

第27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31年1月21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、平野俊夫（量子科学技術研究開発機構）、宮本修治（兵庫県立大学）、永嶺謙忠（高エネルギー加速器研究機構）、上出英樹（日本原子力研究開発機構）、鈴木雅秀（長岡技術科学大学）、松崎浩之（東京大学）、中嶋英雄（若狭湾エネルギー研究センター）の7氏を迎えて盛大に開催された。

講演開始に先立って、大阪ニュークリアサイエンス協会東副会長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のあと、ONSAの研究会、見学会などの事業の紹介、今回のシンポジウムの内容に関する概略説明があった。

座長は、午前の講演2件を児玉靖司教授（大阪府立大学）が、午後の最初の講演2件を山本孝夫教授（大阪大学）が、そして最後の講演3件を岩瀬彰宏 ONSA 専務理事が担当した。シンポジウムの参加者は計85名であった。



開会の挨拶（東副会長）。

1. がん死ゼロ健康長寿社会実現に向けて ～量研の戦略～

量子科学技術研究開発機構 理事長 平野俊夫

平野俊夫先生は、11年前のご自身のがん体験から講演を始められた。人間ドックで肺がんが見つかり、左の肺を60%切除されたとのこと。入院・リハビリにおよそ3ヶ月を要したことを紹介された。現在ならば、同じ肺がんを重粒子線で治療することができ、その場合には働きながら治療が可能で、リハビリも不要であり、手術の場合とほぼ同等の5年生存率になるとのことである。量子科学技術研究開発機構（量研/QST）は、「がん死ゼロ健康長寿社会プロジェクト」を、将来に向けてのプロジェクトの柱の1つと位置づけ、強力に押し進めていく方針とのことである。

QSTとは、放射線医学総合研究所（放医研）と日本原子力研究開発機構の量子ビーム部門と核融合部門が再編統合されて、2016年に発足した国立研究開発法人を指す。QSTは、最新技術を結集した小型で高性能な次世代重粒子線がん治療装置を「量子メス」として開発に取り組んでいるとのことである。そもそも、炭素イオンを加速する重粒子線がん治療装置（HIMAC）は、放医研が1993年に世界に先駆けて開発に成功したものである。その後の25年間に、10,000人を超え



図1 講演中の平野講師。

る患者を治療してきた実績がある。最初は、治療困難な患者が多かったために、担当職員の方々は苦労されたが、次第に治療困難ながんが治るケースが増え、重粒子線治療の評価が上がってきたとのことである。最近では、我が国には6つの重粒子線治療施設が稼働しており、現在7つ目が建設中である。治療対象のがんの種類も増え、現在は、前立腺、骨・軟部、頭頸部、肺、すい臓、肝臓などが対象になっている。

重粒子線治療には特徴が2つあり、1つは他の治療では治療困難ながんにも有効性を示す点にある。例えば、手術のできない頭頸部がんや骨軟部肉腫に有効であることが5年生存率で示されている。もう1つは、重粒子線治療は、X線治療に比べると治療回数が少ない点であり、患者の負担が少なくなる点で優れている。重粒子線ががん治療に適している理由も2つ挙げられる。1つは、Braggピークの特性を活かしたがん組織への線量集中性の良さである。それにより、正常組織への影響を最小限に抑えてがん組織を狙い撃ちすることが可能となった。2つ目は、高LET放射線であるため、放射線抵抗性を示す低酸素細胞の殺傷効果も高く、X線や陽子線に比べて2~3倍高い生物学的効果（高RBE）を示すことである。さて、放射線治療は外部照射だけではなく、放射性同位元素を用いた標的アイソトープ治療も注目を集めている。特にα放出核種を、がんを標的とする抗体やがんに集まりやすい物質と組み合わせると、正常組織への影響を限定的に抑えて、がん組織に放射線エネルギーを集中させ、高い殺傷効果が期待される。さらに転移がんを追いかけてα線照射することもできる。先の重粒子線治療と組み合わせれば、切らずに治すがん治療が可能になる。以上のように、QSTが推し進める「がん死ゼロ健康長寿社会プロジェクト」が目指すのは、重粒子線でがん原発巣を治療し、転移巣は標的アイソトープ治療や分子標的薬で治療し、必要に応じて免疫治療を組み合わせるというものである。現在、がん治療は、外科手術、化学療法、放射線療法、免疫療法等が主要な治療法であるが、平野先生は、将来的には、放射線と免疫が主要ながん治療法を担うことになるだろうと言われたことが大変印象的であった。

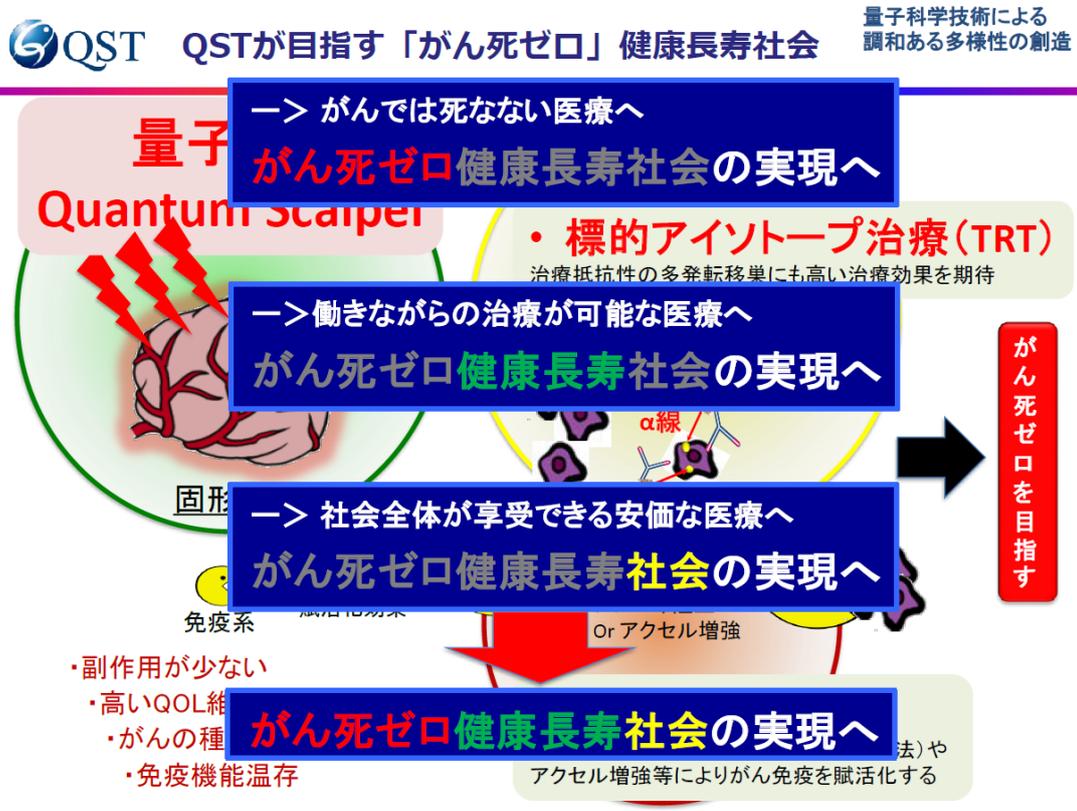


図2 量研機構が目指す「がん死ゼロ」健康長寿命社会プロジェクト。

(児玉靖司 記)

2. [ONSA賞受賞記念講演] 新しいガンマ線ビームを使った光核反応計測と核変換

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 教授 宮本修治

講師の宮本教授は平成29年度の大阪ニュークリアサイエンス協会賞受賞者である。ガンマ線はもともと原子核から放出される放射線を指し、核外電子が関与するエックス線とは区別されているが、ここでは高エネルギーの光子の意味で使用している。20世紀初頭のガンマ線の発見以来、科学技術の様々な分野で放射性同位体の壊変時に放射されるガンマ線が広く利用されてきた。国際原子力機関(IAEA)からは核種毎のガンマ線のエネルギーのデータベースが公開されており、目的によって最適な線源が選択出来る。しかしながらこれらの線源は(1) 同位体の寿命があり、核種によっては入手が困難、(2) ガンマ線は常に放射されているため、遮蔽が必要、(3) 8MeVを超えるガンマ線源が無い などの難点があり、エックス線とは異なる実用上の困難を伴う。高エネルギーのガンマ線源を得るには高エネルギー電子を標



図1 講演中の宮本講師。

的に衝突させて減速し、その際に発生する制動輻射ガンマ線を使用する手法があるが、この方法ではスペクトルの中が広く単色のガンマ線を得ることが難しい。それに対してレーザーコンプトン散乱(以下LCS)ガンマ線は相対論的エネルギーの電子線とレーザー光を衝突させて生成され、可視光のレーザー光から高エネルギーの偏光ガンマ線が電子線の進行方向に沿って放出される。この手法は1960年代のレーザーの発明直後から試験されてきたとのことであるが、近年の放射光施設の発展により、実用的な準単色ガンマ線源としての利用が可能になったそうである。宮本講師の功績は兵庫県西播磨の大型放射光施設Spring-8に隣接して設置された兵庫県立大学高度産業科学技術研究所の放射光施設NewSUBARUにLCSガンマ線ビーム線源を構築し、そのビームを応用して基礎科学から応用までの様々な分野で成果を挙げたことである。図2はNewSUBARU放射光施設の電子蓄積リングの概略図を示している。周長118mの蓄積リングの南東側にLCSガンマ線のビームラインが設けられ、蓄積リングの外側から遮蔽壁に開けた開口部より図3に示すように3種類のレーザー光を導入できる構造になっている。半時計回りに光速に近い速度で周回する電子とレーザー光が正面衝突し、生成ガンマ線は電子の進行方向に2個のコリメータを経て、実験用ハッチに導かれる。ガンマ線エネルギーはレーザー波長と電子のエネルギーで設定可能であり、ガンマ線スペクトル巾とフラックスはコリメータによって制御出来る。

核物理研究においては原子核の構造を調査するために (γ, xn) 、 (γ, p) 、 (γ, np) などの光核反応を利用した実験がなされてきたが、実験データのバラツキが大きく、異なる研究施設から矛盾するデータの報告がなされたこともあり、当施設において国際チームを結成して光核反応断面積データベースの精密測定を行い、最近4年

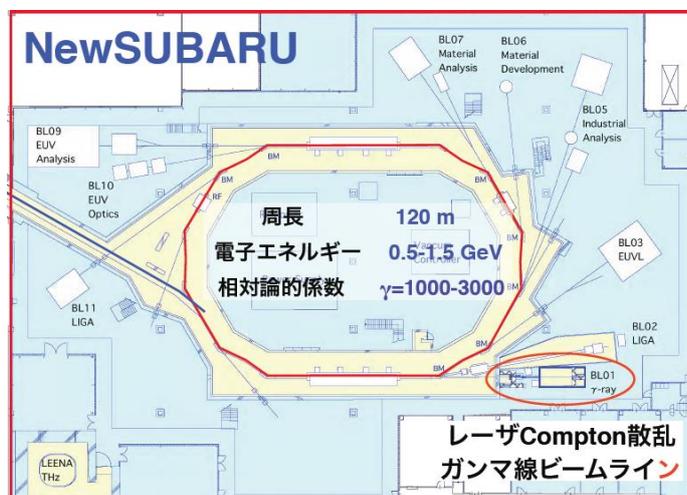


図2 NewSUBARU 構成図。

間で予定した核種のデータ取得が終了した。これらのデータはビッグバン以降の宇宙における元素合成過程の計算機シミュレーションによる解明にとって極めて重要となる。

LCSガンマ線は入射レーザーの偏光に対応して偏光する。この偏光ガンマ線を利用する核共鳴蛍光散乱（NRF: Nuclear Resonance Fluorescence）という手法がある。原子核には核種毎に固有の励起状態が存在する。励起状態に対応するエネルギーのガンマ線を照射するとフェムト秒からピコ秒オーダーの短寿命で励起エネルギーのガンマ線が放出されて脱励起が生ずる。この現象を核共鳴蛍光と呼び、その際に放出されるガンマ線を核蛍光ガンマ線と言う。NRFは原子核の構造を調べる重要な手段であり、この原理とガンマ線の高い透過力を利用した非破壊検査技術が開発されている。その実証試験はすでに旧電子技術研究所のLCSガンマ線装置で厚さ1.5cmの鉄箱に入ったPbのサンプルについて行われ、Pbの存在と位置が確認できた。現在、NewSUBARUではJAEA-QSTと共同で核セキュリティのための核物質の検知技術開発の研究を行っているようである。

原子核に10～30MeVのエネルギーのガンマ線を照射すると、光核反応（ γ, n ）によって、中性子が放出されることが知られている。この中性子を利用した核変換による放射性廃棄物の消滅処理と医療用放射性同位体生成試験を行った。放射性廃棄物としてヨウ素129（半減期：1570万年）を想定した。ヨウ素129は図に示すようにヨウ素128を経て25分の半減期で安定なXe128に壊変する。ヨウ素129に関してはその光核反応断面積の計測データが得られていないため、ヨウ素129を37kBq含むPdI₂にガンマ線を照射し、生成したヨウ素128からの放射線を測定してヨウ素128の生成量を決定し、入射ガンマ線量を基に129Iの（ γ, n ）反応断面積は220mbarn±50%と求まった。その結果、国内の年間生成量200kgのヨウ素129の処理にかかる電力はおよそ3GWと見積もられた。この値は国内電力の10%程度に相当する。手法として不可能ではないが、すぐに実現できるものではなさそうである。

一方、我が国で利用が100万件に達する核医学検査用Mo99はすべて海外の原子炉で製造されている。半減期が66hと短く、製造元の原子炉の老朽化も関係して、海外からの供給が途絶えるリスクも高く国内で加速器による製造が強く望まれている。図4はその概念図である。Mo99の必要量は20mgと大量ではないが、短寿命核種であるため、備蓄は出来ないため、安定供給には連続的な製造が必要であり、実用化には専用の施設が必要である。

今回の講演ではその他にも興味ある話題を挙げられたが、時間の制約があって全てを詳細にお話ししていただけなかったのは残念であった。

最後に世界的にはLCSガンマ線源の有用性が認識され、世界各国で専用の施設が整備されつつある現状を駆け足で紹介された。日本でもKEK-JAEA-QST合同で新規の建設が計画されているようである。エックス線の発生装置のサイズ程コンパクトにするのは困難かもしれないが、ガンマ線源の利用が身近になることを期待させる講演であった。

（大嶋隆一郎 記）

レーザー入射光学系 波長に応じて、3種の光学系

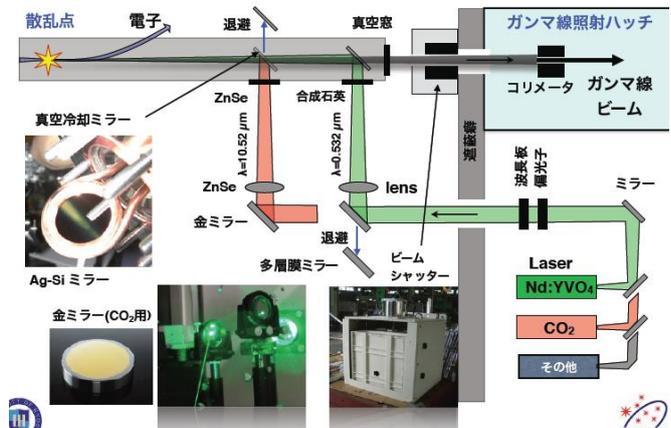
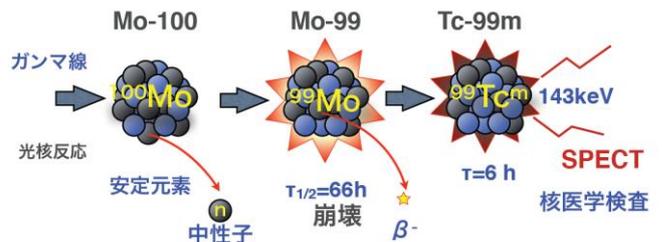


図3 レーザ入射系構成（図2の右下部分）。

放射性同位体製造 核医学応用



日本国内では核医学検査の80%にTc-99mが使われている。年間約100万回に350TBqが使われる。Mo-99で20mg相当。

図4 Mo-99製造概念図。

3. 素粒子ミュオンの原子力利用

高エネルギー加速器研究機構 名誉教授・ダイヤモンドフェロー 永嶺謙忠

講演の観点と大枠: ミュオンの研究の第一人者である永嶺先生に今回講演いただいた観点は、原子力や放射線に係わる者にもあまり馴染みのない粒子、ミュオン（以下 μ と略記）、の利用であった。素粒子である μ は宇宙線由来で常時天空から飛来しているし加速器でも生成可能で、高エネルギー成分は物質透過能が非常に高く、さらには元素変換を引き起こすことができる。これらに基づいて、大型の原子炉や火山までもその内部を透視できることが実証済みで、将来の可能性としては核廃棄物中の放射性元素の短寿命化や、核融合反応を誘起してエネルギー源にできる可能性すらある、とのことである。

ミュオンの本質と線源: μ は構造のない素粒子であり、 $1/2$ のスピンを持ち、質量は 106 MeV と電子と陽子の間の値で、正負どちらかの電荷を持ち寿命は $2.2 \mu\text{s}$ と中性子とパイ中間子（以下 π と略記）の間にある。

μ は崩壊すると電子と電子ニュートリノ ν_e とミューニュートリノ ν_μ が発生する。 μ は π の崩壊によって ν_μ と共に生成する。 μ と物質との相互作用は、電磁気力と弱い相互作用に起因する。概括として「質量が軽く寿命が程々に長い。スピン偏極現象から磁気プローブとなる。」さらには「物質中では μ^+ と μ^- はそれぞれ、軽い陽子と重い電子のように振る舞う」とのことであった。 μ を利用する際には宇宙線か加速器が線源となる。宇宙線の陽子は大気中の窒素や酸素の核を叩き π を産みこれが崩壊して μ^\pm を発生しており、GeV 領域の μ^\pm が地表に降り注いでいる。一方、加速器陽子線 (250MeV 以上) で宇宙線起源と同反応で人工的な μ^\pm を発生可能で、近年増えた医療用の陽子線加速器は意図せずとも MeV 領域の μ^\pm を発生している。強度（流束）はこちらの方が圧倒的に強い。

ミュオンの物質透過性: μ はエネルギーが高まっても電子の様に光子に変わらず陽子の様に核反応を起こさず、素直に透過厚が増すだけである。図2に μ の鉄中の飛程が入射エネルギーの関数として、電子と陽子の比較を含めて示す。これによると宇宙線由来の数百 GeV の μ を用いれば山体（数万 cm 厚の鉄に相当）の透視の可能性が示唆され、その実証例が幾つか示された。乾板を用いて3ヶ月程度の露光が必要とのことである。（図3に薩摩硫黄島の火山透視図）。



図1 講演中の永嶺講師。

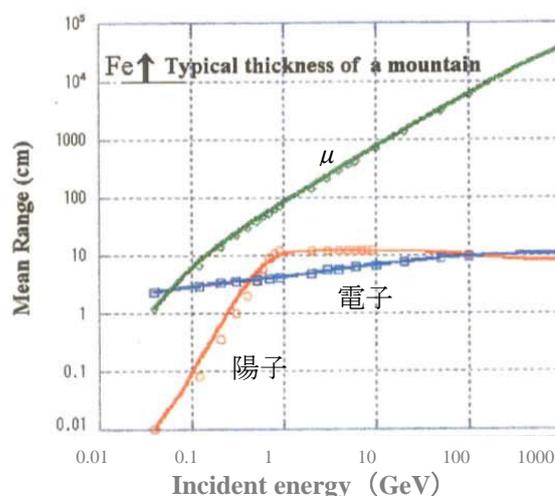


図2 Fe 中の μ 、電子、陽子の飛程 ($1/e$ 強度減衰厚)。

福島第一原発2号炉の透視： 炉心溶融した2号炉をこの技術で透視した例も紹介された（図4、5）。圧力容器底部に高密度物質の集積を伺わせる影が確かに見えるが、現状では鉄系構造材の集積かデブリかの識別はできず、多重散乱を勘案して識別する検討がされているとの紹介があった。

核反応： ADS(加速器駆動核変換システム)に用いる大強度陽子加速器で発生する μ^- を減速熱化させ、長寿命核の軌道電子に載せて核捕獲（弱い相互作用）で短寿命核に核変換する応用構想が説明された。多くの核種について可能性が示され、代表例として ^{135}Cs （半減期 2.3×10^6 年）を (μ^- , n) 反応 ($i=1\sim 4$) で $^{134}\text{Xe}\sim^{131}\text{Xe}$ に変換する過程 (^{133}Xe 以外は安定核、 ^{133}Xe は半減期 5.27d で安定核に) が紹介された。中性子を利用する ADS 用加速器を μ^- 利用に複合利用する考えが示された。

μ^- は電子の約二百倍の質量があり重水素 D やトリチウム T の電子軌道に入ると核との距離が通常水素原子より遙かに小さな中性原子となって、D と T の距離をに減少させ加熱せずに D-T 核融合反応の触媒となることが研究されてきたが、これをさらに促進するために D-T 反応で発生する α 粒子に付着する μ^- を剥ぎ取る検討がなされていることが紹介された。

火山も原子炉も透視できる技術である。安全規制に火山を監視する話が実際に出了今、更なる新技術との融合でステップアップを期待したい。



薩摩硫黄島（鹿児島県）

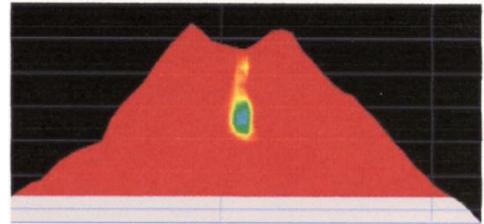


図3 薩摩硫黄島の透過画像。黄色い部分はマグマの通り道。青い部分はガスとマグマが混じり合っている場所。

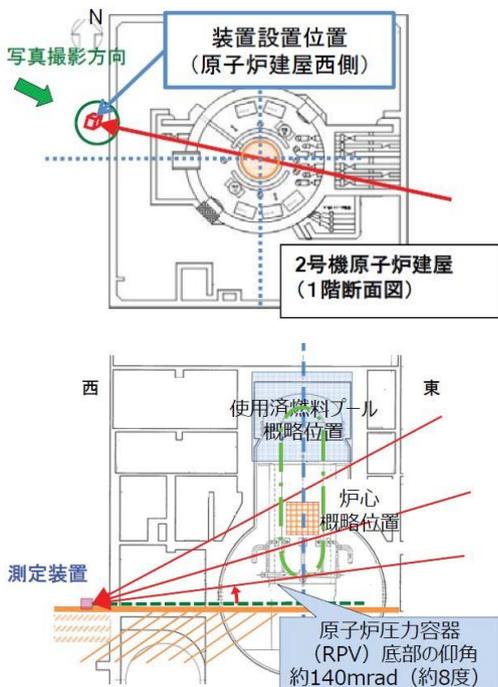


図4 原子炉建屋を透過するミュオンの測定イメージ（東西断面図）。

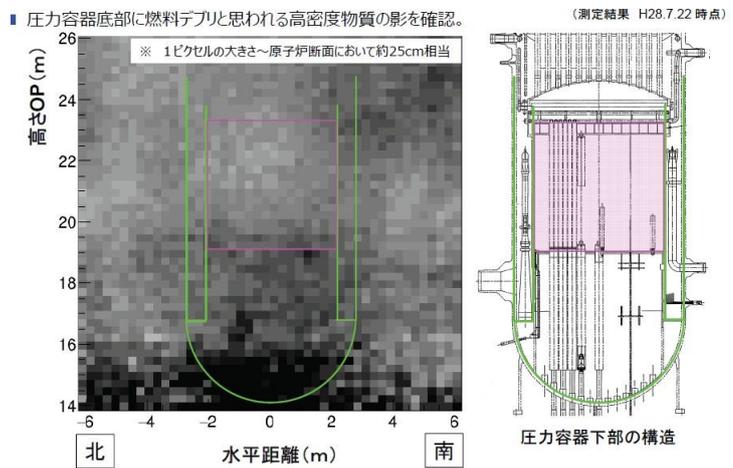


図5 観測された原子炉の内部構造。宇宙線ミュオンの透過強度変化により、底に物体が溜まっていることが分る。

(山本孝夫 記)

4. エネルギー社会の変革と高速炉サイクルの実力

日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門 副部門長 上出英樹

現在、第4世代の原子炉として第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（Generation IV International Forum、GIF）では、ナトリウム冷却高速炉（SFR、高速中性子）、超高温ガス炉（VHTR、熱中性子）、超臨界水冷却炉（SCWR、熱中性子/高速中性子）、鉛冷却高速炉（LFR、高速中性子）、ガス冷却高速炉（GFR、高速中性子） 熔融塩炉（MSR、熱中性子/高速中性子）が検討されている。講師はGIFの委員でもあり、6つの炉系に精通しているが、JAEAでは高速増殖炉の開発に従事している関係上、本講演では高速炉の話が主であった。

まず平成30年7月に発表された日本の「エネルギー長期計画」では原子力が長期的なエネルギー需要構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源と位置付けられていること、再生可能エネルギー普及における問題点から話が始まった。原子力発電は大規模集約発電システム、出力密度が高く、必要面積は小で経済性に優れている。再生可能エネルギーはローカル分散電源で出力密度が低く、小規模で広く展開されている。一般的には天候等に依存するため変動幅が大きい。

軽水炉を含む現在の炉は天然ウランに0.7%含まれているウラン235を燃料としている。一方高速炉はウラン238を核燃料に変換するため燃料の利用可能な部分はウラン235からウラン全体となるため100倍以上となる。従って高速炉の導入により、数世紀の核エネルギー供給が持続可能となる。

高速増殖炉は「止める」「冷やす」「閉じ込める」について図2に示すように炉容器内・格納容器内で自然に終息するという利点がある。

原子力発電所の使用済み核燃料から出る高レベル放射性廃棄物は長時間に亘って放射線を放出する。高レベル放射性廃棄物の元は使用済み燃料中のPuとマイナーアクチニド（MA）である。高速炉を使った核燃料サイク



図1 講演中の上出講師。

安全確保を堅牢とするシステム設計の考え方

- 高速炉の特徴を活かし、深層防護に基づく、受動安全を活用した堅牢なシステム
 - 「止める」に加えて、「自然に止まる」機能
 - 「冷やす」に加えて、「自然に冷える」機能
 - 「閉じ込める」に加えて、炉容器内・格納容器内で「自然に終息する」機能

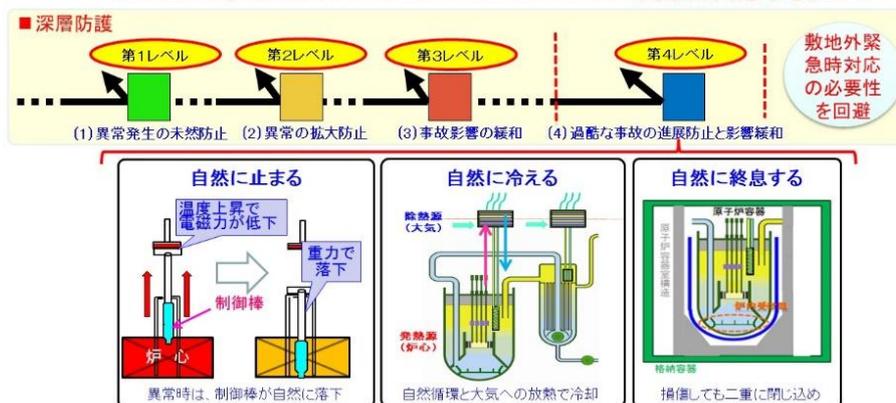


図2 高速増殖炉の安全性。

ルでは、Puを劣化させずMAを含めて核燃料として利用可能、MAをサイクルの中に閉じ込めることが可能（累積させない）、軽水炉と並行して使うことで、Puを蓄積することなく利用可能、最終的にガラス化した時の潜在的有害度と必要処分場面積の低減が可能等があり、その結果、図3に示すように使用済み燃料から派生する長寿命のMAの処理が軽水炉よりも容易である。

- 東海核燃料サイクル工学研究所、高レベル放射性物質研究施設(CPF)にて「常陽」使用済燃料のプロセス廃液で、99.9%以上のMA*吸着性能を確認
- 照射試験用MA含有MOXペレット製造に向けて、約2gのMA回収を達成
- 大洗照射燃料試験施設(AGF)にて、遠隔燃料製造設備によりMA含有MOXペレットを試作し、照射試験用燃料製造の見通しを得た。

(*MA:マイナーアクチノイド)

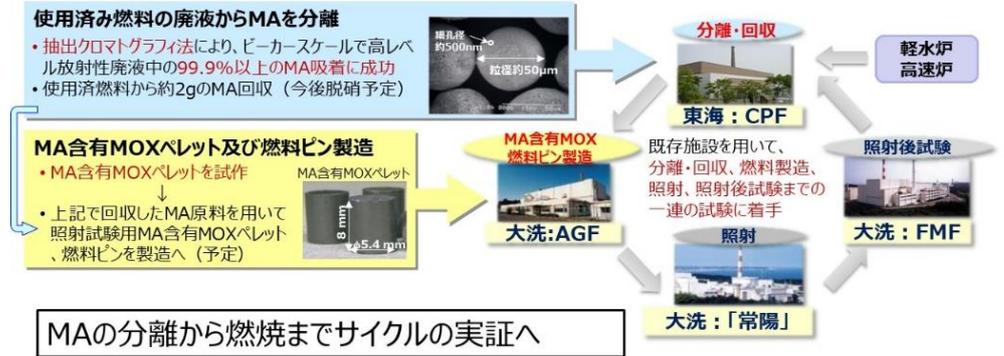


図3 放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発。

福井県敦賀市にある高速増殖原型炉「もんじゅ」は2016年に廃止が決まった。「もんじゅ」は、トラブルばかりが大きく報道されたため、殆ど運転実績が無かったような印象があるが、実際は原子炉運転時間が5300時間、40%出力の発電運転が883時間行われ、総発電量は1億kWhであった。高速炉発電システムの成立性を日本で初めて確認し、わが国の高速炉発電システム用設計手法や製作技術の基盤を確認することができたとのことである。今後の開発計画やJAEAの役割を図4に示す。

茨城県大洗町にある高速増殖実験炉「常陽」は、東京電力福島第一原発事故後に制定された新規制基準に基づいて安全審査中である。そのため現在国内には核変換に使える高速炉が無い状態である。

JAEAでは未臨界炉に陽子を導入して核分裂を起こす、加速器駆動システム(ADS)を用いるMAの短寿命化の研究もなされている。使用済み燃料の処理の問題は現在保管中のものを処理するだけでも大仕事であり、早急の手当が望まれる。

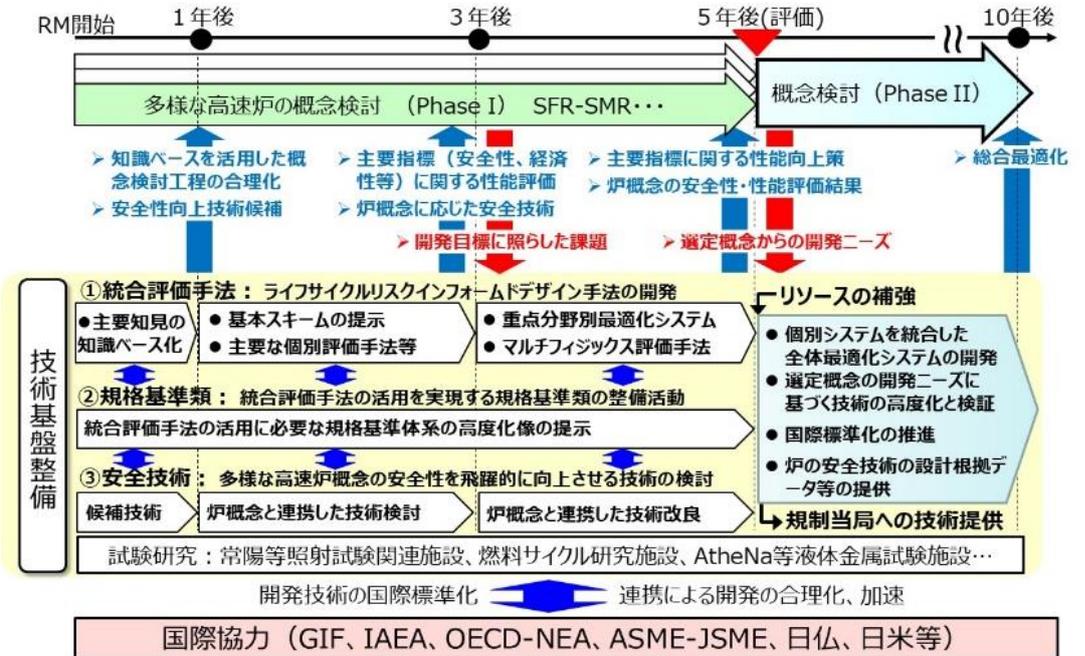


図4 今後の高速増殖炉の開発と機構の役割。

(義家敏正 記)

5. 原子力システム安全を理解するための教育と研究の取り組み

長岡技術科学大学大学院 原子力システム安全工学専攻 特任教授・名誉教授 鈴木雅秀

長岡技術科学大学では、平成24年4月に大学院工学系研究科修士課程として原子力システム安全工学専攻を開設し、原子力・放射線に関連した研究・教育に取り組んでいる。本講演では、東日本大震災と原発事故直後のタイミングでの専攻立ち上げに伴うご苦労話なども交え、同専攻における研究・教育の取り組みを紹介いただいた。

まずはじめに、従来からの大強度パルスパワー発生装置など特徴ある装置を用いた慣性核融合や放射線関連の研究をベースとして原子力システム安全工学専攻が設立された経緯に関する説明があり、そのあと、柏崎刈谷原子力発電所に近接しているという立地条件を活かした原子力規制人材育成事業の概要や、リスクコミュニケーションなど地域連携による実践的な教育の現状の紹介があった。リスクコミュニケーションに関する演習では、実際に発電所立地地域の人達との対話を通じて、必ずしも原子力の専門家ではない人たちとのコミュニケーションを成立させるのに必要な心構えや技法を学生たちは学んでいる。また、住民説明の模擬体験も貴重な学習経験となっているとのことである。図2には、地元住民と学生との対話集会（柏崎地域の会）、図3には、柏崎刈谷原子力発電所における模擬住民説明会の様子を示す。



図1 講演中の鈴木講師。



図2 地元住民との対話集会。



図3 模擬住民説明会の様子。

その他、地域連携による実践的な教育試行として、安全・危機管理特論における危機管理ロールプレイング、防災工学特論における規制機関、自治体、事業者と連携した原子力防災教育などを実施している。さらに、福島第一原子力発電所の事故以来多岐にわたって大きく変化している規制基準や最新知見を学習するために、外部講師の講演を通じて学生の理解促進を図っている。例えば、平成30年3月には、原子力安全フォーラム（地域連携による安全性向上を目指して）を開催し、原子力規制庁、柏崎刈谷発電所、新潟県防災局から招いた講師による講演会を実施している。加えて、材料劣化、保安と審査制度、リスク評価、加速器による材料評価等、多岐にわたるテーマでの講演会も行っている。

続いて、原子力システム安全と教育・研究に関する紹介があった。原子力プラントは、複雑化した分りにくい巨大システムの1つであり、システム全体としての安全対策を考えることがまず基本となる。安全確保のために、安全設計、安全評価、確実な運転管理といった各段階で多岐の対応が求められる。さらに、事故発生時の対応まで想定することは当然である。以上のことは大学というより、事業者、産業界、規制機関におけるゴールになるべきものであり、大学では、より根源的なシステム安全研究、手法開発、人材育成に向かう必要があると思われる。

原子力システム安全に関する詳細が述べられた後、具体的な教育・研究例として「原子炉压力容器鋼

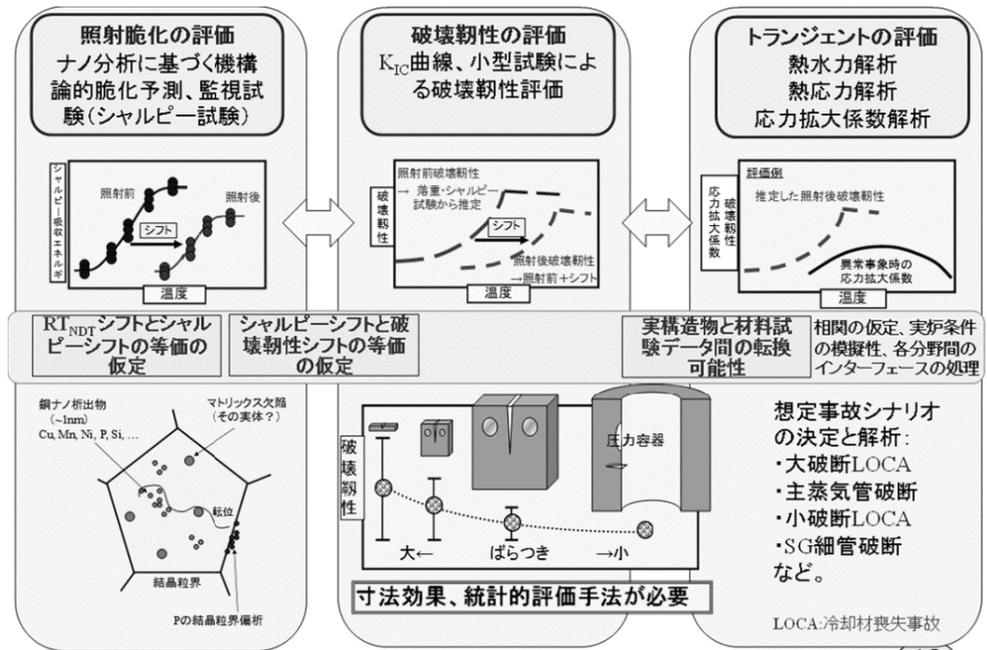


図4 压力容器鋼健全性評価の全体像。

の照射脆化」が紹介された。近年、3次元アトムプローブなどの手法の進展により、脆化のマイクロ組織に関する理解は大きく進んでいるが、压力容器の健全性評価につなげるためには、図4に示すような幅広い検討が必要となる。このような広がりを持った体系をシステム安全と関連させて、初学者である学生たちにどう理解させるかが重要である。さらに学習のポイントとして、脆化予測式の理解や、ECCS

作動と熱過度に伴う亀裂進展の可能性などの多種多様な因子の理解、システム安全を自分で考える力などが挙げられた。

講演の最後にあたって、今後の課題や問題点に関する以下のような言及があった。非常に広範囲にわたる原子力全般の基礎を修士課程の2年間で学習する必要があること、教育体制としてさらなる様々な専門家や関連施設、国内外における連携などが必要なこと、そして、福島事故以来大きく認識された原子力安全の重要性を踏まえて、学生たちにどう夢を与えるか、研究での達成感を与えるか、などである。これらの課題に関しては、特に教員側の努力と工夫が必要であるということも強調された。また、同原子力専攻では、学部組織を持たないため、修士課程の学生確保に苦労すること、海外からの留学生が増加する一方で、日本人の学生が減りつつあることなども指摘された。大阪府大の量子放射線専攻でも同じ悩みを有していることから、それに関する質疑応答があり、そのあとの交流会でも、いろいろと意見が交わされたようである。

福島の復興に関してはもちろん、原子力を含む将来の日本のエネルギーを考えるうえでも、学生をはじめ若い人々の力が必要であることは言うまでもない。大学や大学院における原子力安全教育が非常に重要であることを改めて認識させられる講演であった。

(岩瀬彰宏 記)

6. ヨウ素同位体システムの話～福島第一原子力発電所事故からメタンハイドレートまで～
 東京大学総合研究博物館タンデム加速器研究施設 教授 松崎浩之

ヨウ素には安定同位体¹²⁷Iのほか、放射性同位体として¹²⁹I（半減期1,570万年）、¹³¹I（8.02日）などがある。ヨウ素は生体親和性が強いため、海底堆積物や土壌中に濃縮している。本講演では、土壌中の¹²⁷Iと¹²⁹Iの同位体比を加速器質量分析法（AMS）によって精密に測定し、時間情報や速度論的情報を得ることにより、福島第一原子力発電所事故により放出された¹³¹Iの沈着マップの復元とメタンハイドレート形成の年代測定の試みという、2つの話題に関して紹介いただいた。

当日の講演では、AMSの原理などについては講演の最後に述べられたが、ここではまずAMSについて少し記す。AMSは分析したい材料そのものをイオン源に用いて、イオンビームとして加速し、マグネットによって質量の異なる元素を分離計測する方法である。ここでは、通常の化学的手法では困難な¹²⁷Iと¹²⁹Iの同位体比の決定を、東京大学タンデム加速器研究施設（MALT: Micro Analysis Laboratory Tandem Accelerator）におけるAMSにガスカウンターを併用した方法を用いて行っている。図2に東大MALTのAMSシステムを示す。



図1 講演中の松崎講師。

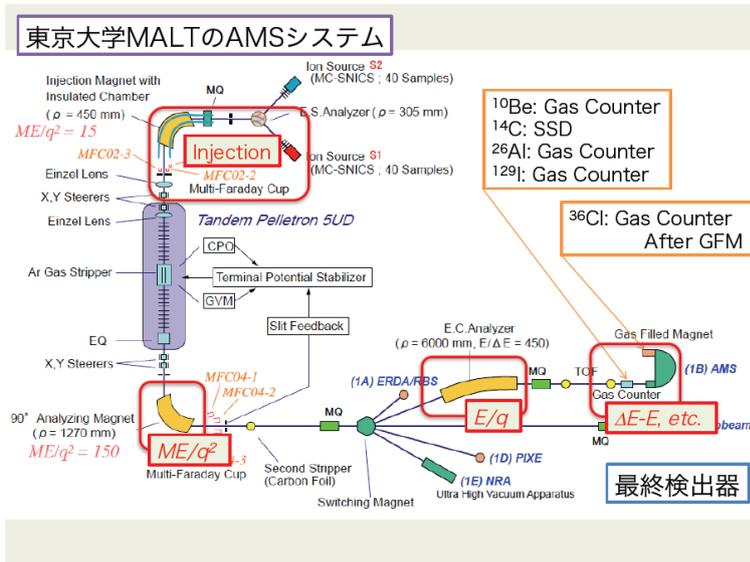


図2 東大MALTのAMSシステム。

2011年3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原発により、多くの放射性核種が環境中に放出された。その中で、事故発生当初、最も放射能が高く住民への被ばくの影響が大きかったと考えられるのが、β崩壊核種であり甲状腺に蓄積することにより甲状腺がんを起こす可能性のある¹³¹Iである。そのため、居住環境での¹³¹Iの沈着分布を調べることが重要となる。しかし¹³¹Iの半減期は8日と短く、事故後数か月も経てば検出不可能になる。そこで講演者らは、事故当初の¹³¹I沈着マップの復元のため、原発事故地点を中心に100 km圏内の合計2200か所で採取された土壌に関し、2011年から6か年にわたってAMS法による¹²⁹I測定を行った。¹²⁹Iマップから事故当初における¹³¹Iマップを作成するためには、原子炉から放出された放射性ヨウ素の同位体比¹²⁹I/¹³¹Iを知る必要がある。この同位体比は¹³¹Iを測定済みの土壌中の¹²⁹Iを測定した文献で示されており、また事故時の原子炉での燃料条件から計算コードを使って求めた核分裂生成物の収量計算値はよく一致しており、¹²⁹I/¹³¹Iは20-26程度である。この値とAMS法による¹²⁹I測定の結果から復元された¹³¹I濃度の分布マップを図3に示す。この結果は、規制庁によって公開されている¹³⁷Cs等のマップと比肩しう

計2200か所で採取された土壌に関し、2011年から6か年にわたってAMS法による¹²⁹I測定を行った。¹²⁹Iマップから事故当初における¹³¹Iマップを作成するためには、原子炉から放出された放射性ヨウ素の同位体比¹²⁹I/¹³¹Iを知る必要がある。この同位体比は¹³¹Iを測定済みの土壌中の¹²⁹Iを測定した文献で示されており、また事故時の原子炉での燃料条件から計算コードを使って求めた核分裂生成物の収量計算値はよく一致しており、¹²⁹I/¹³¹Iは20-26程度である。この値とAMS法による¹²⁹I測定の結果から復元された¹³¹I濃度の分布マップを図3に示す。この結果は、規制庁によって公開されている¹³⁷Cs等のマップと比肩しう

るものであり、SPEEDI等の核種移行シミュレーションに重要な境界条件を与えるものとしての意義もある。

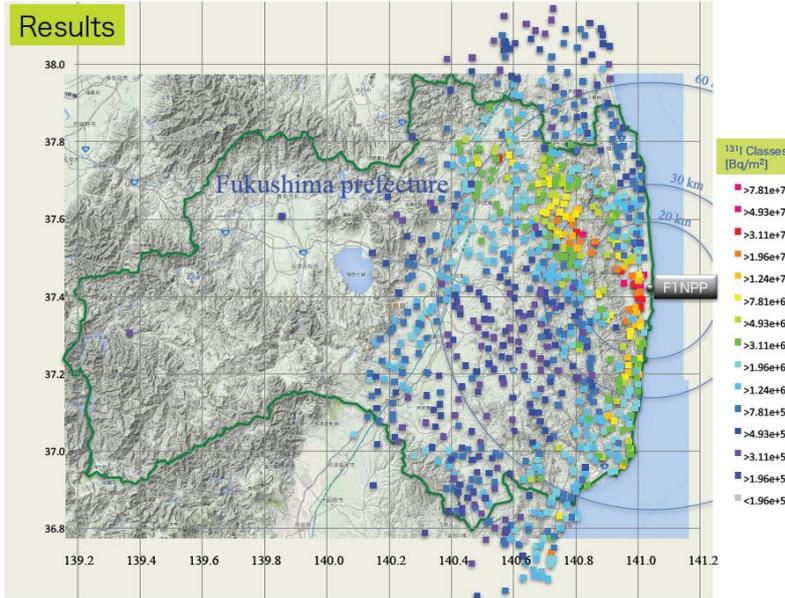


図3 ^{129}I を利用した原発事故当初の ^{131}I 沈着分布の再構築。

現在の地球表層は人為期限の ^{129}I で汚染されており、自然のシステムにおける初成値を求めるのは簡単ではないが、講演者らは、初成値を 2×10^{-13} 程度とすれば、ヨウ素同位体比から算出された年代と地質学的年代の食い違いがなくなることを示している。

講演の最後に、人間の活動が自然界にはっきりとした痕跡を残し始めた時期を、新しい地質年代として、

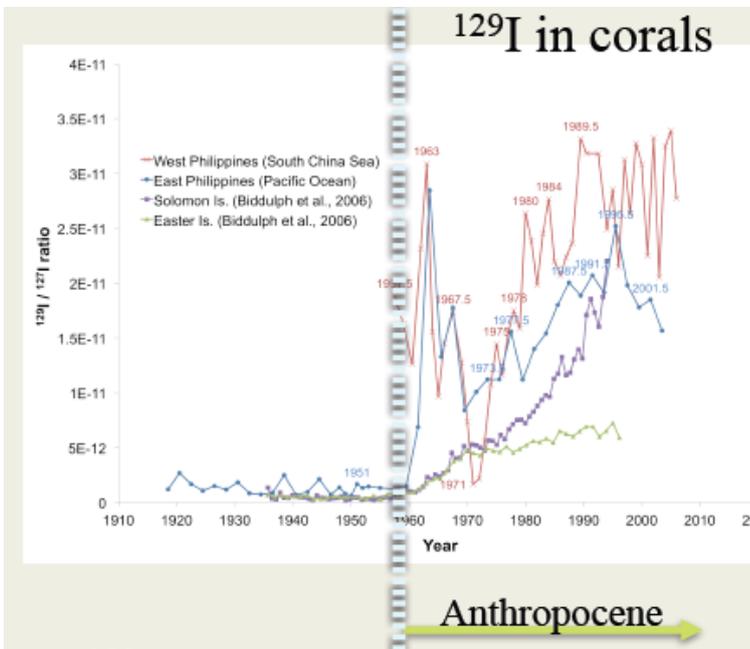


図4 完新世-人新世遷移とヨウ素同位体。

次に、ヨウ素同位体を用いたメタンハイドレート形成の年代測定の試みの紹介があった。ハイドレートには地球上の全炭素量の20%近くが含まれているとされており、ハイドレートの起源や動態の研究は、地球科学の視点から重要である。ハイドレート近傍の間隔水のヨウ素濃度は非常に高いことから、ヨウ素同位体を用いたハイドレート形成の年代測定が考えられる。 ^{129}I を用いる年代測定は、安定同位体 ^{127}I と ^{129}I との平衡同位体比（初成値）を持っていることが大前提である。現

最終氷河期が終わる1万年前から現代（および近未来）までの地質年代である完新世 (Holocene) と区別して、人新世 (Anthropocene) と呼ぶことが提案されているらしいが、図4に示す $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比の時系列変化を見ると、大気圏核実験や核燃料再処理によって明らかに1950年ごろから大きく増加しており、人新世の指標として $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比が最も優れているのではないか、という提案で講演を締めくくられた。

加速器質量分析法 (AMS) による同位体比測定でよく知られているのは ^{14}C 濃度測定による年代測定であるが、今回の講演により、AMSが、環境科学、地球科学分野まで広く応用できることがよく理解できた。

(岩瀬彰宏 記)

7. 放射性同位元素を用いたトレーサー拡散の物理

若狭湾エネルギー研究センター 所長 中嶋英雄

放射性同位元素は、様々な研究分野で用いられてきており非常に重要なものである。本講演では、材料・物性における基本的現象である固体内拡散の同位体元素による研究結果を紹介いただいた。

まずはじめに拡散研究の歴史の説明があった。花の香りが部屋に漂う現象とか、水にたらしした色付きのインクが水中で広がっていく現象は日常的によく経験するが、これらは気体や液体中での分子の拡散の結果である。古代化学では、「物質は気体や液体中でないと移動しない」と考えられていたが、1896年、英国のRoberts Austen（オーステナイトの研究で有名）は、金メッキした鉛が高温におかれると金色が消失したことから、固体鉛中でも金原子が拡散することを発見した。その後、放射性同位元素 ^{210}Pb を用いた液体、固体鉛中の自己拡散を始めて測定したのがGeorge Hevesyであり、1943年ノーベル化学賞を受賞している。

次に、放射性同位元素 (RI) を用いたトレーサー拡散測定法とその有用性についての説明があった。トレーサー拡散測定法とは、図2に示すように、RIをマーカーとして用い、深さ方向の濃度分布を、イオンビームスパッタによりセクショニングした試料中のRIが発する放射線の強度から求める方法である。

RIを拡散測定に用いる有用性は、ppbオーダーの微量元素分析ができること、鉄中の鉄原子の拡散といった自己拡散の測定ができること、そして、同一元素の拡散に及ぼす質量効果を知ることができること、である。



図1 講演中の中嶋講師。

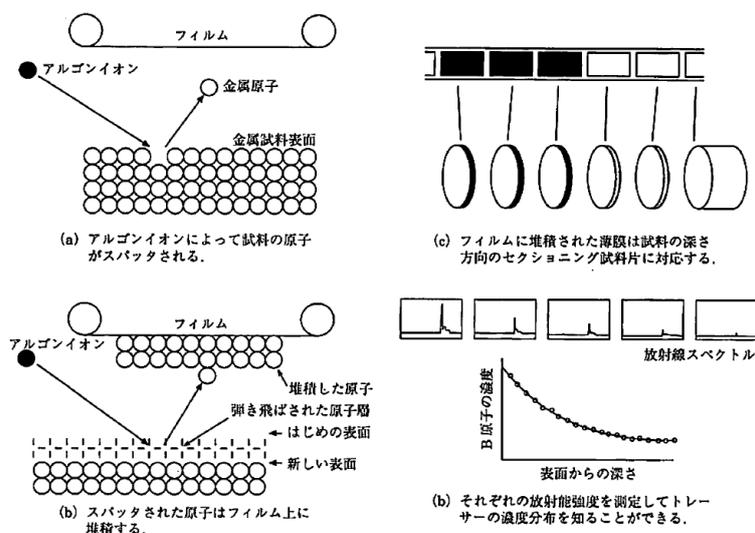


図2 イオンビームスパッタセクショニング法による拡散測定。

固体内拡散の機構としては1930年後半ごろ、直接交換、格子間拡散、空孔拡散が議論の対象となったが、空孔機構を支持するHuntington, Seitzの電子論的計算(1942年)や1947年の所謂Kirkendall効果の発見により固体結晶中での拡散は空孔機構で起こることがほぼ確立された。

講演の途中では、講師自身の留学経験などに基づく興味あるお話があったが、それについては本稿の最後に紹介することにして、RIトレーサー法による具

体的な拡散研究事例として金属間化合物中の拡散の話がされたので、それを先に紹介したい。

金属間化合物とは、図3に示すように、異種原子が規則的に配列した構造を持つ結晶であり、耐熱構造材料や機能性材料としての研究が盛んに行われているが、組織制御の基礎過程を支配する原子の拡散の

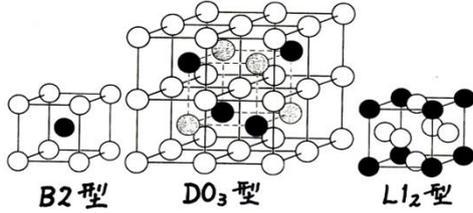


図3 金属間化合物の結晶構造例。

研究は少ない。金属や普通の合金中では、原子空孔のランダムな運動による自己拡散が起こるが、金属間化合物中では、このようなランダム運動は原子の規則的配列を乱してしまう。従って、金属間化合物中では、原子の規則的配列を維持したまま拡散が起こらなければならないため、拡散機構は非常に複雑なものとなる。様々な金属間化合物における拡散測定のうち、今回はTiAlにおける研究例が紹介された。測定に用いるRIとして、⁴⁴Tiを用いた。

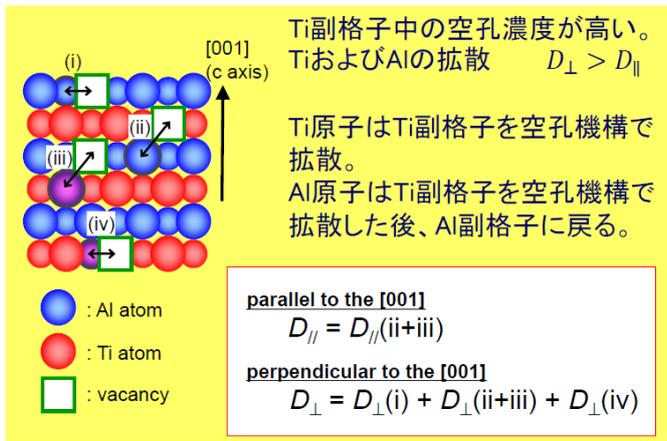


図4 TiAl 金属間化合物中の Ti と Al の拡散過程。

⁴⁴Tiは、日本では当時少量しか製造できず、ロシアの加速器で製造したものを500 μCi あたり700万円で購入したそうである。一方、AlのRIである²⁶Alは、100 μCi あたり3億5000万円という、とてつもなく高価だったので、Al原子の拡散に関しては、AlのRIではなく化学的に同族のInを用いて、2次イオン質量分析器を用いて測定した。その結果、図4で示すように、Ti原子はTi副格子中を空孔機構で拡散するが、Al原子はTi副格子中を空孔機構で拡散したのち、Al副格子に戻るといった複雑な過程で、結晶構造を保ちながら拡散することが判明した。

講演の最後にあたって、放射性同位元素は拡散現象などの物性研究だけでなく、種々の理工学、医学、生物学の研究において大変重要であるにもかかわらず、現在、日本だけでなく、ドイツ、米国においても大学の放射性同位元素実験室の維持が困難になっていることを踏まえ、日本学術会議が、全国大学共同利用施設としての各地区ごとの放射性同位元素実験室の維持を提言していることが述べられた。

講演の合間に触れられた、中嶋講師の留学体験などに基づく話が大変興味あるものだったので、少しここで紹介したい。日本での学位取得後、Huntington先生のもとに留学したが、勤務初日に膨大な宿題を与えられ、「米国人と区別せず語学のハンディを考慮しない」という一言が人生を変えたということである。また、1940年代までに信じられていた拡散機構は直接交換かリング機構だったので、これらを否定したKirkendallの実験結果は疑問視され、そのために同氏は大学を解雇されたという噂があった。そこで、Kirkendall先生宅を訪れたとき、中嶋講師は夕食時の酒の力に任せて、「なぜ先生は大学を首になったのですか」と質問されたそうである。その時の様子をJournal of Metalsの記事にしたところ、大きな反響があり、「科学のシャーロックホームズ」と称されたり、英国科学史学会から招待講演を依頼されたりしたそうである。しかし、科学史研究者としてのレッテルを貼られることを危惧して招待講演は断ったそうである。このような体験談は、これから研究の世界に入り、海外留学も経験するであろう学生たちに聞いてほしかったが、残念ながら当日のシンポジウム会場には、学生は数人しかいなかったようで、まことに残念であった。また機会を見て、大学など若い人の集まる場でのお話をお願いしたいと思う。

(岩瀬彰宏 記)

全ての講演が終了した後に、本シンポジウムの主催団体の1つである大阪府立大学研究推進機構の谷口教授から閉会の挨拶があった。各講演者が、それぞれ高度な内容であったにも関わらず非常に分かりやすく話していただいたことへの感謝と、この冬1番の寒波が襲来した日であったにも関わらず、朝早くから集まってくれた多くの参加者への謝辞が述べられた。

その後別室にて、豊松 ONSA 会長の挨拶、谷口教授の乾杯の音頭で交流会が開始した。当日遠方に帰る予定の講演者もおられたが、可能な時間まで参加して頂いたため、会場のあちらこちらで講演者を取り囲んで質問や歓談する風景が見られた。また、新年の挨拶を交わす風景もみられ、ONSA 会員相互の親睦も大いに高められた。



閉会の挨拶（谷口教授）。



交流会での歓談風景。

（岩瀬彰宏 記）