



Photo J. Mori

Index

獣医学領域におけるRIの利用 ～ 馬の骨シンチグラフィー ～	山田 一孝	1
整合性のある原子力システム	藤家 洋一	6
日本の存在感示す「アジア原子力協力フォーラム」	町 末男	11
ISMTR-6に参加して ー 試験炉を活用するー	棚瀬 正和	12
ISMTR-6での発表 “Development of ^{99m}Tc production from $(n, \gamma) ^{99}\text{Mo}$ based on solvent extraction and column chromatography”	太田 朗生	15
〔新刊紹介〕 「放射線計測ハンドブック」第4版		17
「2014国際医用画像総合展」のご案内		18
〔サービス部門からのお願い〕 4月1日はガラスバッジの交換日です		19

獣医学領域におけるRIの利用

～ 馬の骨シンチグラフィー ～



山田 一孝*

伴侶動物の高齢化と獣医学の進歩とともに、クライアントの獣医療に対する要求も高くなり、今ではCTやMRIを用いた診断も診療の一環として組み込まれる時代である。平成21年には「獣医療法施行規則」が改正され、わが国でも動物に対する核医学検査が可能となり、ペットを対象としたPETが北里大学と日本動物高度医療センターに導入された。しかし、馬を対象とした核医学検査施設は、未だ導入されていない。馬の核医学検査は、診断が困難な歩様（歩き方）異常のスクリーニング検査として海外では30年以上の歴史があり、世界24カ国に導入されている。ところが日本では、馬の核医学検査という検査の存在そのものが、ほとんど知られていない。法律は整備されたにもかかわらず、馬に対する核医学検査の有用性は、海外の獣医療の実情を知る馬の臨床獣医師に限られているのが現実である。

筆者は、平成19年に日本獣医学会の獣医核医学ガイドライン作成ワーキンググループ委員として、獣医診療における核医学検査のガイドライン作成にかかわった。本稿が日本への馬の核医学検査導入の弾みとなることを願う。

1. 馬の骨シンチグラフィーとは

日本には約9万頭の馬が飼養されており、その多くは競走馬か乗馬である。人を乗せて走ることが、馬が飼育される目的そのものであることから、運動器疾患の発生が多い。運動器疾患の原因部位は、骨、筋肉、腱・靱帯、

蹄に分けられるが、特に骨折は、馬の体重を残った3本の肢で支えなければならなくなるため、蹄葉炎や感染症を誘発することがあり、馬にとって致命的である。また、競走馬は、レースでの活躍が期待できないと考えられた場合、安楽死の判断が下されることもある。さらに、競技馬や競走馬の微細な疲労骨折を診断することは、馬の骨折を未然に防ぐばかりではなく、騎手や競技者の落馬事故を防ぐことになる。つまり、骨折の早期発見は、馬の生命ばかりではなく、人命をも救うことにつながる。

馬の運動器疾患の診断は、まず視診による歩様検査、触診による身体検査が行われる。しかし、視診・触診による原因部位の特定は相当な熟練が必要であり、臨床経験が豊富な獣医師でなければ診断できないことも多い。続いて、X線や超音波といった画像診断検査が実施されるのであるが、現場で利用されるポータブルX線装置では、馬のような大動物は被写体の厚みから、下肢部以外の撮影は困難である。原因部位を特定できない歩様異常やX線撮影が困難な部位の異常の症例に対して、海外では核医学検査の骨シンチグラフィーが選択される。

馬の骨シンチグラフィーは、1977年がはじまりである。ものを言わぬ動物の歩様異常に対する客観的な診断法の有用性が認められ、精力的な臨床研究が繰り返された。寒冷期に下肢部の血流が低下することで十分なカウント数が稼げない場合に運動を負荷する工夫、包帯で下肢部を暖めることで画質を改善する

* Kazutaka YAMADA 帯広畜産大学 臨床獣医学研究部門 教授

工夫が報告されている。これらの臨床研究を通じて、現在では馬の骨シンチグラフィーの手技や読影方法は成熟している。

馬の骨シンチグラフィーに使用される放射性医薬品は、141keVの γ 線を放出する ^{99m}Tc （テクネチウム）で標識したリン酸化合物であり、骨基質に集積する性質を有する。詳細なメカニズムは不明であるが、骨芽細胞の活動が活発な部位に集積し、疲労骨折のような微細な病変について検出感度に優れる。しかし、骨反応を伴う炎症部位にも集積するため特異度に劣ることが欠点である。教科書には血流相（投与後すぐ）、軟部組織相（5～10分）、骨相（2～3時間）の撮影が記載されているが、海外で行われている馬の核医学検査は、骨を診断目的とした骨相である。

カリフォルニア大学デイビス校付属動物病院で実施されている馬の骨シンチグラフィーを例に、検査の手順を紹介する。カリフォルニア大学では、臨床での有用性に加えて、教育のために異常部位を客観的に評価することも目的のひとつである。馬は個体単価が高く、日本で1歳のサラブレッド育成馬はおおむね300万円以上で取引されている。（ちなみに、ディーピンパクトは7,000万円。）米国の馬の飼養頭数は日本の100倍程度であるが、個体単価が犬猫に比べてはるかに高額であることは海外でも同じである。馬の核医学検査は、その有用性が費用（10～20万円）に見合うため、獣医療の一環として定着している。

骨シンチグラフィーを受ける馬は、RIが含まれる尿が撮影部位に付着することを防ぐため放射性医薬品投与前に、下肢部に包帯、蹄にブーツを装着する（図1）。放射性医薬品の投与量は、1 GBq/100kgである。投与後は、被検馬を放射線管理区域馬房に収容し、骨への集積まで約3時間待機する。放射性医薬品投与1時間30分後に利尿剤を投与し、尿に集積されたRIの排泄を促す。撮影直前に鎮静剤を投与し、包帯とブーツを外し、撮影室に移動する。撮影には、馬専用カスタマイズされた γ カメラ（Enhance Technology社、USA）を



図1 RIを含む尿が四肢への付着を防ぐため、放射性医薬品投与前に、下肢部に包帯、蹄にブーツを装着する。



図2 撮影中、鎮静のかかった馬の頭は枕によって支えられる。馬の頭部は常時放射線技師によって保持されている。

使用する。この γ カメラは、被検馬の立ち位置にあわせて、女性が片手で操作できるほどスムーズに移動する。 γ カメラに内蔵される光電子検出器のサイズ（42×55cm）に収まる範囲に分けて、全身を撮影する。撮影時間は、各部位1分から2分である。撮影中、鎮静剤が投与された被検馬の頭部を載せる枕を使用する（図2）。これは、動物を安定的に保定し、撮り直しを減らすことで従事者の外部被曝を低減させる工夫である。なお、検査中ほとんどの時間、従事者は被検馬の頭部を保定しているので（図2、○印）、動物から距離の近い従事者の指は多く被曝を受けていることを知っておくべきである。また、四肢の撮影は、対側肢からの γ 線の入射を防ぐために、肢間に鉛布を



図3 対側肢からのγ線の入射を防ぐために、肢間に鉛布を挿入して遮蔽する。



図4 撮影終了後、馬は管理区域内の入院室に収容される。

挿入して遮蔽する（図3）。約2時間の検査終了後、放射線管理区域馬房に戻され、翌日まで収容される（図4）。これは、馬の飼い主が被検馬から受ける被曝を防ぐためである。検査の翌日、表面線量率を測定し、 $20\mu\text{Sv/時}$ 以下になっていれば帰宅できる。なお、日本のガイドラインでは、放射性医薬品投与後48時間収容と定められている（<http://jsvetsci.jp/pdf/guideline-01.pdf>）。

撮影中、鎮静作用によるモーションアーチファクト（馬がコックリコックリと動くことで画質の低下をきたすこと）が現れる場合がある。そこで、画質改善の方法として、体動補正ソフトウェアが使用される。画質の向上により、撮影時間短縮が図られ、結果として撮り直しの回数が減る。これは、単に検査時間短縮というよりも従事者の外部被曝低減に寄与

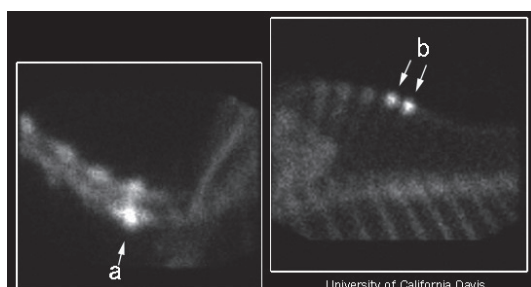


図5 症例の骨シンチグラム 第6－7頸椎間(a)および第9、10胸椎棘突起の先端(b)に集積を認めた。

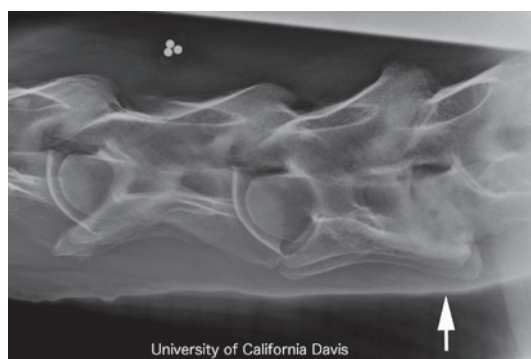


図6 同症例のX線像 第6－7頸椎の椎間板脊椎炎と診断された。

している。馬の場合、放射性医薬品の投与量が多いため、従事者が受ける外部被曝も多くなる可能性がある。将来、日本に馬の骨シンチグラフィーが導入された際には、線量測定データを蓄積し、従事者の放射線防護について獣医核医学ガイドラインにフィードバックさせるとともに、従事者の外部被曝がさらに少なくなる検査プロトコルの開発が必要であろう。

骨シンチグラフィーが有用であった症例（16歳のMorgan種）の骨シンチグラムを示す。身体検査では頸部の硬直感が認められ、骨シンチグラムでは、第6－7頸椎間および第9、10胸椎棘突起の先端に集積を認めた（図5）。骨シンチグラフィーで異常集積として判断された部位に据置型装置で高電圧X線撮影を実施したところ、第6－7頸椎の椎間板脊椎炎と診断された（図6、矢印）。また、第9、10胸椎棘突起はX線像から臨床的な異常はないと判断された。

表 1 核医学検査従事者の検査日の外部被曝線量

検査日 1 (小動物 1 件、馬 1 件)			
従事者	実効線量 (μ Sv)	皮膚(手指)等価線量 (μ Sv)	
		左	右
RIの準備と動物を扱っていた人	27	110	80
動物を扱っていた人	13	40	40
馬の頭部を保定していた人	22	0	40
見学者	5	0	10
検査日 2 (小動物 4 件、馬 1 件)			
従事者	実効線量 (μ Sv)	皮膚(手指)等価線量 (μ Sv)	
		左	右
RIの準備と動物を扱っていた人	18	70	60
動物を扱っていた人	23	60	40
馬の頭部を保定していた人	17	50	50
見学者	5	50	50
検査日 3 (小動物 1 件)			
従事者	実効線量 (μ Sv)	皮膚(手指)等価線量 (μ Sv)	
		左	右
RIの準備と動物を扱っていた人	4	20	30
動物を扱っていた人	1	0	10
見学者	0	0	0

※核医学検査が実施された日に、管理区域入室時から退室時まで即読式個人線量計（マイドーズミニPDM117、アロカ）と指輪型線量計（千代田テクノル）を装着した。実効線量（体幹部被曝線量）は、マイドーズミニPDM117で測定された1センチメートル線量当量を141keVのエネルギー特性にあわせて補正した。皮膚等価線量（手指被曝線量）は、指輪型線量計を日本に持ち帰り研究用に測定を依頼し、生数値について放射線管理区域に持ち込まなかった対照の指輪型線量計の平均をバックグラウンドとして、装着した指輪型線量計の数値から差分した。なお、指輪型線量計は、航空機で移動する際X線手荷物検査を通さず、対照とともに常時フィルムプロテクター内で保管した。

※※実効線量に比較して、手指の等価線量が高かった。また、馬の検査があった日の被曝線量が多く、小動物のみの日は少なかった。さらに、小動物のみの検査であった日は、手指被曝線量が体幹部被曝線量の10倍程度あったが、馬の検査があった日は体幹部被曝線量と手指被曝線量との比が少なかった。被検動物を線源ととらえた場合、小動物が点線源であることに対して、馬は線源が大きく面線源となり、小動物が線源との距離の影響を大きく受けることに対し、馬では距離の影響が小さかったためと考える。

※※防護服は装着していない。

カリフォルニア大学における核医学検査従事者の検査日の外部被曝線量を（表 1）に示す。核医学検査実施日に、従事者に放射線管理区域入室時から退室時まで個人線量計と指輪型線量計の装着を依頼し、線量を測定した。4 - 5 mの距離を保ち検査を見学していた筆者

の線量は、RIの準備や動物の保定に関与した従事者よりもはるかに低かったことから、距離が被曝線量に影響していたことが判断できる。核医学検査に従事する際は、放射線防護の体系の理解とともに、外部放射線被曝防護の三原則（遮蔽、距離、時間）を常に意識して検査に臨むべきである。また、カリフォルニア大学の大動物放射線技師の平均年実効線量（3.0mSv）は、日本の診療放射線技師（0.8mSv）よりも高かったが（FBNews. 441号、12、2013）、日本の職業被曝限度（5年で100mSv、但し1年50mSv以下）以下であった。

2. 馬の骨シンチグラフィーが日本に導入された場合の課題

1) 被検馬の馬肉が食肉として流通してしまった場合

馬の骨シンチグラフィーが実施されている海外の国では馬肉を食べる習慣がない。しかし、日本人は馬肉を食べる食文化の違いがある。つまり、日本では核医学検査を受けた馬の肉が、ヒトの口に入る可能性が全くのゼロではない。もちろん、検査履歴は厳重に管理しなければならないことは、今更述べるまでもない。では、もし万一骨シンチグラフィーを実施した馬の馬肉が食肉として流通してしまいヒトが食べてしまった場合、ヒトは内部被曝の影響を受けるであろ

うか。物理学的半減期6時間の ^{99m}Tc は10半減期（60時間）で千分の一に、20半減期（120時間）で百万分の一に減衰する。また、 ^{99m}Tc は、尿中に速やかに排泄されるため、生物学的半減期も考慮すると、動物に残留するRIは限りなくゼロに近い。少なくとも、日本で定められている

食品の放射性セシウムの規制値 (100Bq/kg) を越えるとは考えられない (www.mhlw.go.jp/shinsai_jouhou/dl/leaflet_120329.pdf)。セシウムもテクネチウムも、未知の化学物質ではなく、問題となるのはRIから発する放射線である。もともと、ヒトは自分自身の体内に4,000Bqの⁴⁰Kを保有し、自分自身の体から年間0.2mSv程度の内部被曝を受けている。とはいえ、公衆の安全を担保するために、ヒヤリハットに対応した放射線防護の検証は必要である。

2) 汚染した敷料の廃棄方法

放射線管理区域内馬房のRIを含む敷料は、従事者に対する外部被曝を及ぼすため、カリフォルニア大学では、敷料を10半減期以上経過後に一般廃棄物として処分していた。(欧州では1週間後に廃棄の施設が多い。)しかし、日本の獣医核医学ガイドラインでは、糞尿を含む敷料は放射性廃棄物と定められている。将来、バックグラウンドと同程度の線量率の敷料は、免除レベル以下の一般廃棄物として取り扱うことができることを裏付ける科学的データの蓄積が必要である。実現までは、収容室内の敷料には、牛床マットやスポンジを使用し、糞尿は収容室内で水洗浄、汚染水のみを貯留槽で減衰させることが現実的である。

3) 高額な維持費用

核医学検査施設は、非密封放射性同位元素の使用施設となるため、高額な建設費用が発生する。また、施設の維持費用は、 γ カメラの保守契約が700万円 (メーカーの試算)、管理区域の保守が700万円、廃棄物が500万円程度発生する。さらに、⁹⁹Mo-^{99m}Tcジェネレータ (7.4GBq、メジテック、日本メジフィジックス) で薬剤を週に4回抽出した場合、検査1回の薬剤費用は、48,500円である。初期投資と維持費用が高額なところは、頭の痛い課題である。それでも海外では馬の骨シンチグラフィーが産業として成り立っていることから、日本でも核医学検査の有用性が認められれば、競走馬を中心に需要は期待できる。また、臨床での有用性に加えて、グローバル社会に通用する獣医師養成における重要性を考えると、日本

への導入は、国全体として費用に見合う効果があると思う。

3. 今後の展望

2020年の東京オリンピック開催が決定した。7年後には、馬術の競技にあわせて、選手とともに多くの競技馬が来日する。また、最近では競走馬の海外との交流も活発となっている。来日した馬の獣医師が、日本滞在中に馬の骨シンチグラフィーを必要とする機会は必然的であろう。日本中央競馬会のトレーニング・センター (栗東、美浦)、北海道や九州の生産 (日本中央競馬会日高育成牧場、宮崎育成牧場、社台ホースクリニック、日高地区農業共済組合、日高軽種馬農業協同組合、日本軽種馬協会) と連携した馬の核医学検査施設が日本に一カ所でもあれば、獣医療サービスの向上が期待できる。さらに馬の核医学検査施設が獣医学教育のための全国共同利用施設となれば、海外に見劣りしない獣医療サービスの提供に加えて国際水準の獣医学教育が実現する。日本でも、馬の骨シンチグラフィー導入の機運が高まることを期待する。

謝 辞

本稿執筆にあたりUniversity of California Davis, Diagnostic ImagingチームのProf. Erik Wisner, Mr. Richard Larson, Mr. Jason Peters, Ms. Jennifer Harrisonに核医学検査見学の機会をいただくとともに、線量測定にご協力いただいた。御厚意に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

著者プロフィール

平成2年帯広畜産大学獣医学科卒業。平成9年岐阜大学大学院連合獣医学研究科博士課程修了。平成12-13年文部科学省在外研究員 (カリフォルニア大学デイビス校)。平成20年帯広畜産大学教授、現在に至る。専門は獣医放射線学。第1種放射線取扱主任者。

整合性のある原子力システム



藤家 洋一*

1. 「整合性のある原子力システム」って何ですか？

天然原子炉は水の沸騰と凝縮を使って核分裂の連鎖反応を固有の安全性に頼って制御し、80万年の長期運転、放射性物質の格納および放射能自然消滅など、燃料の増殖を除いて今後の原子力システムが満たすべき方向と方策を与えてくれます。ここでは「整合性のある原子力システム」として核分裂反応の持つ固有の特性を生かしながら、資源の完全リサイクル使用と有害物質を環境に出さないゼロリリースが同時に達成できる核分裂エネルギーシステム概念を提示します。あえて社会的表現をとるとすれば「資源確保と環境保全の同時達成」として理解できます。図1はこれを機能別に表現したもので、核分裂反応が持つ能力の範囲すなわち核分裂反応で開放される約3個の中性子と約200Mevのエネルギーを使うことでこれが科学的にどこまで達成可能か考えましょう。

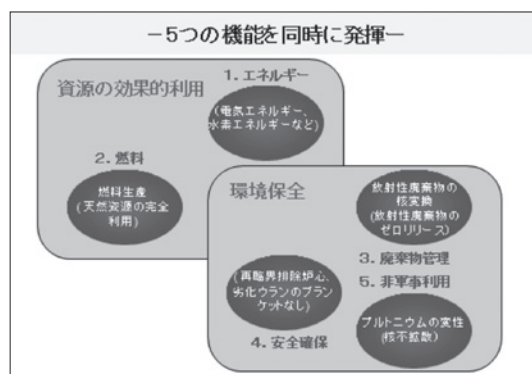


図1 資源確保と環境保全を同時に達成する原子力システム概念

前回最後にお話したように、整合性のある原子力システムとは5つの機能、すなわち

1. 電気や水素エネルギーのような良質のエネルギーを供給し、(エネルギー生産)
2. プルトニウムのような長期に渉る燃料資源を生産し、(燃料生産)
3. 放射性廃棄物の放射能を消滅あるいはシステム外に放出せず、(放射性廃棄物の無放出または非放射化)
4. 原子炉を止める、冷やす、さらに放射性物質をシステム内に閉じ込めることで安全を確保し、
5. 核兵器に転用しにくい、核拡散抵抗性のある燃料を生産する。

を満足する原子力システムとここで定義しましょう。この議論で最初は核不拡散の議論は抜いていましたが、まだ世界は完全に核の脅威から開放されていないと考え、またこの機能が核燃料の性格を変えることでほかの4つの機能と同じ視点で捉えることが出来ると分かり、5つの機能を同時に扱うことにしました。図1では1と2を資源確保につながる機能として、3、4、5を環境保全につながる機能として表現しています。

これらの5機能を同時に満足する原子力システムを、「自ら整合性のある原子力システム」略してSCNES (Self Consistent Nuclear Energy Systemの略) と呼ぶことにしましょう。このシステムは端的には高速炉と核燃料サイクルを含むシステムで、加速器やレーザーなどの原子力を代表する装置が動員されることになるでしょう。

最初にエネルギー資源について触れておきま

* Yoichi FUJIE NPOニュークリア・サロン 代表理事 / NPO法人放射線安全フォーラム 顧問

すと、文明を長期にわたって少なくとも100万年支えるためには、資源があるだけでなく、環境との折り合いのよさを考えておくことも大切でしょう。これまでたとえば原始時代に太陽エネルギーの利用で数百万年過ごし、火の発見と利用で切り拓いた化学エネルギーの時代を百数十万年すごしてきた人類が産業革命でエネルギー変換を人工的に可能にし、機械エネルギーや電気エネルギーの利用にいたって、質、量ともに豊かな資源利用の世界を実現させましたが、わずか200年足らずで化石エネルギーの大量利用がもたらす、資源確保、環境保全両者に対する難しい課題に直面して、次のエネルギー源を求めることも課題になりました。

人類は最初に太陽光線を主たるエネルギー源としてきました。そのあと火の制御に始まる化学エネルギーを100万年を超える期間利用してきました。原子力もそれだけの資源があります。例えばウラン238は海中に40-50億トンあると言われており、その半減期が長いこともあって十分100万年の資源になりうる可能性を持っています。

その場合も現在議論されているように軽水炉利用では効率も悪く、高速炉に頼る以外にないでしょう。ここではシステムの中心となる核分裂炉は高速炉を考えています。

もちろん、新しい科学技術があるべき姿に一気に到達する事は出来ず、地道な努力を重ねるのが技術開発の正道です。巨大技術については特にそう言えます。プルトニウムの軽水炉利用もリサイクル燃料の中間貯蔵も再処理も、また地下埋設の研究もあるべき姿へ向けての途上にあると理解し、さらに原子力を単に技術に特化することなく政治、社会、経済、外交などを含む広い観点から論議できる様にしたいものです。

2. 整合性のある原子力システムの科学的成立性

ここでいう「整合性のある原子力システム」(図2)は科学的概念です。自然や人類社会と調和でき、将来に夢を持たせる原子力システムのあるべき姿なのです。単に願望でなく科学的概念というからにはその成立性については証明が必要です。「整合性のある原子力シ

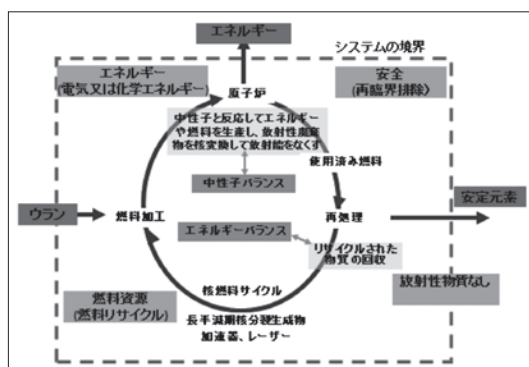


図2 整合性ある原子力システムの概念図

テム」の科学的成立性は核分裂反応の持つ能力の範囲で証明されなければならないことは言うまでもありません。

SCNESの持つ5つの機能が核分裂反応で出てくる約3個、正確には平均2.9個の中性子と同時に解放される約200Mevのエネルギーを使って達成できることを言えば科学的証明といえるでしょう。「整合性のある原子力システム」とは曲がり角を迎えた化石エネルギーに依存した文明が資源確保と環境保全の同時満足が出来ない宿命を負っているのに対して、その課題を解決し、同時に原子力の今日的課題を自ら解決しうる可能性を持つ原子力システムと言うこともできます。

図2で核分裂反応の能力の範囲でできる科学的可能性を表の数字などを使って内容を中心に説明していきましょう。

中性子の役割はまず核分裂の連鎖反応を継続すること、即ち臨界を維持することです。これが出来なければ、元も子もありません。臨界維持に核分裂中性子のうち一つが必要です。臨界が維持できれば核分裂の連鎖反応でエネルギーが解放されます。表1は核燃料サイクルに必要なエネルギーを核分裂エネルギーから供給可能ということを示しています。本来の目的がエネルギーシステムですから社会にエネルギー供給が出来なければ意味がありません。表1では核燃料サイクルに必要なエネルギーの供給、さらに熱効率を考慮してもなお核分裂エネルギーの30-40%近くがエネルギーとして社会に供給できる事を示しています。熱中性子炉でも高速炉でもエネルギー生産システムとしては十分能力があります。したがってこ

表 1 エネルギーバランス

・ エネルギー生産量(核分裂反応)	200MeV
・ プラントでのエネルギー損失 変換に際しての損失	118MeV
その他の損失	8MeV
・ 燃料サイクルでの損失 再処理	0.2MeV
長寿命核分裂生成物(LLFP)の処理での損失	0.1MeV
・ 多重処理損失	1.0MeV
・ 電気出力	73MeV

表 2 中性子バランス

		高速炉		軽水炉
		MOX燃料	金属燃料	MOX燃料
中性子発生	中性子数/核分裂	2.9	2.9	2.9
	連鎖反応継続用	1.0	1.0	1.0
中性子の消費	燃料に吸収	0.2	0.13	0.4
	燃料生産	1.0	0.85	1.3
	寄生吸収	0.25	0.2	0.25
	放射能消滅用	0.45	0.72	マイナス(<0) 中性子不足のため、放射能消滅の能力はない

れからの議論は中性子バランスが成立するかどうかを中心に進めます。

表2は核分裂反応によって生まれてくる中性子の数が十分かどうかの計算です。自分の燃料だけ作る場合には1個、増殖を考えますと1.2個ほどの中性子が必要です。高速中性子を使う高速炉では燃料が金属ウランであれ、酸化物ウランであれ可能ですが、軽水炉では核分裂で生まれた中性子だけでは中性子不足で次世代につなげる燃料の生産に必要な1.2個の中性子が提供できず、目的が果たせないことになります。軽水炉でなく高速炉で初めて増殖可能性があることを結果は示しています。したがってSCNESは高速炉が基本になります。

さて、これらを引いた残りの一個未満の中性子で放射能消滅をするわけです。(表2)を見ると高速炉では酸化物燃料でも金属燃料でも増殖は可能ですが、熱中性子炉では増殖の可能性がないので、高速炉に期待することになります。

理論的には、あまり増殖を考えないと、整合性が成り立ちます。具体的評価は核分裂中性子を使い切った後、核分裂エネルギーのうちどれだけ有効エネルギーが得られるかを評価するのが良いでしょう。この結果エネルギーが得られることは(表1)に示しています。

表 3 放射能消滅：元素分離と核種分離

- 原子炉の成立には表4-2と同じ条件が必要
- 下の表が示すように元素分離だけでは中性子不足になる。
- 同位体分離があっても(はじめて放射能消滅が)可能性を持つ
- 0.6個の中性子を使って可能になるのは、下表に示すように核種分離の場合のみ可能性がある。

放射性核種の半減期(年)	1	3	10	20	30	100	200	2000	50000
元素分離	6.78	2.07	1.99	1.23	1.12	1.07	0.95	0.95	0.95
核種分離	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.22	0.22	0.22	0.22

整合性のある原子力システムには、元素分離と同位体分離を行う燃料サイクルが不可欠

中性子は原子炉の中での核反応によって付加価値であるエネルギー生産、燃料生産に寄与する傍ら、放射能消滅のために放射性核分裂生成物とも反応します。

核燃料サイクルでは、中性子が効果的に役割を果たせるように、ウランやプルトニウムを含む超ウラン元素、放射性核分裂生成物を選別し、原子炉へ送り込みます。そのためのプロセスでエネルギーを消費します。化学的性質の違いで元素を分離するには多くのエネルギーを消費しませんが、同位体分離のためにはエネルギーが要るのが普通です。分離選別のために必要なエネルギーは核分裂で出てくるエネルギーの数%以下で済みそうです。核燃料サイクルでエネルギー消費が見込まれるのは再処理など化学反応に関するもので、理論的にその量は効率が少し悪くても核分裂の結果出てくるエネルギーに比べて小さいのです。

表3に示す計算結果は核分裂で生まれる約3個の中性子を使えばエネルギー生産、核燃料生産は出来ませんが、放射能を消滅するにはやはり中性子が足りないことを示しています。

しかしこの場合でも何らかの方法で核分裂生成物の中から、放射性核種だけを分離して放射能消滅の対象にするならこれが可能なことも同時に示しています。アクチニド元素は高速炉の中ではいずれ核分裂しますから、核燃料物質と考えておけば分離の必要はなく、核分裂生成物の中から放射性の核種を選び出せば中性子が不足しないことを表3は示しています。

この表3は、元素分離だけでなく核種分離の必要なことを示しています。ウラン濃縮も一種の核種分離です。ウラン235とウラン238は同位体でその分離は同位体分離です。軽水炉で使う低濃縮ウランを作るのもまさに、同位体

分離の例ですが、ウラン235とウラン238のわずかな質量の差を利用しての分離なのでそれほど易しくはありませんでした。軽水炉のエネルギー効率はウラン濃縮の効率に大きく影響されてきました。しかし、ガス拡散法から遠心分離法になって改善され実用化されました。今レーザーによる濃縮が研究され、さらなる効率改善が計られています。このような研究開発の流れの中で見ますとレーザー法が将来の放射性元素の同位体分離に使われる可能性が高いと思います(表3)。しかし、決して易しい技術開発ではありません。分離選別のために必要なエネルギーは核分裂で出てくるエネルギーの数%以下で済みそうです。核燃料サイクルでエネルギー消費が見込まれるのは再処理など化学反応に関するもので、理論的にその量は効率が少し悪くても核分裂の結果出てくるエネルギーに比べて小さいのです。

SCENSではこの核種分離にレーザーを使うことを考えています。

表4は軍事転用がしにくい核拡散抵抗性のある燃料を生産するために金属ウラン燃料と酸化物燃料を比較したのですが、どちらの場合も現在の高速炉で使用する燃料形態のままで十分であることを示しています。

また炉心周辺に装荷するブランケットにウラン濃縮に使った後の劣化ウランを使うことがこれまでの高速炉の開発計画では考えられてきましたが、劣化ウランをブランケットに装荷しますと中性子吸収の結果純粋なプルトニウムが出来ることになり、核不拡散の観点から望ましくないとの観点からSCENSでは劣化ウランの装荷はしません。

表4 核拡散抵抗性の確保

中性子の反応	中性子数		条件
	酸化物燃料	金属燃料	
1. 濃縮反作用 プルトニウムによる核分裂 (N_{Pu}) その他の核分裂 (N_{fiss})	1.00 0.80 0.20	1.00 0.72 0.28	$N_{\text{Pu}}/N_{\text{fiss}} \approx 1.0$
2. 燃料生産 (核分裂性Puの生産) ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu 吸収 (N_a)	0.28 0.98	0.23 0.83	増倍比: $(N_{\text{fiss}}/N_a) (N_{\text{Pu}}/N_{\text{fiss}}) \geq 1.0$
3. 核子拡散For Pu Protection (目標: 原子炉級Pu (Np)) 核分裂性 ^{239}Pu , ^{240}Pu 吸収 (N_a) ^{239}Pu , ^{240}Pu 吸収 (N_a) ^{241}Am 吸収 (N_a)	0.24 0.20 0.02 0.02	0.16 0.13 0.02 0.01	$(N_{\text{fiss}}/N_a) \geq 0.18$ ≧ 原子炉級の Pu or $N_{\text{Pu}}/N_{\text{fiss}} \geq 0.18$ ≧ 原子炉級 Pu
4. For 長半減期核種濃縮(LLFP) LLFP 吸収 (N_a)	0.24 0.24	0.24 0.24	$T_{1/2} > 1$ 年 核分裂生成物の核変換
5. その他の	0.21	0.17	
合計	2.69	2.42	
核分裂中性子数	2.90	2.90	

1) 基本データ: 濃縮反作用、燃料増大: Nuclear Energy System for a Sustainable Development, Perspective - Self-Consistent Nuclear Energy System, "Progress in Nuclear Energy", Vol. 40, No. 3-4, pp. 255-282, 2002. Re-composed by H. Sugano
2) MA composition data at equilibrium state are derived from "A. Mizutani, A. Shono and M. Iwakura, "Investigation of Equilibrium Core by Recycling MA and LLFP in Fast Reactor Cycle(I)", JNC TN9400 99-043 (1999)

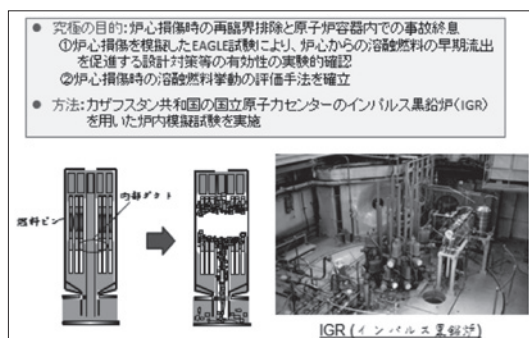


図3 安全確保—再臨界排除、(図3再臨界排除の原子炉内実験)

原子力発電の安全確保が原子炉を異常に際して止める、冷やすそして放射性物質を閉じ込めることにあり、深層防御の考え方に沿って安全を確保していますが、中でも高速炉は原子炉を止めることが安全確保上最も大切です。これは万一の事故に際しても原子炉が連鎖反応を停止し、その後再び臨界に達する能力がないようにしておくことです。今回福島で起こった事故の際も再臨界の話が出ました。しかし、スリーマイル島事故の場合と同様再臨界現象は起こりませんでした。

軽水炉に比べて高速炉は再臨界の問題は最初から考慮され、炉心崩壊事故に伴う再臨界問題は安全確保の上から対策が採られてきました。「もんじゅ」でも対応してきました。

一方軽水炉でも再臨界排除を考えたものがフィンランドで建設中です。このための設計上の配慮は制御された状態で核燃料物質を原子炉の心臓部である炉心から外部に避難させるようにしています。この動作も人間が外部から制御するのではなく物質の融点の差を利用しています。これらの配慮で核分裂炉の基本である連鎖反応に直接関連した安全問題を解決しようとしています。この目的でカザフスタンに依頼し、研究に適した実験炉 (EAGLE) を使って炉内実験を行い、再臨界排除が可能なることを理論だけでなく、実験でも証明しています。

私は最近の原子力開発の議論で高速炉開発や核燃料サイクル開発を否定するかの議論に対して、この両者を否定するのは原子力開発をやめることと同じだと反論してきました。以下はその観点からの議論とご理解いただければと思います。

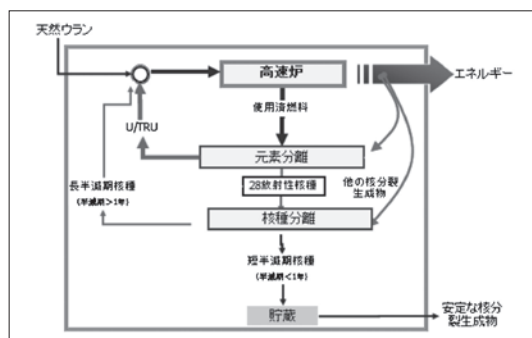


図4 究極の核燃料サイクル：究極の目標への歩み

3. 原子炉と燃料サイクルの協調

軽水炉やガス炉あるいは重水炉や高速炉など原子炉の種類は多くまた核燃料サイクルにも直接処分、再処理、廃棄物処理、再処理のなかでもピューレックス法や乾式再処理法など多くの概念やシステムがあります。これらはどう理解すればいいのでしょうか。

原子力システムに於いては、原子炉と燃料サイクルの協調が大切です。原子炉と核燃料サイクル、両者はどんな相互関係に有るのでしょうか。

簡単に言うと、原子炉は核分裂を含む中性子の核反応によって原子力の持つ付加価値を生み出す処です。此处で言う付加価値とは、核分裂によるエネルギーの生産、ウラン238がプルトニウムに転換することによる核燃料の生産、更に、放射性物質の非放射性物質への転換等です。付加価値は、中性子の核反応によって生み出されますが同時に核反応によって放射性物質が生まることにもなります。生まれた放射性物質は放射能と言う観点だけから捉えればマイナスの価値になります。一方、核燃料サイクルは物質を分離や混合する事を通じて付加価値生産のための材料を調整、調合する事が目的です。このように、原子炉は付加価値の生産場所として、核燃料サイクルは付加価値生産のための物質の調合、調整の場所と考えるのが分かりやすいでしょう。

さて原子炉は中性子の運動場で、其処では中性子がいろいろな物質とぶつかり合っています。原子炉には、燃料、冷却材、構造材などが有ります。中性子はこれらを構成する原子と散乱、吸収あるいは核反応を行って、生まれたり、無

くなったりします。この間、中性子との反応によって、原子炉の中で原子核の変換がおこなわれ、核エネルギーが解放される傍ら新しい元素が生まれます。超ウラン元素や、核分裂の結果生まれる核分裂生成物が主なものです。もちろん構造材などの原子が中性子を吸収して出来る放射性物質も少しあります。しかし燃料の中の原子がその主な対象なので、燃料を中心に考えることが良いでしょう。

さて、燃料を作って原子炉に送り込み、一定期間原子炉の中で燃やした後、使用済みになった燃料を取りだします。使用済み燃料を直接地下埋設する方法もありますが、使用済み燃料を処理して燃料として使えるものを再利用する一方、不要なものを処理、処分して資源の有効利用と環境負荷の低減を図る事も考えられます。この一連のプロセスを核燃料サイクルと呼んでいます（図4 究極の核燃料サイクル概念図）。

藤家洋一プロフィール

略歴：

1935年 兵庫県生まれ
 1958年 東京大学理学部物理学科卒業
 1960年 東京大学大学院数物系研究科物理学専門課程修士課程修了
 1963年 東京大学大学院数物系研究科電気工学専門課程博士課程修了
 1968年 大阪大学工学部原子力工学科助教授
 1971年 カールスルーエ原子力研究所客員研究員
 1972年 ベルリン工科大学客員教授
 1980年 名古屋大学プラズマ研究所教授
 1986年 東京工業大学原子炉工学研究所教授
 1989年 東京工業大学原子炉工学研究所所長
 1995年 原子力委員
 1996年 東京工業大学名誉教授
 1998年 原子力委員長代理
 2001年 原子力委員長(民間人として初代委員長)
 2002年から 広島大学学術顧問、現在に至る
 2003年 米国エネルギー省から日米原子力協力促進への貢献に対し感謝状
 2004年 原子力委員長 退任
 DOE藤家フェローシップ創設
 2011年から特定非営利活動法人ニュークリア・サロン代表理事、現在に至る

受賞歴：

1991年 原子力安全功労者表彰(科学技術庁長官賞)
 1993年 エネルギーフォーラム賞
 2006年 旭日重光章(秋の叙勲)

主な著書：

1982年 「原子力：核エネルギーの解放とその利用」(関西原子力懇談会)
 1992年 「21世紀社会と原子力文明－宇宙エネルギーをつくる」(電気新聞出版)
 1995年 「原子力－総合科学技術への道」(電気新聞出版)
 1998年 「リサイクル文明が求める原子力－その全体像と長期展望」(電気新聞出版)
 1998年 「原子力タイムトラベル」(ERC出版)
 2003年 「核燃料サイクル－エネルギーのからくりを実現する」(ERC出版)
 2005年 「原子力－自然に学び、自然を真似る」(ERC出版)
 2013年 「原子力の本当の話」(産経新聞出版)

日本の存在感示す 「アジア原子力協力フォーラム」

元・原子力委員 町 末 男
(FNCA日本コーディネーター)



原子力発電が必要なアジア

日本が主導するアジア原子力協力フォーラム(FNCA)は日本でありよく知られていない。アジアの国の原子力担当の大臣または副大臣が緊密に議論して具体的な協力活動を進めているユニークなアジア協力の枠組みがFNCAである。その第14回大臣級会合が12か国の代表の参加を得て、日本の原子力政策担当の山本大臣の議長で昨年12月19日に東京で開催された。



開会の演説をする山本一太大臣

山本大臣はFNCAが参加国の社会・経済発展に役立つ成果を得ている事を強調した。福島事故後の原子力政策については、安定供給とコスト低減などの観点から、原子力発電を重要なベース電源として位置付け、現在停止中の原子力発電所については、安全が確認されたものについて、逐次再稼働していく事を明言された。

原子力発電の議論では、電化率50%と低いバングラデシュの原子力委員長は13年10月2日に首相の出席の下で最初の原子力発電所建設の起工式が行われたことを画期的な進展として報告した。ベトナムの科学技術副大臣は原子力発電の最初の2つのプロジェクトはロシアと日本の協力で行われており、人材育成が

緊急の課題であるとのべている。中国代表は原子力発電17基が運転中、30基を建設中と福島事故後も原発拡大計画を強力に進めている事、韓国代表は運転中23基、24年までに新たに11基を運転する拡大計画を発表した。

放射線利用プロジェクト成果の 実用化戦略が重要

FNCAの活動の中で、「バイオ肥料」、「天然高分子の放射線加工」、「品種改良」のプロジェクトでは、収穫増、農薬の削減によって、持続的農業を促進に役立つ成果が得られており、マレーシア、ベトナム、フィリッピン、インドネシアなどで実用化が進んでいる事、子宮頸がんの放射線治療プロジェクトでは新プロトコルでⅢB期の患者について5年生存率72%という好成績を収めたことなどを筆者が報告し、これらの成果の実用化を各国で一層促進する事が課題である事を指摘した。

核セキュリティ文化の醸成

核セキュリティの強化は重要な課題である。FNCAは2011年に「核セキュリティ・保障措置」プロジェクトを開始し、情報の共有、人材の育成を進めている。日本は原子力機構の核不拡散・核セキュリティ総合支援センターの活動を通して各国の「核セキュリティ文化の醸成」を支援することを文科省が表明した。

この様にFNCAはこれからも参加国のニーズに応えた活動をパートナーシップに基づいて推進していく。

(2014年1月30日稿)

ISMTR- 6 に参加して －試験炉を活用する－

大洗研究所 アドバイザー 棚瀬 正和

茨城県大洗町にあるJMTRを含めて、各国の照射試験炉（研究炉を含む。以下試験炉）の現状と将来計画などについての情報交換を通じ、各炉が持っている課題を解決し照射利用の拡大を図ることを目的とした、ISMTR-6（6th International Symposium on Material Testing Reactors）に出席した。この会議は毎年行われており、今回は6回目で、南米アルゼンチンのバリローチェで、昨年10月下旬に3日間の日程で開催された。その会議の内容や会議後の印象などを述べる。参加者は主催国のアルゼンチンが最も多く、日本がこれに続き、米国、韓国、ポーランド、オーストラリア、オーストリア、エジプトからの合計59名であった（写真1）。

I. 会議の内容

主催者としてアルゼンチン原子力委員会から開会の挨拶があり、会議が始まった。

セッション1 試験炉の現状と将来計画

最初に、IAEA国際センター（ICERR）から、

各国の原子力に関する技術支援・推進に役立つ幅広い事業を行っており、研究炉利用に関するコスト削減などに貢献しているという紹介があった。また、アルゼンチンのRI製造や材料照射試験を行う新しい試験炉RA-10（30MW、他の試験炉を含め、以下RA-10炉のように表記する）は2018年の運転を目指している。⁹⁹Moの生産は4,000 Ci/週まで可能になる。韓国のHANARO炉では新しいいくつかの原子炉建設計画があり、⁹⁹Mo生産炉の建設も期待されている。さらに、アルゼンチンの州立応用研究所（以下INVAP）では2つの新しい試験炉（RA-10炉；アルゼンチン、RMB炉；ブラジル）の設計を終え、サウジアラビアの試験炉の建設を始めている。INVAPは、国内外の原子炉施設、燃料取扱施設、RI製造施設などの建設に幅広く関与している。

JMTRでは、再起動に必要な改修を終えていたが、福島第一原子力発電所（以下、F1）の事故に呼応した新しい基準が昨年末制定され、この基準に沿った対応が求められている。



写真1 ISMTR-6の参加者

セッション2

照射試験と照射後試験の推進

日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）から、F1の廃炉を推進するための、RIの分析と研究用の施設、および遠隔操作設

備などの開発棟の2つからなる研究施設の建設についての具体的な構想が述べられた。韓国からは、HANARO炉での中性子場の線量評価プログラムの改良と高温照射が可能なキャプセルの開発についての成果が報告された。オーストラリアから、新しい測定機器を備えた、高放射能下での操作が可能な照射後試験施設についての説明があった。

JAEAから、シビアアクシデントの下でも正常に働くモニタリングカメラの試験の結果について、詳しい報告があった。

セッション3 産業利用の拡大

INVAPは、RA-6炉に設置するRI製造開発用施設で、 ^{99}Mo の製造用ターゲットを高濃縮ウラン（以下HEU）から低濃縮ウラン（以下LEU）に換える計画を進めている。しかし、分離法の詳細は不明であった^{*1}。また、エジプトのETTR-2炉のRI製造施設では、核分裂生成物（FP）から ^{99}Mo を分離・製造しているが、一昨年からはLEUターゲットを使用して製造している。ポーランドのMARIA炉によるHEUを使った核分裂生成物 ^{99}Mo の製造は、2010年から行われている。JAEAの共同研究の成果として、照射したMoを使ったジェネレータからのMo（ ^{99}Mo ）のリサイクルに関する報告があった。また、JAEAから、京大原子炉（KUR炉）で照射した高密度 MoO_3 ペレットで生成した $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ を使った、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の製造についてJMTRホットラボで行われた成果が報告された。そのあと、インドネシアBATAN研究所で行った $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製造試験の成果を、当社の太田朗生研究員が報告した。この記事の後で詳しく述べている。

*1：この点について、INVAPの関係者に、講演後、聞いた。分離法の詳細は、相手側との契約で公開することはできないという。別途、アルゼンチンの ^{99}Mo の生産は、現在、HEUターゲットにより毎週500 Ciの規模で、エセイサ研究所（CAE）で行われており、国内およびブラジルに出荷されているということであった。

セッション4 革新的試験炉の設計

INVAPからの報告で、医療、中性子ラジオグラフィーなどに有用な低出力原子炉について評価した。また、RI製造用のRA-10炉は、LEU燃料を使用して建設される。この炉のガイドボックス（原子炉の反応度を調整する）の機械的設計について述べた。さらに、物質科学の進展に必要な冷中性子源を安価に得るため、液体重水素を使った場合について評価した。

セッション5 経年管理

JMTRは、低レベルの液体廃棄物の漏洩が見つかった輸送パイプの亀裂を可搬型の γ 線ラジオグラフィーで観察し、その有用性を明らかにした。アルゼンチンには6基の研究炉があり、各炉の経年劣化の状況を具体的に示すとともに、新たに管理グループを組織した。米国マテリオン社から、中性子反射材として有用なBeの試験炉への利用について、最近の活動が紹介された。また、同社は日本の大学と共同し、異なる品質を持つ3種類のBe金属のデータベース化を進めている。

セッション6 人的資源と教育訓練

新しい研究炉の安全な運転は、設備の適切な設計とともに運転員自身の素養にもよっている。INVAPでは、運転員の訓練に必要な、思考訓練、特定区域での訓練などの項目の内容を詳細に示すとともに、中性子と物質との相互作用に基づいた原子炉挙動を予想するシミュレーションコードを作成し、教育訓練に役立たせている。

セッション7 試験炉燃料の設計、安全評価、燃料転換

燃料の設計では、アルゼンチンからU-Mo

燃料に関する報告が3件あった。U-Mo燃料とAl材との空隙の生成を抑えるため、Al材中のSiの役割などについて検討した。また、U-Mo合金と被覆材のZr-4合金を使ったプレート薄層製作工程について述べた。さらに、U-Mo燃料にZrH₂を組み合わせる方法を提案した。

安全評価では、バリローチェ原子力センターからの報告で、炉水の熱水力解析で重要な各所の水速度を、模擬炉心を組立て、タービンタイプの流速計で測定・評価した。

燃料転換に関しては、米国からの報告で、MURR炉の燃料転換に際し、Be反射材の寿命について検討した。また、すでにLEUに転換されているRA-6炉は、実験により安全評価コードを改良した。

会議全体の内容、すなわち、各セッションでの講演についてまとめが行われた。また、今回はポーランドで2014年10月末に行うことになり、その国から参加者への招聘の挨拶があった。

II. 会議の印象

この会議は試験炉に関する幅広い範囲をカバーしていたが、その中心は使用済Beのリサイクルと⁹⁹Mo/^{99m}Tcの製造であったと感じている。

Beについては、ISMTR-6の本会議の前に行われた使用済Beの技術会合での議論も含め、大きな話題であった。使用済みの反射材Beは、日本では3t、世界ではその10倍量程度が保管され、その処理の用途は全く立っていない。そのような状況で、JAEAからその処理法や利用法が提案され、このプログラムをF1の廃炉作業の一部として具体的に組み入れようとしている。JAEAは、会議参加者の協力も得つつ実施することを望んでいた。

一方、⁹⁹Mo/^{99m}Tcの製造については、(n, f)⁹⁹Moの動向と(n, γ)⁹⁹Moの製造に注目されているように思われた。世界では、一般に(n, f)

⁹⁹Moによって製造が行われており、この方法の関心事は、ターゲットのHEUからLEUへの切り替えである。その速度は遅いが、各国はそれに向け、それぞれ努力している。また一方で、核燃料物質のUを使わない方法もあり、いろいろ提案されている。その中で我々の提案である。これに関する報告は今回が3回目で、(n, γ)⁹⁹Moを使った成果を聞き「いい結果ですね、おめでとう」と言ってくれた研究者もいた。

III. 会議を超えて

「多量の放射性物質が欲しい」

現在、JMTRの再稼働が平成26年度後半であるという状況がある。一方で、⁹⁹Mo/^{99m}Tcの製造技術開発には放射性物質⁹⁹Mo/^{99m}Tcを必要とする。そのため、日本で唯一稼働していた京大の原子炉、KUR炉での照射で得られた数mCiの放射能により開発を進めた。この技術開発には、取り扱う放射能も大切で、そのスケールアップも重要な要素である。そのため、我々は海外の原子炉も視野に入れた⁹⁹Mo/^{99m}Tcの取得を目指している。

このような中、今回ポーランドのMARIA炉の関係者も参加されており、休憩時間にJAEAの⁹⁹Mo担当者がその話を持ち出した。その結果、ターゲットのMoO₃を無償で照射しても良いとの内諾を得た。この炉では、数mCiの1,000倍の放射能を得ることができる。このキュリーオーダーの放射能により、今後の⁹⁹Mo/^{99m}Tcの製造技術開発が大きく進展することが期待できる。

このようなポーランドの対応は、この会議の趣旨である「各炉が持っている課題を解決し照射利用の拡大を図ることを目的とする」に当たるもので、会議の開催が極めて重要であると感じた。さらに、このポーランドの対応が、我々の⁹⁹Mo/^{99m}Tcの製造技術開発の発表内容がその後押しをしたのであれば望外の喜びである。

ISMTR- 6 での発表

“Development of ^{99m}Tc production from $(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ based on solvent extraction and column chromatography”

大洗研究所 太田 朗生

1 はじめに

ISMTR (International Symposium on Material Testing Reactors) は、2008年に大洗で第1回が開催されました。その後も材料試験炉のユーザー、オペレーター、材料試験炉の専門家が知識や経験を情報交換するために、毎年、日本、アメリカ、チェコで開催されてきました。第6回を迎えた今回はINVAP社(アルゼンチン)主催の下、アルゼンチンのバリローチェで開催されました。千代田テクノルからは、第4回からJMTRを用いたRI診断用 $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ の国産化を目指した研究について棚瀬アドバイザーが発表をしておりましたが、今年は太田が、昨年インドネシア原子力庁(BATAN)で行った「 (n, γ) 法で製造した ^{99}Mo を用いた1Ci相当の ^{99m}Tc の回収率の評価」の実験の研究発表を行いました。

2 発表セクション

ISMTR-6は10月29日(火)～10月31日(木)の期間開催されました。会議は8つのTopicから構成されており、私の発表は10月30日(水)の午前中にあるTopic2内に組み込まれていました。

Topic2では、日本国外からはD. AMAYA氏 (INVAP)、J. MERINO氏 (INVAP)、J. JAROSZEWICZ氏 (MARIA炉; Poland)、日本からは私以外に、掛井氏(太陽鋳工)、土谷氏(日本原子力研究開発機構)が発表を行いました。私の順番はTopic2の最後となり、「Development of ^{99m}Tc production from

$(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ based on solvent extraction and column chromatography」というタイトルで口頭発表(英語)を行いました。

3 発表内容

今回、私は2012年にインドネシアのBATANで実施した (n, γ) 法での製造による ^{99}Mo を用いた1Ci相当の ^{99m}Tc のアルミナカラム法による回収率の評価について報告しました。このアルミナカラム法について以下に簡単に説明します。

【実験方法】

- ①照射された MoO_3 を NaOHaq. で溶解し、 Tc の同族元素である Re の安定同位体を添加します。 Re は Tc に似た化学的挙動を示し、微量の Tc がラジオコロイドを形成することを防止するためのキャリアとして加えています。
- ② NaOHaq. から MEK (Methyl Ethyl Ketone)によって $^{99m}\text{Tc}(\text{Re})$ を溶媒抽出します。(抽出工程)
- ③ $^{99m}\text{Tc}(\text{Re})$ を含んだ MEK から Mo 等の不純物を塩基性アルミナカラムで取り除き(不純物除去工程)、 $^{99m}\text{Tc}(\text{Re})$ を酸性アルミナカラムに吸着させます。(吸着工程)
- ④生理食塩水で $^{99m}\text{Tc}(\text{Re})$ を溶離・回収します。
- ⑤回収した生理食塩水中の ^{99m}Tc 回収率、 ^{99m}Tc 濃縮率、 Mo の不純物濃度と ^{99m}Tc 純度を調べる。

【実験目標】

- ① ^{99m}Tc 回収率：70%以上
- ② ^{99m}Tc 濃縮率：×15以上
- ③Moの不純物濃度と ^{99m}Tc 純度が日本の規制基準をクリアしていること

実験は一日一回のミルキングを計5回行いました。1回目のミルキングでは抽出工程の回収率が悪く、その影響により、総回収率も目標に対して十分とは言えない結果となりました。そこで、2回目以降は、抽出工程の回収率を上げるためにNaOHaq.とMEKの攪拌時間を5分から10分に延長して、ミルキングを実施しました。その結果、抽出工程の回収率は改善され、1回目を除外した2～4回目のミルキングでは、「総回収率の平均値：約70%」、「 ^{99m}Tc 濃縮率：×18」という結果を得られました。Moの不純物濃度と ^{99m}Tc 純度もそれぞれ、「Moの不純物濃度平均： $4.0 \times 10^{-5}\%$ 」（放射性医薬品のガイドライン：< 0.015%）、「 ^{99m}Tc 純度平均：99.77%」（放射性医薬品のガイドライン：> 95%）と双方とも放射性医薬品のガイドラインをクリアできました。

4 質疑応答

発表は予定時刻通りに始まり、発表時間は質疑応答を含めた20分間を、つかえながらもほぼ指定持時間通りに終了することができ、質問に対しても無事回答することができました。

質疑応答では、KAERI（韓国）のPh.D. Man Soon Choから「JMTRとBATANのどちらで実験を実施したのか？」との質問をいただきましたので、BATANで実施したことを回答しました。また、Ph.D. Man Soon Choは発表後も「今回発表した実験に使用した装置をJMTRにinstallするのか?」、「廃棄物はどうするのか?」などの質問をくださるなど、私の発表に興味を持たれたようでした。発表後の質問

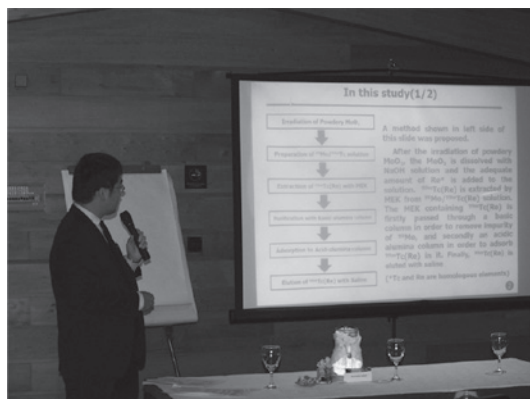
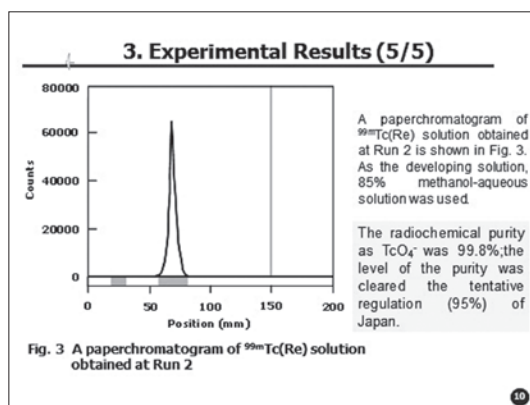


図 発表資料と発表の様子

にはそれぞれ「JMTRにも装置をinstallするつもりである」、「放射性廃棄物である ^{99}Mo は再利用する」と回答しました。

5 最後に

今回、人生で初めての英語での口頭発表かつ海外での発表を行いました。発表までは、発音が下手でオーディエンスに話が伝わらなかったらどうしようか、質問にしっかりと答えられるだろうかとといった不安がありましたが、何とか発表を終えることができました。質疑応答で答えられなかった場合は、棚瀬アドバイザーに助け船を出してもらおうことを考えておりましたが、何とか自力で回答することができました。

新刊紹介

「放射線計測ハンドブック」第4版



著 者 Glenn F Knoll (グレン・ノル)
共 訳 神野郁夫、木村逸郎、阪井英次
発売元 オーム社 2013年9月発行

Knoll教授の放射線計測ハンドブックは、内容が多岐にわたる、詳しく書かれていて、放射線計測の分野では、教科書や参考書として広く使われていてよく知られている。版を重ねるごとに最新の情報が加わって内容がさらに充実し、ページ数は余り変わらないものの、字が小さく行間も狭くなり、本の厚さも第3版が5 cmだったのが第4版では6 cmと厚くなっている。今年77歳になられて、なおかつこのような大部の本を出版される能力と努力は敬服に値する。

概要は以下の通りである。

第1章 放射線とその線源	第11章 半導体ダイオード検出器
第2章 放射線と物質の相互作用	第12章 ゲルマニウムガンマ線検出器
第3章 計数の統計と誤差の評価	第13章 その他の半導体検出器
第4章 放射線検出器の一般的性質	第14章 低速中性子検出法
第5章 電離箱	第15章 高速中性子の検出とスペクトル測定
第6章 比例計数管	第16章 パルスの処理
第7章 ガイガーミュラー計数管	第17章 パルスの整形、計数と時間測定
第8章 シンチレーション検出器の原理	第18章 マルチチャネルパルス分析
第9章 光電子増倍管と光ダイオード	第19章 その他の放射線検出器
第10章 シンチレータを用いた放射線スペクトル測定	第20章 バックグラウンドと検出器の遮蔽

第3版と比べて、特にこの第4版では、第8-9章に書かれている新しいシンチレータと、第16-18章のパルス処理におけるデジタル技術の広範な使用についての詳しい説明が新たに加わっている。また、各章ごとに練習問題も付いている。特に新しいシンチレータに関しては、現在まで開発されているほとんどすべての素材についての説明があり非常に役立つ内容である。ただし、中性子検出器に関してもかなり詳しく書かれていて、シリコンカーバイド検出器とボナーボールが新たに書かれているが、抜けているもの（例えば、ホスウィッチ検出器）も見られる。また第19.10節にある中性子の放射化検出器でも、 $C(n,2n)$ 反応や $Bi(n,xn)$ ($x=3-12$)反応など高エネルギー中性子検出に実際に使われている反応が書かれていない。さらに、第19章のその他の放射線検出器で、現在ほとんど使われていない写真乳剤が書いてあるのに、ガンマ線用の個人線量計に広く使われている蛍光ガラス線量計が抜けているのは画竜点睛を欠いていて、惜しい限りである。

以上の他に第3版との細かな違いを挙げると以下の通りである。

- 1) 第3章 計数の統計と誤差の評価で、3.6節の検出可能限界にROC (Receiver Operating Characteristics, 受信者動作特性) 曲線の説明が加わっている。
- 2) 第6章 比例計数管で、6.6節のマイクロパターンガス入り計数管の説明が詳しくなっている。
- 3) 第8章 シンチレーション検出器の原理で、8.2.6節の透明セラミックスシンチレータと8.2.9節の極低温液体および固体シンチレータが加わっている。
- 4) 第9章 光電子増倍管と光ダイオードで、9.6.4節のシリコン光増幅器が加わっている。

ともかくハンドブックとしては、内容が幅広く網羅されていて、放射線計測を勉強する人にとっては、手元に置いて参考にするべき本であることは間違いない。

(中村 尚司)

「2014国際医用画像総合展」のご案内



桜吹雪が風に舞う頃、日本放射線技術学会、日本医学物理学会、日本医学放射線学会が今年も横浜で開催されます。弊社は今年も「国際医用画像総合展（ITEM2014）」に出展いたします。お馴染みの製品をはじめ、放射線治療分野においては新商品のご紹介もいたします。

弊社スタッフ一同、日頃ご愛顧を賜っているお客様にお会いできることを心待ちにしております。お客様のお役に立てる製品の

展示をいたしますので、学会へお出かけの際にはぜひお立ち寄りください。

* 展示予定商品 *

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| ① 定位放射線治療装置 | : Cyber Knife Radiosurgery System |
| ② 放射線治療計画システム | : Oncentraシリーズ |
| ③ 放射線治療計画支援システム | : Velocity |
| ④ 放射線治療用QA製品 | : PIPSpro、SuperMAX他 |
| ⑤ 粒子線（陽子線）治療システム | : MEVION S250（薬事未承認品） |
| ⑥ 核医学／診断装置用QA・QC製品 | : Co57フラッドソース他 |
| ⑦ 個人被ばく線量モニタリングサービス（ガラスバッジ）、D-シャトル | |

展示品内容は変更する場合もございます。

* 開催期間 *

平成26年 4月11日（金）～ 4月13日（日）

* 会場 *

パシフィコ横浜展示ホール
「弊社ブース：No.416」

* 学術大会 *

会期：平成26年 4月10日（木）～13日（日）
第73回日本医学放射線学会学術集会
第70回日本放射線技術学会学術大会
第107回日本医学物理学会学術大会



（担当：アイソトープ・医療機器事業本部 丸山百合子）

サービス部門からのお願い

4月1日はガラスバッジの交換日です

平素、弊社のモニタリング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。

4月1日はガラスバッジ、ガラスリングの交換日です。

ご使用期間が3月31日までのガラスバッジ（ご使用になっている場合はガラスリングも）は、ご使用期間終了後、速やかに弊社測定センターまでご返送くださいますよう、お願いいたします。

平成25年度の個人線量の集計は、平成25年4月1日から平成26年3月31日までのご使用分が対象です。ご使用になったガラスバッジをすべてご返却ください。

法定管理帳票として「個人線量管理票」を出力いたします。関係法令で定められた線量限度を超えていないことをご確認ください。



編集後記

●新年度のスタートです。入学式と言えば桜咲く4月が定番ですが、これは日本独自の文化、世界では事情が違います。日本でも江戸時代の寺子屋などでは特に入学の時期を定めずに随時入学ができ、西洋の教育が導入された明治時代初期には、高等教育では9月入学が主流だったそうです。しかしながら富国強兵政策の影響もあり、政府の会計年度が4月になったことに影響され、様々な新年度が4月から始まるようになりました。

●巻頭は帯広畜産大学の山田一孝先生に「馬のシンチグラフィー」に関してご執筆いただきました。2020年の東京オリンピック開催を契機に競技馬だけでなく日本においてもサラブレッドの「馬の骨シンチグラフィー」が一般化されているかもしれません。7年後と言わず5年後ないし3年後には馬用γカメラが国内の大学などで試用されていることが望ましいでしょう。日本人の高い技術力があれば国産化も可能かもしれません。

●3月号に続きNPOニュークリア・サロン／NPO法人放射線安全フォーラムの藤家洋一様に「整合性のあ

る原子力システム」をご執筆いただきました。資源の完全リサイクル使用と有害物質を環境に出さないゼロリリースが同時に達成できる核分裂エネルギーシステムの概念、自然や人類社会と調和でき、将来に夢を持たせる原子力システムを、現在の逆風の中でいかに唱えていくか。とても大切なあるべき姿です。

●2013年10月にアルゼンチンでISMTR-6が開催され、弊社大洗研究所のアドバイザーである棚瀬正和と太田朗生が参加しました。⁹⁹Mo/^{99m}Tcの製造に関してポーランドのMARIA炉の関係者から、MoO₃を無償で照射しても良いとの内諾を得たことは国産化における大きな進歩であり、両者の研究発表が一助になったことは大変喜ばしいことであります。

●我が家の近くは「ソメイヨシノ」発祥の地。そのせいかかりではありませんが、3月に入ると桜の蕾が膨らむ様子や緑からピンク色に変わっていく様子を、今か今かと眺めるのが好きです。寒い冬があってこそ喜びです。50年後も100年後も、四季を感じられる美しい日本であってほしいと心から願います。

(丸山百合子)

FBNews No.448

発行日／平成26年4月1日

発行人／山口和彦

編集委員／佐藤典仁 安田豊 中村尚司 金子正人 加藤和明 大登邦充 加藤毅彦

木名瀬一美 篠崎和佳子 土屋敦史 林直樹 福田光道 藤崎三郎 丸山百合子

発行所／株式会社千代田テクノル 線量計測事業本部

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4階

電話／03-3816-5210 FAX／03-5803-4890

<http://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381円）