から形成したナノワイヤの段階的溶媒現像に伴う (a-c) 原子間力顕微鏡像、及び (d-f) 半径の分布図の変化。薄膜は490 MeV  $^{192}\text{Os}^{30+}$  イオン照射後に (a, d) 60 °C で *n*-ヘキサン、続いて (b, e) 10 秒間クロロホルム、その後 (c, f) 2 分間クロロホルムで現像した。スケールバーは500 nm (A. Horio, T. Sakurai, G. B. V. S. Lakshmi, D. K. Avasthi, M. Sugimoto, T. Yamaki, S. Seki, *Nanoscale*, 8 (2016) 14925)。

最後に炭素クラスターイオンを題材として化学反応による可視化を通じた粒子線の飛跡検出について述べた。クラスターイオンとは数個から数万個の原子が結合した塊を指し、それらは一個のイオンとして振る舞う。更に、高速に加速して物質に照射した場合、複数のイオンが数Å間隔で結合した状態で

物質内に入射し、原子間距離程度の空間的相関を持って物質内を進行する。その結果、材料の高密度の電離、励起を誘起することで、様々な物質の構造変化や化学変化を起こす。講師等はこの変化を利用して、炭素クラスターイオンの飛跡検出とイオントラックの可視化に成功している。

荷電粒子の性質や、ターゲット材料の受ける照射効果から話が始まり、化学工学に馴染みのない人にも良く分かる講演であった。今後の見通しや何に使えるのかという質問があったが、講師は現在のところ新しい方法論の開発が主であるとのこと。最近では研究者に対してその研究が何の役に立つのか、何ができるのかを問うことが多いが、実用化は企業が考えることとして、大学では現象の探究に邁進することも必要である。

(義家敏正記)

## 2. [ONSA 賞 (応用研究・開発部門) 受賞講演]

### イオンビーム照射レジストの除去技術の確立とレジスト材料の開発

#### — 放射光を利用した感光性樹脂 (レジスト) の開発 —

大阪市立大学 大学院工学研究科 教授 堀邊英夫

講演は受賞テーマである「環境にやさしい感光性樹脂 (レジスト) の分解・除去について」及び「高解像度・高感度化学増幅型レジスト材料の開発」について行われた。

前世紀の末から今世紀に入り、光・電子デバイスの多様化、高精細化の進展は著しものがある。半導体メモリや液晶ディスプレイ等の製造では、ある膜をウェハ上、又はその前に作った膜上に成長させ、リソグラフィとエッチングで微細加工するという操作が何度も繰り返される。

リソグラフィ工程では、ウェハ上にマスクパターンを転写するために、露光・現像を行うことにより感光性高分子 (レジスト) をパターンングし、これをマスクとして基板のエッチングや p/n 接合を形成するためのイオン注入を行う。この段階でレジストの役目は完了し、除去されることになる。電子デバイスの製造工程を図 2 に示す。

現在のレジスト除去法では、薬液を用いるウェット方式と酸素プラズマやオゾンアッシング等のドライ方式が多用されている。薬液方式では、環境負荷の大きいレジスト除去液が大量に使用されていることが大きな問題となっている。酸化系ガスを用いるアッシング方式では、基板や金属配線の酸化劣化やプラズマによるデバイス特性の不安定化等が問題となっている。そのため、産業界では、薬液フリー、酸化レス、プラズマレスな新規レジスト除去方式が強く求められている。

講師のグループでは、加熱したタングステンフィラメント (Hot-wire) で水素分子を分解し生成する水素ラジカルを用いた、環境に優しい新規レジスト除去方式の開発に取り組んでいる。湿潤オゾン方式では ○薬液フリー (ランニングコスト: 1/5、○環境負荷 (TOC): 1/10)、○100°C 以下のため基板や金属配線の酸化が起きにくい、○プラズマレスである。原子状水素方式 (HW 法) では、○薬液フリー、○還元分解のため基板や金属配線の酸化回避、○プラズマレス等の利点がある。



図 1 講演中の堀邊講師。

一方イオンビーム照射レジストの表面は、イオン種によらず  $5 \times 10^{14}$  個/cm<sup>2</sup> 以上になると、注入量の増加とともに表面側が硬化（炭化・架橋）し、除去速度が低下する。注入により、高分子材料の表面が変質し、除去が困難になるメカニズムを調べた。その結果、イオンが注入されたレジストでは、酸素結合が減少し炭素結合が増加するような炭化または架橋により、硬化することを明らかにした。そして原子状水素により、イオン種によらず  $5 \times 10^{15}$  個/cm<sup>2</sup> までの高ドーズイオン注入レジストを高速で除去できることを明らかにした（図3）。

次に高解像度・高感度化学増幅型レジスト材料の開発の話に移った。半導体の微細化には極端紫外線（EUV）レジストの開発が不可欠である。EUV レジストに求められる特性としては、高解像度（resolution）、高感度（sensitivity）、パターン形の低凸凹（line-edge-roughness）の3つが求められる（図4）。講師は従来の2成分系 EUV レジスト（ベース樹脂/酸発生剤）に溶解抑制剤を添加し、未露光部の溶解速度を低下させることで高解像度を狙ったベース樹脂、酸発生剤に溶解抑制剤を別途添加した3成分系 EUV レジストを作製し、レジスト特性を評価し、溶解抑制剤を添加することで、Trade-off を克服し高解像度化と高感度化を同時に達成できる EUV レジストの材料設計指針を見出した。

講師は講演の最初に、大学における教育、特に人間育成の大切さについて述べた。大学においても企業においても人間関係が大切であり、それをモットとした教育を15年間行い、70人以上の学生を送り出したが、会社を退社したという話を聞いていないとのことである。これは講師が研究だけでなく、教育者として優れていることの証拠である。

（義家敏正記）

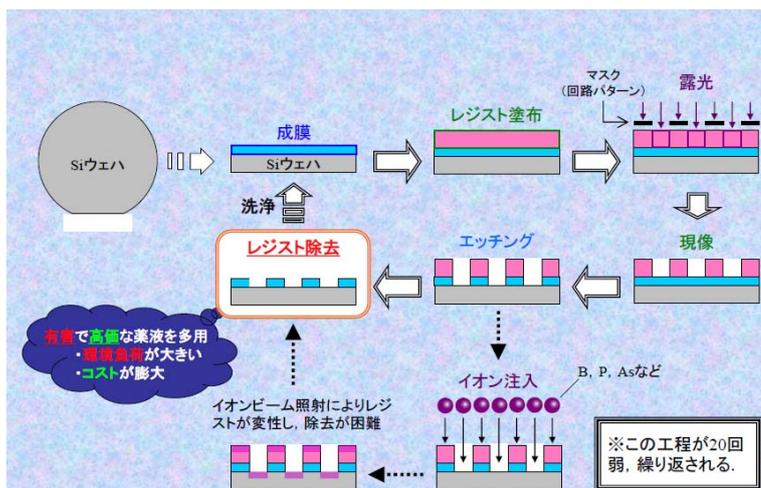


図2 電子デバイス製造工程。

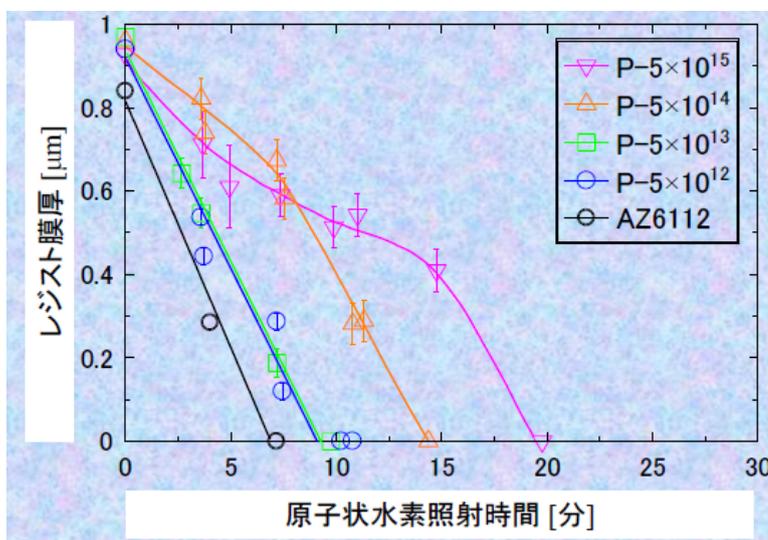


図3 Pイオン注入レジストの原子状水素による除去曲線。触媒体と基板との距離：100mm、触媒体温度：2040℃。H<sub>2</sub>ガス圧力：2.13Pa、初期基板温度：25℃。

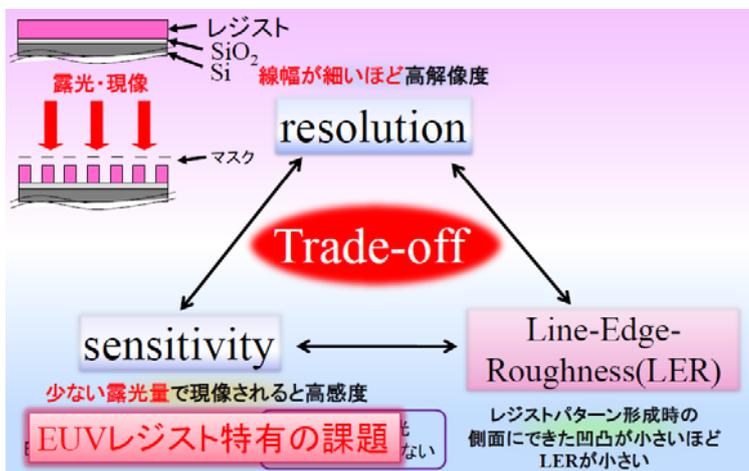


図4 レジストに求められる特性。

3. 日本の電力事情 — 再稼働原発の安全性と安定したエネルギー源を考える —

(株) 原子力安全システム研究所 顧問 岸田哲二

2011年3月の東日本大地震での津波で被災し、全電源喪失によって発生した東京電力福島第一発電所の炉心のメルトダウンと水素爆発による環境への放射性物質の大量放出は、国内のみならず世界各国に原発は恐ろしいとの印象を強く植え付けた。当時の菅内閣の安全対策強化の目的で、原発による発電が長期間ゼロとなり、今日でも再稼働した原発は僅かである。これを補うための火力発電所を運転していることにより、大量の燃料を海外から追加的に輸入せざるを得ない状況が、現在も続いている。その総額は15兆円にもなる。更に菅首相は原発の代替として太陽光・風力等の再生エネルギーの積極的導入を図るべく、固定価格買取制度を導入した。現在私達が月々支払う電気料金には消費税を上回る固定価格買取負担分が賦課金として課せられている。斯様な異常な現状をふまえて岸田講師は我が国における電力事情を紹介した後、再稼働原発が



図1 講演中の岸田講師。

福島事故の教訓として如何なる安全対策を講じ、その結果としてエネルギーの安定供給に寄与し得るかを講演した。

1960年に1000億kWh程度であった日本の発電量は現在およそ10000億kWhである。50年間にほぼ10倍となった。当初は水力と石炭及び石油火力に依存していたが、まもなく石油火力が主体となった。1973年の第一次オイルショックを契機に、脱石油政策をベースに、原子力と

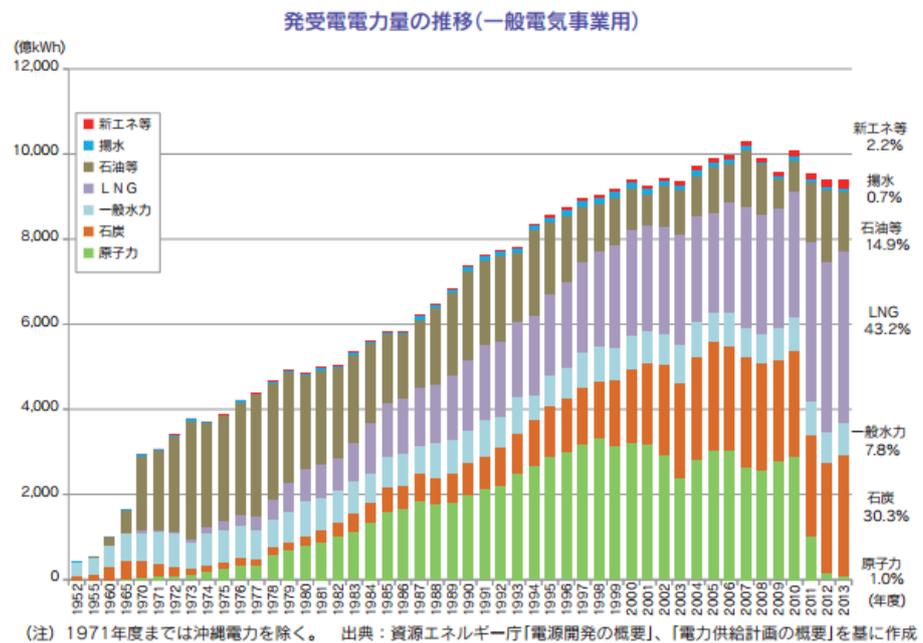


図2 日本の発電電力量の推移。

LNG 発電の開発が進められた (図2)。2000年に入って地球温暖化対策の切り札として、鳩山内閣は温室効果ガス排出を1990年に比して、2020年には25%削減案を目標として、化石燃料を大幅に減らし、再生エネルギーと原子力発電へのシフトを掲げた。当時の目論見では2030年には原子力依存を50%以上とした。しかしながら、2011年の東日本大震災での福島第一発電所の事故を契機に、前述したとおり我が国の電力事情は激変することとなった。

このような時こそエネルギー政策の原点に立ち戻り、図3に示すように四つの基本要件を踏まえる必

要がある。大切な要件の一つである安定供給と安全保障について図4に示す。火力・再生エネルギーには各々一長一短があり、水力が最良の選択肢であるが、大型水力は既に開発し尽くされている。一方原子力については、その安全性が広く一般に理解されておれば、水力と同じく最良の選択肢となり得る。また一つの技術に過度に依存することは安全保障上好ましくないため、色々な発電方式をミックスすることが肝要である。

以上の観点から講師は、再稼働原発の安全性に絞り話を進めた。福島第一発電所事故の原因は津波対策の不備であり、事故の教訓として、①津波対策の強化、②炉心余熱の冷却能力担保の信頼性を最大限引き上げることである。それに対応するため、①最新の断層データと日本海海底探査の最新データをベースに想定最大地震と津波を見直し、それに大きな余裕を上乗せした地震と津波を評価した。その地震と津波に対して安全上耐え得るように必要な設備の新設・補強を実施した。②又余熱冷却能力の信頼性向上のため、非常用炉心冷却システムが多様化と多重化の思想で完備しているが、何らかの理由でこれらのシステムが作動しないと仮定しても、炉心余熱の冷却が可能という全く新しい発想で従来の視点と異なるシステムを設置した。

次に関西電力大飯3、4号機を例にとり、具体的に説明がなされた。

①評価した想定最大地震動は水平方向で700gal→856galに、上下方向で468gal→583galに引き上げこれに耐える補強をした。因みに福島第一発電所を襲った地震動の最大値は2号機で観測されており、水平550gal上下302galであったことから、大飯では如何に大きな地震を想定しているかが理解される。

②津波に対しては、海拔8.0mの防潮堤を新設した。

③余熱冷却能力信頼性向上のため、プラント建屋の外で且つ発電所敷地内の高所に可搬式或は移動式の電源、ポンプ、モーター等種々の設

国情にあわせた3E+S  
 ・「安定供給・安全保障」、「経済性」、「環境性」、「安全性」  
 ・各国の資源量、機構、産業構造、人口、送電線連系状況、政策的方向性により当然異なる。



出典:『日本のエネルギー政策を考える』講演会 竹内純子氏 講演資料

図3 エネルギー政策の基本 (3E+S)。

電力の特質:同時同量(消費電力量と発電電力量が常に一致)

1. 発電所は必要に応じて常に発電できる
2. 発電機出力が調整可能
3. 多様化・エネルギーミックス

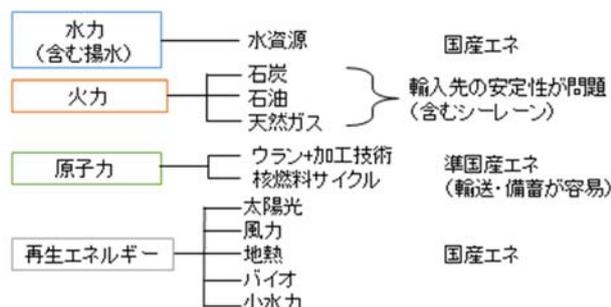


図4 電力の安定供給と安全保障

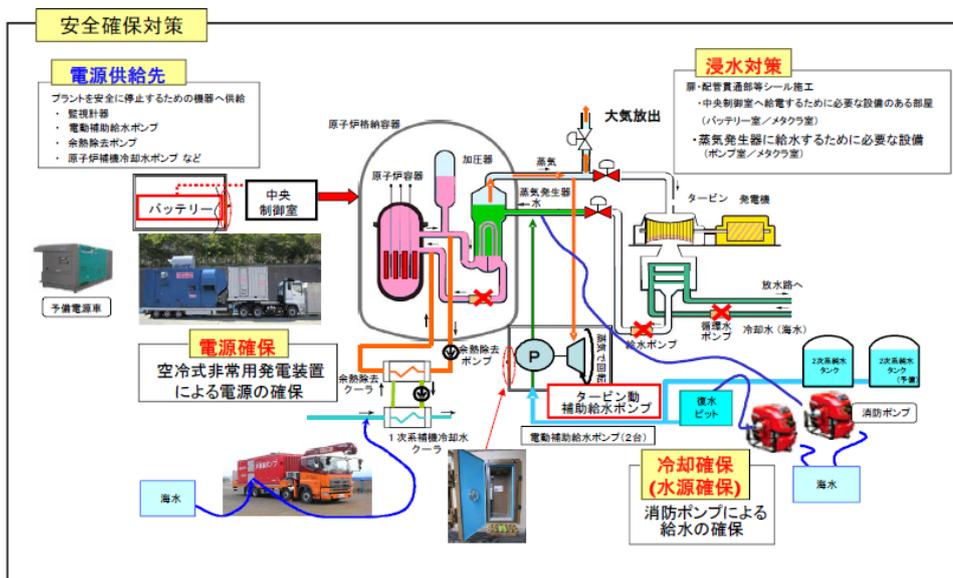


図5 大飯3、4号機の例。

備・機材を配置保管し、万一必要な場合にそれらの設備を予め保管してある電力ケーブルやホース等で接続し冷却を可能にするシステムを設置した（図5参照）

④更にプラントの内部溢水や万一防潮壁を超えて海水が来襲した場合に備え、配管貫通部からの浸水或は安全上重要な機器を設置している部屋への浸水を防止するため、貫通部のシール加工や水密性扉への変更を行った。

以上のハード対策に加えて、それを補完するソフト対策もとっている。発電所と外部との通信連絡機能の強化、発電所駐在員の増員、部分訓練と総合訓練による要員の事故対応力量の維持向上等、日々安全性向上の努力を続けている。

現時点では、客観的には国民の安全・安心の基準は満たされていると思われるが、安心の基準は各個人によって様々であり、難しい問題ではあると思う。

(大嶋隆一郎記)

#### 4. 未来のエネルギー源 核融合炉研究開発の現状と将来展望

自然科学研究機構 核融合科学研究所 副所長・教授 室賀健夫

核融合炉は、核分裂炉とは異なり、軽い原子核同士の融合反応によって生じるエネルギーを用いるシステムである。原理的に核暴走が無く、高レベル廃棄物を生じない、という安全上の優れた特徴を有する。長年の研究開発により、その実現は徐々に近づいてきているが、まだ多くの課題が残されている。本講演では、核融合炉に関する分かり易い解説がなされると共に、講師の専門である材料関係の課題を中心に現状と将来展望が概説された。

重水とトリチウムによる D-T 反応、プラズマ、そしてプラズマを閉じ込める方法について説明がなされた。現在フランスのカダラッシュで建設中の ITER に用いられているトカマク型、プラズマの性能はトカマク型に及ばないが長時間の運転が容易であり核融合科学研究所が推進しているヘリカル型、磁場を使わない慣性核融合型があり、それぞれの研究が行われている。

核融合炉でのエネルギーの取り出しは、中性子がブランケットに当たり熱エネルギーに変化するのを冷却材により行う。D-T 反応により生成した He プラズマも 20%のエネルギーを持つが、それはプラズマの自己加熱に使われる。トリチウムの生産はリチウムを用いて、 $n+{}^6\text{Li}\rightarrow\text{T}+\text{He}$  又は  $n+{}^7\text{Li}\rightarrow\text{T}+\text{He}+n$  反応により行う。D や Li は海水から回収可能なため、核融合炉が運転されれば燃料の心配は不要である。

ダイバータは磁力線のかごから漏れた荷電粒子を不純物ガスとして排気ポートに導くことにより、プラズマの純度を保つものである。核融合装置の中で最も高い熱負荷を受ける機器である。そのためにプラズマ対向面では低損耗・低プラズマ照射損傷性が、熱伝達媒体では高熱伝導率・高温強度が、冷却管では高強度（耐冷却材圧力）・冷却材に対する耐食性・低ガス透過性が要求される。

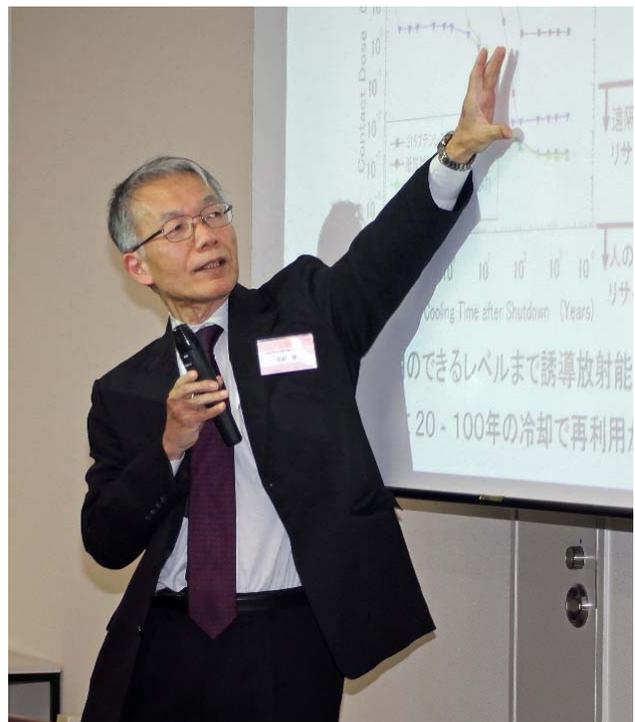


図1 講演中の室賀講師。

次に講師の専門である核融合炉における材料についての話になった。核融合材料における課題として、炉心プラズマに近いほど熱負荷、粒子負荷、中性子負荷が大きくなること。交換が経済性に直結するブランケット構造部材の開発が鍵であること。磁場閉じ込めではダイバータの材料・機器開発がもう一つのキーイシューであること。超伝導体、プラズマ計測機器等核融合炉特有の機能材料の照射も問題になることが挙げられた。

図3は原子力プラントの構造材料の使用条件の比較である。核融合炉が如何に過酷な条件下で使用されるかが分かる。発生する中性子が14MeVであるので、原子炉とは異なる高エネルギー中性子との核反応が起きる。例としてHeガスの生成の影響が説明された。図4は(n, α)反応で生成したHeが結晶粒界に偏析し、バブルを生成した電子顕微鏡写真である。このような状態では粒界破断が容易に起きることが頷ける。

材料の低放射化のためには元素に制限があり、Ni、Cu は主要構成元素にはできないとのこと。Mo、Nb、Ag、Al は ppm レベルでなければならない。現在の候補材としては、低放射化フェライト・マルテンサイト鋼 (RAFM)、F82H、EUROFER 等でCr-Mo 鋼のMoをWにNbをTa、V に置換したもの、及びバナジウム合金 V-4Cr-4Ti が第一候補で、SiC/SiC Composite 等も開発されている。これらの材料は他分野での利用も拡大中とのことである。

最後に核融合炉への道として、自己点火と長時間運転を目的とした ITER の重要性、材料開発として D-Li 反応を用いた中性子源である IFMIF (国際核融合材料照射施設) の概要、その工学設計、原型加速器の成果をベースに機能展開させた A-FNS 施設の紹介があった。

核融合の基本から現在の問題点まで説明され、非常に分かり易い話であった。質問としては、低温核融合についての見解を求めるもの、核融合動力炉の実現年代を尋ねるもの等、講師が答え難いものもあった。



図2 ヘリカル型プラズマ実験装置 (LHD) 運転中のプラズマ。

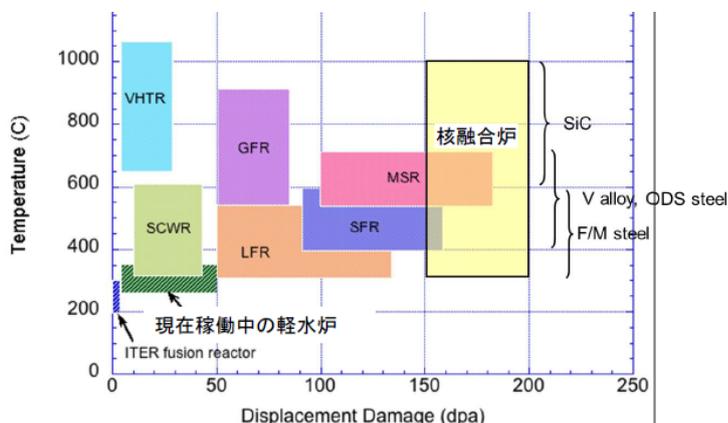


図3 各原子力プラントの構造材料の使用条件の比較。VHTR:高温ガス炉、SCWR:超臨界圧水炉、GFR:ガス冷却高速炉、LFR:鉛冷却高速炉、SFR:Na冷却高速炉、MSR:溶融塩冷却高速炉。

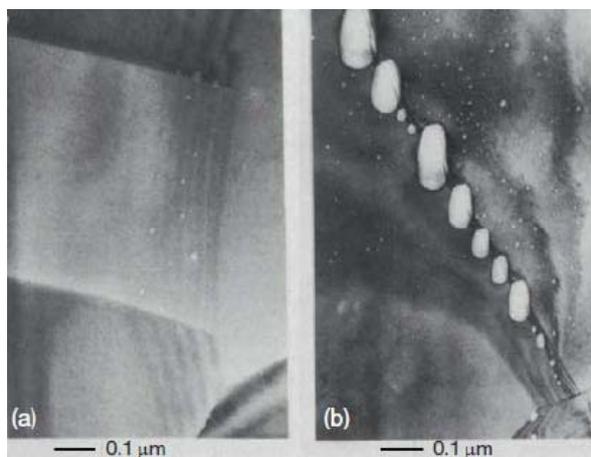


図4 ボイド発生に及ぼすヘリウムの影響。

(義家敏正記)

5. 教科書の原子力・放射線等関連記述に関する原子力学会の調査と提言

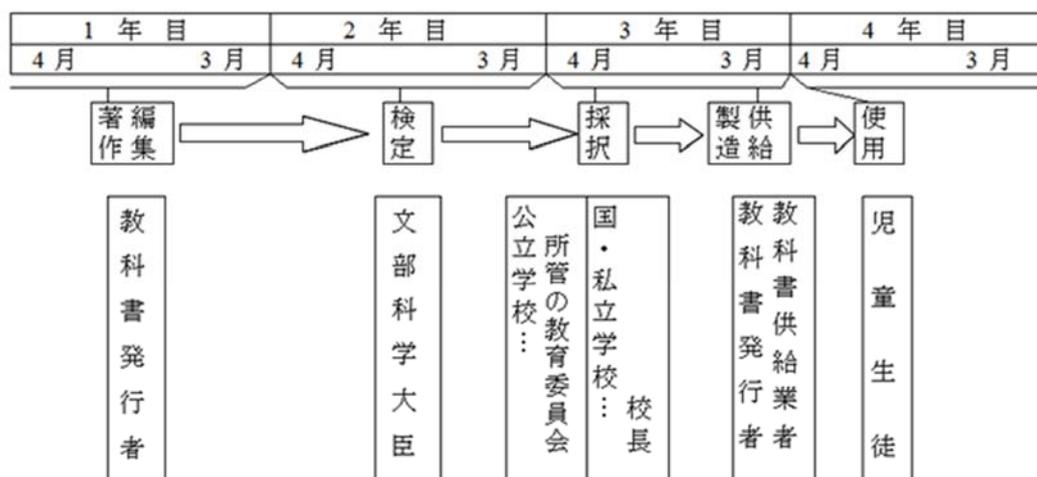
九州大学 名誉教授 工藤和彦

我が国の中学校教育の現場から放射線に関わる記述がなくなったのは第一次ゆとり教育が始まり、指導内容授業時間が削減された1980年からである。以来復活した2011年迄空白期間が実に30年ある。その間、多くの人々は原子力や放射線についての知識をテレビ・ラジオ・新聞等のマスメディアから得てきた。しかしながらメディアが流す情報は学術的に極めて曖昧のものが多く、教育を受ける機会の無かった人々は、それを咀嚼できない状況が長く続いたことになる。原子力学会では平成8年(1996年)から中学校・高等学校の理科、社会科の教科書におけるエネルギー・環境・原子力・放射線に関連した記述を調査するワーキンググループ(教科書調査WG)を発足させ、誤った記述や誤解を与えると思われる記述等の抽出を行い、調査結果とともに改善に係る提言書を作成して、文部科学省、教育界・学会、教科書会社に提出してきた。工藤講師はまず学校教育の場から放射線に係る記述が無くなった経緯を、文科省が各教科で教える内容を定めた学習指導要領の終戦後から現在に至る変遷について概観した後、教科書検定の仕組みについて詳細に説明した。その後、教科書調査WGが調査した中から、これまでに教科書に掲載されてきた誤った記述や誤解を招く表現等、教科書として不適切と考えられる箇所を例示した。



図1 講演中の工藤講師。

教科書の発行は編集の段階からおよそ4年を経て使用に至る。図2は文部科学省のホームページに掲載されている、教科書の編集から実際に使用に至るまでのプロセスを示したものである。即ち編集、検定、採択にそれぞれ1年程度を要し、使用開始は改定後4年となる。平成29年度に告示された学習指導要領の場合には、小学校で平成32年度、中学校では平成33年度、高等学校では平成34年度からの



(注) 製造・供給、使用の時期は、前期教科書の例をとった。

図2 教科書が使用されるまでの基本的な流れ(文部科学省ホームページより転載)。

使用となる。現在の文科省検定済み教科書の発行種類数は 958 種類、発行点数 1,286 点、需要冊数は約 10,615 万冊、民間の発行社数は 55 社とのことである（平成 26 年度）。民間発行社 55 社の内の 41 社は（一社）教科書協会に加盟している。

今回の調査は全て教科書協会に加盟している会社に対して行った。最近の教科書は筆者の小・中学校時代のものに比べてカラフルで写真や図、イラストが豊富で児童・生徒が親しみやすいように大変工夫されている。図 3 は中学校 3 年生用の理科の教科書（大日本図書）の表紙と目次を例として掲げた。新中学校学習指導要領の場合の放射線関連では、第二学年第二学期の「電流とその利用」の中で「真空放電と関連させて X 線にも触れるとともに、X 線と同じように透過性等の性質をもつ放射線が存在し、医療や製造業等で利用されていることにも触れる。」と記述されている。これは文科省のホームページにも掲出されているので、興味のある方はぜひご覧いただきたい。エネルギーについては第三学年第三学期の「科学技術と人間」(ア)エネルギーと物質、(イ)エネルギーとエネルギー資源の中に原子力の記述がなされている。高等学校の現行の理科においては「物理基礎」の中で、「エネルギーとその利用」の項があり、原子力や放射線に関してより詳細な内容を学習することになっている。「物理」では「電子、原子及び原子核に関する現象を観察、実験等を通して探究し、原子についての基本的な概念や原理・法則を理解させる。」とあり、原子と原子核に関して更に原子核の崩壊や核反応について学ぶようになっている。

エネルギーについては第三学年第三学期の「科学技術と人間」(ア)エネルギーと物質、(イ)エネルギーとエネルギー資源の中に原子力の記述がなされている。高等学校の現行の理科においては「物理基礎」の中で、「エネルギーとその利用」の項があり、原子力や放射線に関してより詳細な内容を学習することになっている。「物理」では「電子、原子及び原子核に関する現象を観察、実験等を通して探究し、原子についての基本的な概念や原理・法則を理解させる。」とあり、原子と原子核に関して更に原子核の崩壊や核反応について学ぶようになっている。

原子力学会では教科書を学校教育の主要な教材と位置づけ、より正確で適切な内容となることを目標に記述の正・誤や適切・不適切について調査することを目的として、1995 年（平成 7 年）から 20 年間にわたって、教育委員会の中に初等・中等教科書調査WGを置き調査した。その調査結果は「エネルギー関連記述に関する調査と提言」として報告書にまとめ、文科省・教科書協会・各教科書会社・マスメディア等に報告してきた（図 4）。最新の報告は“新学習指導要領に基づく高等学校教科書のエネルギー



図 3 新しい中学校 3 年生理科教科書の表紙と目次。

#### 4. 原子力学会の教科書調査について

##### (調査の目的)

教科書を学校教育の主要な教材と位置づけ、より正確で適切な内容となることを目標に記述の正・誤や適切・不適切について調査する

##### (調査体制)

学会の「教育委員会」の中に初等・中等教科書調査WGを置き、調査した。WGは、大学教官を主査として、初等・中等教育に関心を持つ学会員有志（14名）から構成

##### (調査期間)

1995年（平成7年）から20年間

##### (調査結果)

「エネルギー関連記述に関する調査と提言」として報告書にまとめ、文科省・教科書協会・各教科書会社・マスメディアなどに報告した。最新の報告：

“新学習指導要領に基づく高等学校教科書のエネルギー・環境・原子力・放射線関連記述に関する調査と提言—地理歴史科・公民科の調査—”（平成29年6月、日本原子力学会教育委員会）

- ・文科省・・・次官以下関係個所に報告し、教科書検定の参考として欲しい旨説明
- ・教科書協会・配布、説明
- ・各教科書会社・配布
- ・マスメディア・プレス関係者に配布 記者会見し質疑応答

図 4 原子力学会の教科書調査についての説明。

一・環境・原子力・放射線関連記述に関する調査と提言—地理歴史科・公民科の調査—“(平成 29 年 6 月、日本原子力学会教育委員会)である。まとめとして、新刊の教科書は、素材が増え記述が改良され、親しみやすいようにレイアウトも工夫され、エネルギー問題、環境問題、原子力の取り扱いについて格段に進歩しており、高く評価できるとしたが、これは原子力学会をはじめとする関係者の努力の賜物であろう。ただ、一部には主観的な意見や特定の主張も見え隠れして、教科書の記述として問題点も散見される。特に理科に比して社会科の教科書には、数字の引用等著者の先入観が入った不正確な記述が多いように感じた。最近の趨勢から言えば、少なくとも出版社は各教科書の編纂で引用した文献を掲出すべきだと感じた。

講演では多種・多様の問題点の指摘があり、全てを紹介しきれないが、筆者の印象に残ったものを下記に例示することとする。実教出版社の日本史 B では「2011 年 3 月 11 日東日本大震災と福島原発事故が発生した。死者・行方不明者は 1 万 9 千人をこえ・・・」とある。この文章では原発事故でも多数の死者が出たと読め、教科書の表現としては不正確の記述であることは明白である。

(大嶋隆一郎著)

## 6. 7 万枚の縞を数える — もっとも正確な地質学の時計 —

立命館大学 古気候学研究センター センター長・教授 中川毅

講師の話は簡単に言えば、過去 5 万年の時間を測るための世界標準「ものさし」を完成させたにことに尽きる。長さを計るものさしはあまりに一般的なものであるが、その信頼性は厳重に保管されている原器、或は物理量により担保されている。5 万年前から重要なのは、ホモサピエンスが 20 万年前にアフリカのある場所で発生し、5 万年前にアフリカから世界に拡散し始め、言語や被服もその頃に始まったと考えられていることによる。即ち、現代人の直接の祖先が 5 万年前に発生したので、その後の歴史が特に重要である。

放射性炭素 (C-14) は半減期が 5730 年で  $\beta$  崩壊する。C-14 による年代測定では、その C が有機物等の取り込まれた時の C-14 の濃度が必要である。放射性炭素の濃度が年代により大きく変動することが 1970 年代には分かっていた。例えば 11000 年前が 13000 年前、24000 年前が 30000 年前と誤差が大きく、放射線年代測定が疑われた時もあった。そのため、年代が分かったものとその C-14 濃度の関連が必要であ

った。木の年輪とそこに含まれている C-14 の量の測定で、ヨーロッパでは 12550 年前までは分かっていた。しかしそれ以前はヨーロッパは氷河期で、樹木の生長が遅くて測定できなかった。

水月湖は図 2 に示すように、三方五湖の中で No 2 の湖である。流れ込む川が無く、水は三方湖から入るのみである。湖底は酸欠状態のため、生き物はいない。底は安定した環境のためボーリングすると



図 1 講演中の中川講師。

掘り出した土は、図3のように黒っぽいところが春から秋のプランクトンの死骸、白っぽいところが冬に堆積する鉄分と黄砂である。45mで、7万年分が溜まっている。その間に植物が挟まっており、C-14の測定が可能である。このことは1991年に発見され、1993年より第一次水月湖プロジェクトが北川浩之博士（現名古屋大学教授）により



図2 左図：三方五湖の位置。右図：矢印は水月湖。手前は三方湖。

開始した。5 万年前までのデータを Nature に 1998 年 2 月に発表した。しかし米国ゴンラッド・ヒューエン博士が、ベネズエラの沿岸のプランクトンの C-14 濃度測定を行い、北川論文より 50 日早く発表していた。また他のデータとの不整合もあり、北川論文のデータは基準とはならなかった。特に地層サンプルの連続性、縞数えの信頼性に疑問が呈されていた。

講師は英国滞在中に第二次水月湖プロジェクトを申請し、採択された。目的は北川論文にある2つの疑念を晴らすことであった。連続性は複数の切削穴を掘ることにより解決した。まだ掘り出した土が膨張することも確認された。

漁港の冷蔵倉庫を借りて資料を保管した。その後縞を4年かけて数えた。蛍光X線装置も使われた。45000年で±84年の誤差だそうだ。これは1日2分41秒狂う時計を意味する。地質学が時計の精度で議論できるようになったことは画期的なことであった。

2年掛けて1000枚以上の葉っぱを45mの土の柱から採集し、その中で800例の年代測定を行った。1点5万円掛かったそうである。3回目の年代の標準の改定の会議がフランスのパリで2012年7月13日に開催され、水月湖のデータを標準とすることが決定した。即ち「日本の湖が地質時代のグリニッジ天文台になった」という言葉で講演は終了した。

講師は図1にあるようにセータ姿で現れた。「こんなに沢山のネクタイをした人の前で話すのは初めてだ、講師の属する地質学会はガラッパチが多いため、普通はこのような恰好で発表している」との言い訳から講演が始まった。しかし講演は非常に説得力があるもので、聴衆の多くが講師のグループの仕事に感銘を受けた。講師の本業は化石の研究であり、地層から出てきた資料の年代を正確に知るためにこのプロジェクトを行ったそうで、これから本業の研究が始まるとのことである。講師の今後の更なる活躍に期待したい。

(義家敏正記)



図3 年縞とそれに挟まっていた葉の例。

7. ビッグバン宇宙創生のインフレーション理論 — 観測的実証への期待 —

(独) 日本学術振興会 学術システム研究センター 所長 佐藤勝彦

佐藤講師は宇宙論におけるインフレーション理論の世界的権威者で、宇宙に関する相対論や量子論に関する多くの著作を發表されている。今回は前半にビッグバン宇宙論に関して平易に解説して頂き、後半では 2017 年度のノーベル物理学賞の対象となった、重力波の詳細をご講演頂いた。なお、宇宙の年齢を 137 億年とする説が多いが、佐藤講師によれば 138 億年とのことである。

ほんの 100 年程前まで、宇宙は未来永劫不変のものと考えられていた。アインシュタインもしかりである。常識を打ち破ったのは米国の天文学者ハッブルである。ハッブルは 1929 年に変光星の測定から銀河の赤方偏移を見出し、遠方の銀河程高速で遠ざかっていることから、宇宙は膨張しつつあることを発見した。この結果は時間を遡れば宇宙には始まりが存在することを示唆しており、後のビッグバン理論につながった。米国の天文学者のガモフは、日存在している全ての元素の生成機構を説明しようと 1948 年に「火の玉宇宙」(ビッグバン)のアイディアを發表し、5K の宇宙背景放射の存在を予測した。その後の研究ではビッグバンで生成される元素は水素、ヘリウム、リチウムまでであり、多くの元素は星の内部での核融合、超新星爆発、中性子星の作用によって形成されることが明らかとなった。ビッグバン理論は当時英国の大御所のホイル等による定常宇宙論に対して分が悪かったが、

1965 年に衛星通信の研究を行っていたベル研究所の研究者が、ノイズのなかから宇宙からの 3.5K のマイクロ波背景放射を発見したことによりその正しさが実証され、現在では宇宙の始まりの標準モデルとされている。しかしながら、①どうして火の玉で始まるのか、②現在観測される星や銀河、あるいは蜂の巣構造の銀河の群れのような宇宙構造がいかなる機構で形成されたのかという疑問が残った。これを説明するためにアインシュタインの相対論と素粒子理論を組み合わせるのがインフレーション理論である。それによれば、 $10^{-34}$  s とい短時間で真空の



図 1 講演中の佐藤講師。

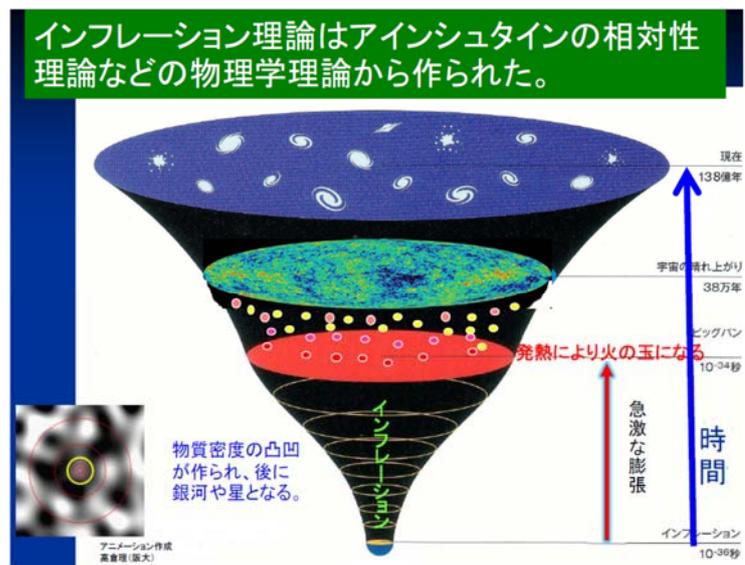


図 2 インフレーションとビッグバンの関係

宇宙は一次相転移を起こし、その際に放出された潜熱によって宇宙は火の玉となる（図2）。つまり、インフレーション理論とは「火の玉宇宙を創生し、星、銀河、銀河団の種を作る理論」である。即ち、

- 1) 素粒子のように小さい誕生直後の宇宙は加速的急膨張を始めた。
- 2) 急膨張が終わる時、熱エネルギーが生まれ宇宙は火の玉となり、光や物質が生まれた。
- 3) 急膨張の時に生成された物質エネルギーの凸凹は次第に成長し、星、銀河や銀河団等の宇宙構造が作られた。

その理論を確認することが出来るかという問いに対して、我々は宇宙開闢 138 億年の現在に在りながら、インフレーションの瞬間を見る技術を有していると答えることが出来る。その様子を示したのが図3である。地表からのみならず、1990年代より次々に打ち上げられた宇宙観測衛星によって、多くのインフレーション理論を裏付けるデータが得られた。量子揺らぎが  $10^{-5}$  程度でも宇宙膨張の過程で、今日観測されている宇宙構造が形成されることが、計算機シミュレーションの結果からも明らかになっている。

ところが、これらの結果は火の玉時代のプラズマ状態から温度の低下に伴って電子が原子核に捕獲されて光が電子に邪魔されなくなった 38 万年以降であり、当然インフレーション時代を直接観測したいという考えに到る。インフレーション理論では時空のゆらぎによって重力波が発生することが示されており、プラズマ状態は重力波にとっては透明なので、138 億年の彼方から到着する重力波が直接捉えられれば良い。重力波は時空自体が波立ちながら光速で伝播するが、その存在は確認されていなかった。

2016年2月に実験的に重力波が確認されたと報じられ、2017年のノーベル賞受賞となった。それは米国のおよそ 3000 km 離れた

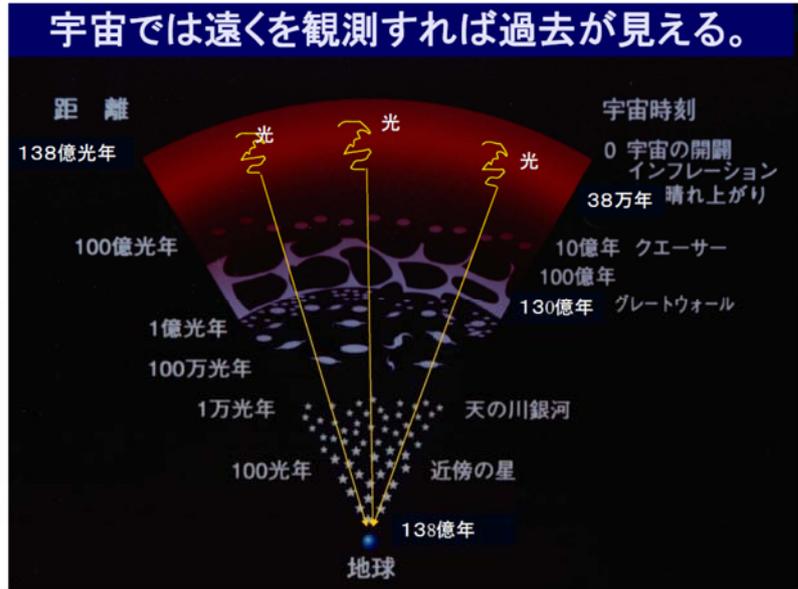


図3 宇宙の始まりを観測する。

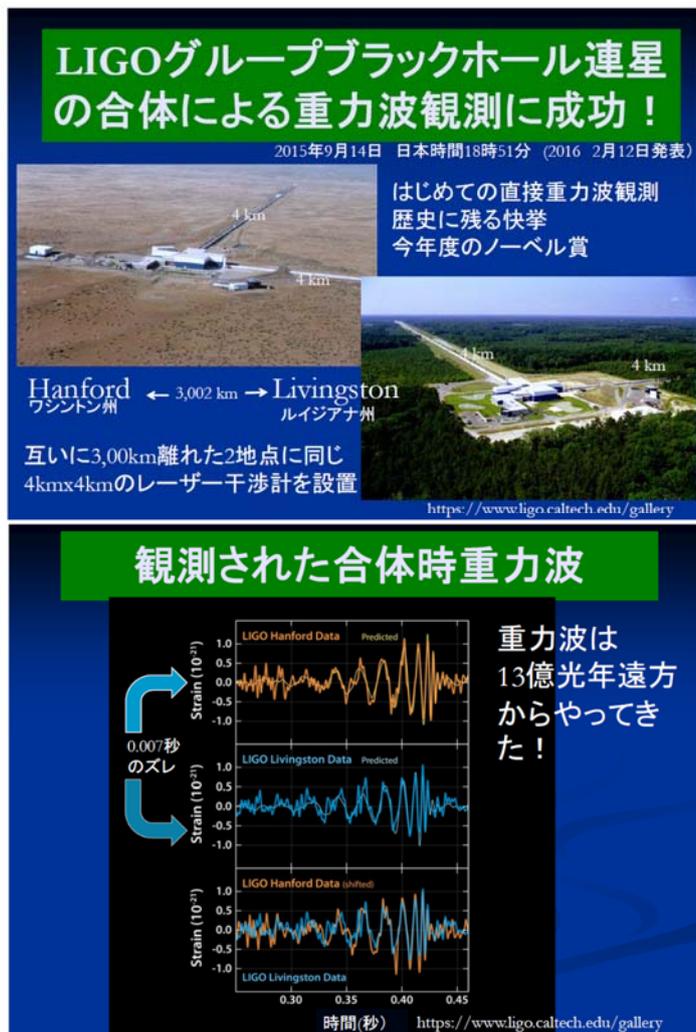


図4 重力波を初めて観測した研究施設と捉えられた波形。

Hanford(WA)とLivingston(LA)に設置されたレーザー干渉計が捉えた、13億光年のブラックホール連星の合体で発生した重力波であった(図4)。二つの波は二点間の光速到達時間の差に相当する0.007sのずれだけでぴったりと重なり、波形は大きさが $36M_{\odot}$ ( $M_{\odot}$ は太陽質量)のブラックホールと $29M_{\odot}$ のブラックホールが合体し $62M_{\odot}$ のブラックホールが作られ、欠損分 $3M_{\odot}$ が宇宙空間に重力波として放出されたという計算機シミュレーションの結果と一致した。

その後、ブラックホール同士の合体に伴う重力波は4件報告されている。日本でもカミオカンデ近傍に大型冷却重力波望遠鏡を建設してテスト観測が始まっている。しかしながら従来の施設のサイズでは到底ビッグバンの原始重力波を観測出来る性能は出ないため、宇宙空間に超大型施設を建設する日本の人工衛星計画DECIGOがスタートしており、2030年代の打ち上げを目指している。

講演の締めくくりとして、次々と新しい宇宙開闢に関する知見が蓄積される一方で、暗黒物質、暗黒エネルギー問題等現在の宇宙を構成する主要な物質の正体が依然として不明であることを指摘された。結論は「“無”からの宇宙創生」は未完の理論であるとのことである。

筆者も佐藤講師の著作をこれまで何冊か読まさせていただいた。今回のご講演はスライドも綺麗で一部難解な箇所もあったが、大変楽しく聴講出来た。

追補：宇宙論に多大の功績のあった巨星ホーキング博士の訃報が届いた。長年、病気と闘いながら、斬新なアイデアを世の中に発信し続けられた偉大な博士のご冥福を祈ります。

(大嶋隆一郎記)

閉会挨拶は大阪府立大学 谷口良一教授によりなされた。シンポジウム参加者は82名であった。シンポジウム終了後9階のサロンに会場を移し、講師の先生方にも参加していただき、会員・参与間の懇親を高めるために交流会が開催された。参加者は41名であった。



図1 交流会、会長の挨拶。

## 平成 29 年度 ONSA 奨励賞（小林正和氏）受賞内容の紹介

金沢大学 小林氏は ONSA 奨励賞を受賞し、本来ならば平成 30 年 1 月 22 日のシンポジウムにて講演の予定であったが、大学での業務のため不可能であった。また現在長期外国出張中で、今年度の研究会やシンポジウムでの講演もできないため、それに代えて本稿を寄稿していただいた。

### 静注用放射性酸素-15 と持続注入法を組み合わせたラットの脳循環代謝測定法の開発

国立大学法人 金沢大学 医薬保健研究域附属健康増進科学センター 助教 小林正和

#### 1. はじめに

様々な脳疾患の診断に用いられる放射性同位元素（RI）を利用した脳循環代謝測定は、放射性  $^{15}\text{O}$  標識ガス等を用いたポジトロン CT（PET）検査で臨床使用されている。本法の歴史は半世紀近くになり、1970 年に、米国ワシントン大学の Ter-Pogossian らが、 $^{15}\text{O}$  標識酸素 ( $^{15}\text{O}_2$ ) をヘモグロビン（赤血球）に結合させ、動脈内投与する方法により世界で初めて脳局所の酸素代謝がヒトで測定可能となった[1]。彼らが開発した方法では、患者本人からの採血により血液を採取し、 $^{15}\text{O}_2$  ガスの単純なバブリングにより 37 MBq/mL の標識効率が得られたと報告されている。同時に  $\text{H}_2^{15}\text{O}$ 、 $\text{C}^{15}\text{O}$  を用いた測定も行われており、ほぼ現在の  $^{15}\text{O}$  ガス PET による脳循環代謝検査と同様の RI 検査が行われていた[1-4]。その後、1970 年代中盤から、酸素代謝測定は  $^{15}\text{O}_2$ 、 $\text{C}^{15}\text{O}_2$  を一定濃度の希ガスとして吸入させる定常法が主流となり[5]、赤血球に  $^{15}\text{O}_2$  ガスを標識して血管内投与する Ter-Pogossian らの手法は用いられなくなった。1980 年には Frackowiak らが、ガス定常吸入法による脳血流酸素代謝定量法の基礎を完成させ[6]、その後更に様々な補正法が加えられ、現在本邦で最も一般的かつ信頼性の高い PET を用いた脳循環代謝測定法が確立された。しかし、患者の呼吸状態に測定結果が影響され、PET 管理区域での非密封 RI の取り扱い規制等による放射性ガスの厳しい使用制限等様々な理由により、脳酸素代謝測定を実施する施設は年々減少している。臨床上  $^{15}\text{O}$  ガス PET 検査の有用性は十分に認識されており、更なる  $^{15}\text{O}$  ガス PET 検査の普及のためには、放射性薬剤合成や画像解析等の簡便化かつ取り扱いが容易な放射性薬剤による検査法の開発が望まれている。また、この測定法を実験動物に適用する場合には、動物の呼吸状態や、気道に存在する高放射能  $^{15}\text{O}$  ガスにより測定結果が影響される等の問題があり、脳血管障害の病態解明に関する基礎研究が妨げられていた。我々は、これらの問題を解決するために静注用  $^{15}\text{O}$  標識人工赤血球を開発した。この薬剤の注入法には、1 回注入法と持続注入法があり、我々は動物の生理状態を変化しない持続注入法を選択したが、従来の持続注入法では小動物に対する薬剤注入液量が多くなるという問題が考えられたため、液量を少なくする小動物用持続注入法を新たに考案した。本研究では、 $^{15}\text{O}$  ガス標識人工赤血球と動物用持続注入法を組み合わせることで、小動物を用いる基礎研究に適した脳循環代謝測定法を確立した。

#### 2. 方法と結果

##### 2-1. $^{15}\text{O}$ ガス標識に用いた人工赤血球

PET を用いた脳循環代謝測定法は、① $^{15}\text{O}$  標識一酸化炭素 ( $\text{C}^{15}\text{O}$ ) ガス、② $^{15}\text{O}$  標識二酸化炭素 ( $\text{C}^{15}\text{O}_2$ ) ガス又は  $^{15}\text{O}$  標識水 ( $\text{H}_2^{15}\text{O}$ )、③ $^{15}\text{O}_2$  ガスの 3 種類の各  $^{15}\text{O}$  標識薬剤投与後の動脈血中放射能と、脳画像上の局

所放射能の測定値を組み合わせることにより、脳循環代謝を正確に定量化できる。前述したように、 $C^{15}O$  ガスと  $^{15}O_2$  ガスの取り扱いが薬剤合成者及び医療従事者や動物実験者において煩雑なために、薬剤合成が簡便かつ取り扱いが容易な注射剤となる  $^{15}O$  ガス標識法を考案した。さらに、ヒトの脳酸素代謝率測定への臨床応用も考慮に入れ、人工赤血球を用いた静注用  $^{15}O$  標識ヘモグロビン含有リポソーム粒子 (hemoglobin-containing liposome vesicles; HbV) を開発した[7]。

この人工酸素運搬体として、ヘモグロビン重合体が既に市販されており、本研究に従事していた当時は、米国 OPK Biotech 社が動物用医薬品として Oxyglobin®、ヒト用酸素運搬製剤として Hemopure® を製造販売していた。いずれもウシ (bovine) の赤血球から作られた製剤であり、BSE 問題のため輸入等に関しては極めて制限が厳しい。国内での人工酸素運搬体開発はテルモ社、早稲田と慶應義塾大学の共同研究グループが行っており、輸血用あるいは脳梗塞時等の臨床治療薬としての利用が検討されている。しかし、いずれも一般臨床使用には至っておらず研究開発段階である [8-10]。我々は後者が開発した HbV を用いて [11]、 $^{15}O$  ガス標識 HbV による脳循環代謝測定への応用を試みた。HbV は直径 250-280 nm のリポソーム内にヒト・ヘモグロビンが充満された製剤で、ヒト赤血球と比較すると極めて小さい (図 1)。

## 2.2 $^{15}O$ 標識 HbV の合成法

脳循環代謝測定に用いられている  $^{15}O$  ガスとして、 $C^{15}O_2$  ガス、 $^{15}O_2$  ガスと、 $C^{15}O$  ガスの 3 種類存在するが、 $C^{15}O_2$  ガスは注射剤の  $H_2^{15}O$  により代替されるため、 $^{15}O_2$  ガスと  $C^{15}O$  ガスの注射剤化を試みた。特に、 $^{15}O_2$  は脳局所酸素代謝測定のために非常に重要であ

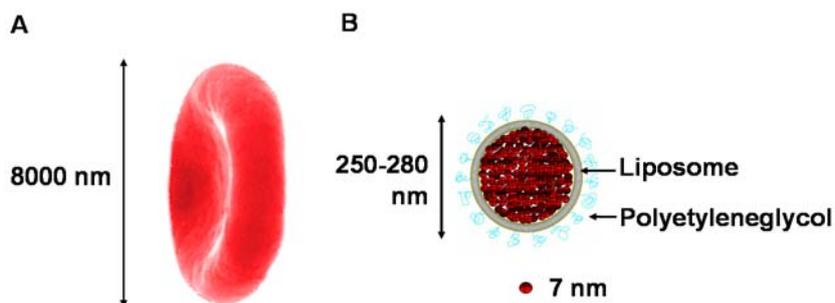


図 1 ヒト赤血球(A)と人工赤血球 HbV(B)の形状及びサイズ。

り、高い標識率と放射性濃度を必要とした。我々は当初、Ter-Pogossian らがヒト赤血球を用いて行った単純なバブリング法を用いて、 $^{15}O_2$  ガスと HbV の標識を試みた結果、40 MBq/mL 程度の標識率であった。ヒトの臨床 PET 検査に利用可能となる標識率を考慮に入れると 140 MBq/mL 程度の標識率が必要であったため、単純なバブリング法を用いた  $^{15}O$  ガス標識より、標識率を 3 倍以上向上させる必要があった。この問題を解決する方法として、HbV を封入したバイアル内に還元剤である L-cysteine を加えて前処置することと、バブリングの際にヒトの手で攪拌するのではなく、ボルテックス・ミキサーを使って攪拌することにした [7]。  $^{15}O$  ガス

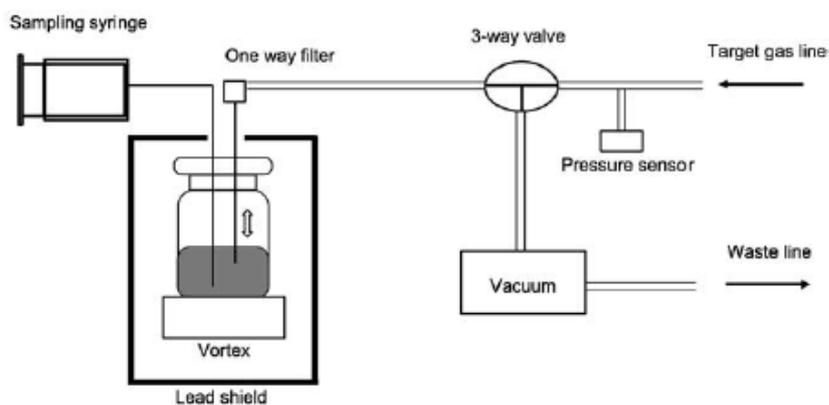


図 2  $^{15}O$  標識 HbV の合成法の概観図。

標識の前日に約 3 mM の L-cysteine をバイアル内に加えておき、標識当日には  $^{15}\text{O}_2$  と HbV をボルテックス・ミキサーで攪拌しながらバブリングすることで、約 200 MBq/mL の標識率を有する  $^{15}\text{O}_2$  標識 HbV ( $^{15}\text{O}_2$ -HbV) が得られた。その結果、 $^{15}\text{O}$  の約 2 分の半減期や自動投与装置へのセットアップ時間等を考慮しても、臨床 PET 検査も行えるに十分な標識率と放射性濃度が得られることに成功した。また、 $\text{C}^{15}\text{O}$  標識 HbV ( $\text{C}^{15}\text{O}$ -HbV) も同様な方法で、必要な放射性濃度を得た。

### 2.3 $^{15}\text{O}_2$ -HbV を用いた小動物用持続注入法

$^{15}\text{O}$  標識薬剤を生体内に注入する手法として、1 回注入法と持続注入法があり、前者の場合は、各  $^{15}\text{O}$  標識薬剤の撮像中に、1 匹の動物から放射能を測定可能な量の動脈血を頻回に採取する必要があり、動物の生理状態を変化させる恐れがあるとともに画像解析法も複雑であるため、数回の動脈採血で測定可能であり、画像解析も簡単な後者の持続注入法を選択した。しかし、従来の持続注入法では動物に対する薬剤注入量が多くなる問題が考えられたため、注入量を少なくする小動物用持続注入法を新たに考案した(図 3)。この注入プログラムを実現するために、多段階に超低速から超高速まで可変可能なシリンジポンプを必要としたため、実験用機器メーカーのメルクエスト社と共同開発した。

$^{15}\text{O}_2$ -HbV の持続注入プログラム(図 3)において、①は、シリンジポンプから動物の尾静脈までをつなぐカテーテル内の dead volume 補正用プログラム部である。②は、動物体内で画像化に必要な最低限の放射能 20 MBq に達する  $^{15}\text{O}_2$ -HbV の一回注入プログラム部である。③は、動物に投与された 20 MBq という放射能を体内で一定にするために、 $^{15}\text{O}$  の放射能減衰に伴って  $^{15}\text{O}_2$ -HbV の薬剤注入量を増加させるプログラム部であり、曲線の方程式は  $v = 117 \cdot \exp(\gamma \cdot t \cdot 10^{-2})$  となった。このプログラムを用いて、小

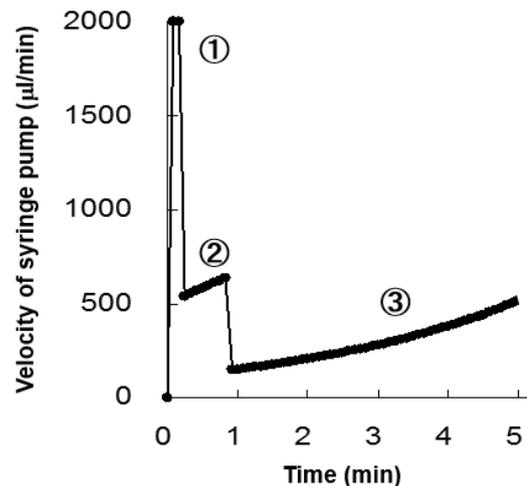


図 3  $^{15}\text{O}_2$ -HbV の持続注入プログラム。

動物に  $^{15}\text{O}_2$ -HbV を注入する前に、シリンジポンプ上に配置したシリンジとドーズメータをカテーテルでつなぎ、このプログラムの動作確認を行った結果、シリンジポンプ稼働 1 分で放射能が 20 MBq に達し、6 分まで定常状態を維持した(日本国特許、PET 薬剤送出装置およびその作動方法、特許第 5360466 号)。

### 2.4 $^{15}\text{O}_2$ -HbV の持続注入を用いたラット脳酸素代謝測定法

我々が開発した  $^{15}\text{O}_2$ -HbV と小動物用持続注入法を組み合わせることで、ラットにおける脳循環代謝測定を行った。正常ラットと脳梗塞モデルラット各々 10 匹を使用して、静注用  $\text{C}^{15}\text{O}$ -HbV、 $\text{H}_2^{15}\text{O}$ 、静注用  $^{15}\text{O}_2$ -HbV の順番でラットに注入し、浜松ホトニクス社製小動物用陽電子断層撮像装置 SHR-41000 を用いて撮像した。 $\text{H}_2^{15}\text{O}$  と  $^{15}\text{O}_2$ -HbV の注入には、シリンジポンプを用いた小動物用持続注入法(図 3)を使用し、各撮像中に、数回の動脈採血により血漿中放射能を測定した。また、それらの撮像中に動脈血中ガス濃度値を測定した。全脳および局所脳領域の画像上の集積放射能を得た後、従来から確立されている持続注入法による公式[6, 12]に各測定値を代入し、全脳及び局所脳領域の脳循環代謝測定値を算出した。

小動物持続注入法の有用性は、正常ラットに  $H_2^{15}O$  あるいは静注用  $^{15}O_2$ -HbV 注入後、血漿内放射能と脳画像上の放射能濃度を測定し、両者とも定常状態に達していることを確認することで判断できる。本研究では、注入 1 分後に血漿内放射能が約 150 kBq/mL で定常状態となり、注入 2 分後に全脳放射能濃度が約 130 kBq/mL で定常状態に達した。また、正常ラットに各  $^{15}O$  標識薬剤を投与した脳画像は非常に鮮明であった(図 4)。その全脳の脳循環代謝測定値は、脳血流量 CBF が  $54.3 \pm 2.0$  (mL/100 g/min)、酸素代謝率 OEF が  $0.56 \pm 0.04$ 、脳酸素消費量  $CMRO_2$  が  $6.2 \pm 0.4$  (mL/100 g/min)、脳血液量 CBV が  $4.9 \pm 0.4$  (mL/100 g) となり、バラツキが少なく安定した結果が得られ、報告されていたラット脳血流代謝測定結果とほぼ一致していた。また、左脳の脳梗塞モデルラットに関しても、鮮明な画像が得られ(図 5)、梗塞領域の各測定値は正常領域と比べて著しく低下した。さらに、前頭皮質、感覚運動皮質、線条体及び視床等の局所脳領域の測定値も脳循環代謝評価に十分な精度で得られた。

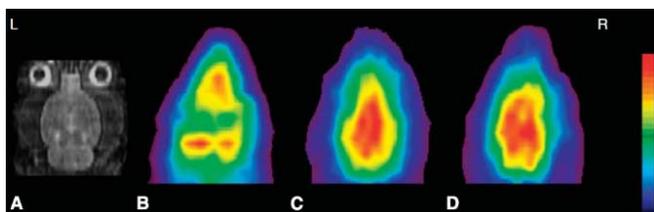


図 4 正常ラットの MRI (A)、 $C^{15}O$ -HbV (B)、 $H_2^{15}O$  (C) と  $^{15}O_2$ -HbV (D) の画像。

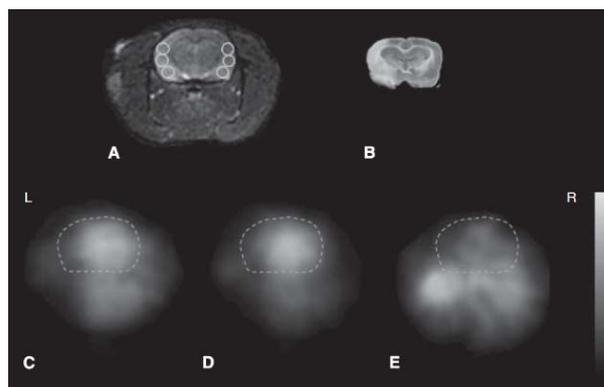


図 5 脳梗塞モデルラットの MRI (A)、TTC 染色 (B)、 $H_2^{15}O$  (C)、 $^{15}O_2$ -HbV (D) と  $C^{15}O$ -HbV (E) の画像。

### 3. まとめと今後の展望

現在の PET 検査の主流は、 $2-[^{18}F]$ fluoro-2-deoxy-D-glucose ( $^{18}F$ -FDG) を用いた腫瘍診断であるが、 $^{15}O$  薬剤を用いた PET による脳循環代謝測定法という非常に古典的かつ重要な手法において、我々は  $^{15}O_2$ -HbV と動物用持続注入法を組み合わせた脳循環代謝測定法を開発した。この方法は、低侵襲かつ簡便に小動物の酸素代謝率や脳酸素消費量を安定して得られる有用な手法であり、脳研究の更なる発展に寄与する。また、無菌環境下で簡便に高比放射能での  $^{15}O_2$ -HbV や  $C^{15}O$ -HbV が標識・合成できれば、ヒトの臨床 PET 検査に十分応用が可能となり、一般 PET 施設での普及が見込まれる。また、虚血性疾患では梗塞を含む病変部における血管径の変化が予想され、図 1 に示した生体内の赤血球と HbV とのサイズの違いが、 $^{15}O_2$ -HbV を用いた PET による脳酸素代謝画像に反映されるのであれば、より微小な末梢血管が支配する脳領域の情報を取得できる可能性があるため、今後の脳虚血性疾患の基礎研究において、非常に興味深い測定法に成り得ると期待される。

### 参考文献

- [1] M.M. Ter-Pogossian MM, J.O. Eichling, D.O. Davis, M.J. Welch, J. Clin. Invest. 49 (1970) 381-391.
- [2] M.J. Welch, M.M. Ter-Pogossian, Radiat. Res. 36 (1968) 580-587.
- [3] M.M. Ter-Pogossian, J.O. Eichling, D.O. Davis, M.J. Welch, J.M. Metzger, Radiology 93 (1969) 31-40.

- [4] C.C Carter, J.O. Eichling, D.O. Davis, M.M. Ter-Pogossian, *Neurology* 22 (1972) 755-762.
- [5] M.E. Raichle, R.L. Grubb RL Jr, J.O. Eichling, M.M. Ter-Pogossian MM, *J. Appl. Physiol.* 40 (1976) 638-640.
- [6] R.S. Frackowiak, G.L. Lenzi, T. Jones, J.D. Heather, *J. Comput. Assist. Tomogr.* 4 (1980) 727-736.
- [7] V.N. Tiwari, Y. Kiyono, M. Kobayashi, T. Mori, T. Kudo, H. Okazawa, Y. Fujibayashi, *Nucl. Med. Biol.* 37 (2010) 77-83.
- [8] A.T. Kawaguchi, D. Fukumoto, M. Haida, Y. Ogata, M. Yamano, H. Tsukada, *Stroke* 38 (2007) 1626-1632.
- [9] H. Komatsu, T. Furuya, N. Sato, K. Ohta, A. Matsuura, T. Ohmura, S. Takagi, M. Matsuura, M. Yamashita, M. Itoda, J. Itoh, H. Horinouchi, K. Kobayashi. *Neurosci. Lett.* 421 (2007) 121-125.
- [10] A.T. Kawaguchi, M. Haida, M. Yamano, D. Fukumoto, Y. Ogata, H. Tsukada. *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 332 (2010) 429-436.
- [11] H. Sakai, H. Horinouchi, Y. Masada, S. Takeoka, E. Ikeda, M. Takaori, K. Kobayashi, E. Tsuchida. *Biomaterials* 25 (2004) 4317-4325.
- [12] A.A. Lammertsma, T. Jones. *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 3 (1983) 416-424.

### (一社) 大阪ニュークリアサイエンス協会の主な事業について

ONSAは現在様々な分野で役立っている放射線利用技術に関する、より現場的な情報交換と大阪府立大学地域連携研究機構・放射線研究センターに設置されている放射線施設の産業界への有効利用促進を二つの柱とし、加えて放射線科学についての一般社会への知識普及を目的として下記の活動を行っています。

**1. 情報交換の場としての研究会等：①放射線科学研究会（年3回程度）**

②UV/E B研究会（年3回程度）

③放射線利用総合シンポジウム（年1回）

④見学会（年2回程度）

その他、放射線研究センターの研究分野に関わりの深いテーマの研究会を随時企画しています。

**2. 利用推進の対象とする放射線施設：総計約4PBq（～10万キュリー）のコバルト60ガンマ線源、エネルギーが4～15MeVおよび500keVの2種の電子線加速器。当協会では、ガンマ線照射とそれにかかわる業務のほか、共同研究等の斡旋や仲介ならびに広報活動を行っています。**

**3. 委託調査・研究などの受け入れ。受託実績：日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）、核燃料サイクル開発機構（現日本原子力研究開発機構）、宇宙開発事業団（現宇宙航空研究開発機構）、非破壊検査㈱等。**

**4. 「みんなのくらしと放射線」知識普及実行委員会委員：委員会は大阪府立大学に事務局において「みんなのくらしと放射線」展（年1回）を行っています。ONSAは構成団体の一員として活動しています。**

**5. 大阪ニュークリアサイエンス協会賞（ONSA賞、ONSA奨励賞）の贈呈：放射線及び放射性同位元素に関わる優れた研究に対しONSA賞、ONSA奨励賞を贈ります。**

**6. 技術相談：放射線量測定、核種同定、放射線照射などの相談受付と実施機関のご紹介を致します。**