

彰式の後には各発表の内容が立派であるとの感想を述べられ、参加者全員との記念写真（写真4）に収まった。

今年のもんなのくらしと放射線展は参加者が大幅に増加した。イベントの内容は毎年進化している。大阪府立大学放射線研究センターのスタッフの皆さんの負担もかなりのものである。子供だけでなく大人も十分学び楽しめる。ONSAの会員の皆様もぜひ積極的に参加して頂きたい。

## 第 60 回放射線研究会<エキゾチックビームシリーズ(14)>聴講記

標記研究会は平成28年7月15日（金）午後1時半から5時半まで住友クラブにおいて、水越克彰氏（東北大学）、小川達彦氏（日本原子力研究開発機構）、堀 史説氏（大阪府立大学）、佐藤哲也氏（日本原子力研究開発機構）の4名の講師をお招きして開催した。座長は前半2件を、岩瀬彰宏氏（大阪府立大学）にお願いし、後半2件を義家敏正ONSA専務理事が務めた。なお、講演会終了後、講師の先生を囲んで技術交流会が行われた。

### 1. 超音波、プラズマによる水中励起反応場の基礎、比較、応用

東北大学 金属材料研究所 附属産学官広域連携センター 特任准教授 水越 克彰

水中を粗密波である超音波が伝播すると、加圧、減圧が起こり、その結果、高密度のエネルギーの散逸が起こる微小反応場が生成される(図 2)。この反応場により、pHの低下、活性酸素種の発生、発光現象（ソノルミネッセンス）といった特異な化学作用がもたらされ、さまざまな応用が展開される。この特異な反応場は、高エネルギー放射線による反応場とあるところでは類似し、また異なるところもある。今回、超音波を利用した化学反応（ソノケミストリー）の専門家である水越氏に講演いただいたことは、種々の材料に対する放射線利用を改めて考える上でも大変ためになった。講演では、最近始められた水中プラズマによる反応場についてもお話いただいた。

講演は、専門外の人にも配慮いただき、音波の性質や圧電効果による超音波の発生と検出などについて、潜水艦や魚群探知、超音波による眼鏡やアクセサリー洗浄など、身近な例を挙げた分かりやすい説明があった。次に、減圧時に発生する気泡（音響キャビテーション）、それが崩壊する過程（圧壊）の説明と、その際の気泡内の温度の評価に関する解説があった。温度は、発光スペクトルや反応速度の温度依存性から評価し、その温度は5000Kにも達する。このような非平衡局所反応場における“温度”の評価は、放射線と物質の相互作用を議論する際にも大変重要であり、その考え方や評価法は大変興味あるものであった。

次に、超音波による反応場を利用したいろいろな講師自身の研究例が示された。水溶液中の芳香族塩化化合物は、超音波反応場により、生物学的に安全な物質に分解されることが分かった。本結果は、超



図 1 講演中の水越講師

音波により、難分解性環境汚染物質を、環境にやさしい無害物質に変えることができることを示している。

超音波は、Au, Pt などの貴金属を含む錯塩と有機添加剤（界面活性剤など）を含む水溶液に照射することで、金属イオンが還元され、ナノサイズの微粒子が生成される。ここで面白いのは、本来還元作用を持たない有機化合物が超音波によって、「その場」で還元剤に変換される点である。また、適当な担持材粉末を溶液に含ませておくと、貴金属ナノ粒子を担持材表面につけることができる。

この方法で作製した金・磁性酸化鉄複合体は、硫黄を含む化合物を金表面に付着させ、磁石で分離するといった新しい汎用磁器分離キャリアとして利用が確立している。また、Pd ナノ粒子の表面を Au でコーティングするという複合ナノ粒子の作製も超音波で可能である。熱平衡的には、Au と Pd は全率固溶の合金になるはずであり、このような複合粒子ができるのは、非熱平衡反応場ならではのことと思う。

さて、超音波照射によって水中に発生する気泡が圧壊するときに、その内部は高エネルギーのプラズマ状態である。そこで、水越氏は、水中での放電によるプラズマ発生を行い、このプラズマによる反応場を利用した化学反応の基礎と応用について、最近研究を開始したので、その成果についても紹介いただいた。短いパルス幅で数 keV 以上の周波数で水中に設置した電極に電圧を印加することで“ソリューションプラズマ”というプラズマが発生する。通常の水の電気分解では酸素が多く発生するが、このプラズマによる酸素の発生は極僅かであり、その代わりに、過酸化水素を主とする活性酸素種が生ずることを ESR、蛍光分析などで確認している。このプラズマにより、水中有機物の分解、金属ナノ粒子の作成などが分かってきており、これらの点において、超音波と水中プラズマは非常に類似している。しかし、以上の超音波、プラズマ発生法はいずれもバッチ方式であり、大量の水の処理など、実用的に応用する場合は困難さを伴う。そこで水越氏は、企業との産学連携によってフロー式プラズマ水処理装置の開発を行った（図 3）。この装置を用いて純水を処理した結果、電気伝導度は高くなり、pH は低下した。これは、大気中の窒素分子がプラズマで分解されて生じた硝酸イオンに起因する。硝酸は植物の窒素栄養となるため、フロープラズマ処理水は水耕栽培の培養液や液体肥料として農業用途でも活用が考えられ、現在これを目指して研究を進めているということである。

講演の最後にあたって、超音波と水中プラズマの類似性と違いに着目した基礎研究を続けるとともに、産学官一体となった衛生分野、農業分野における水中プラズマ利用の社会実装を進めたいとのことであった。

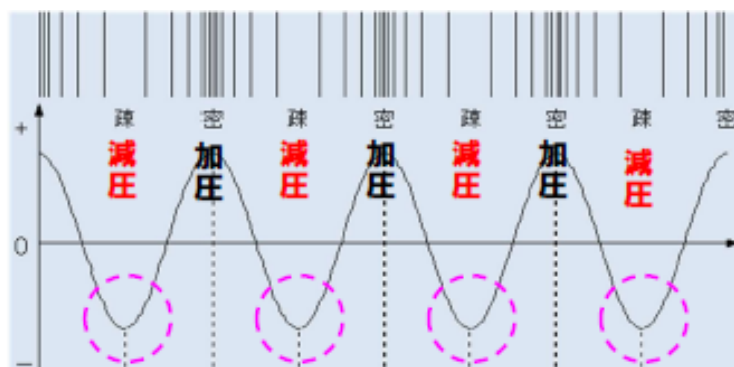


図2 水中での超音波の伝播

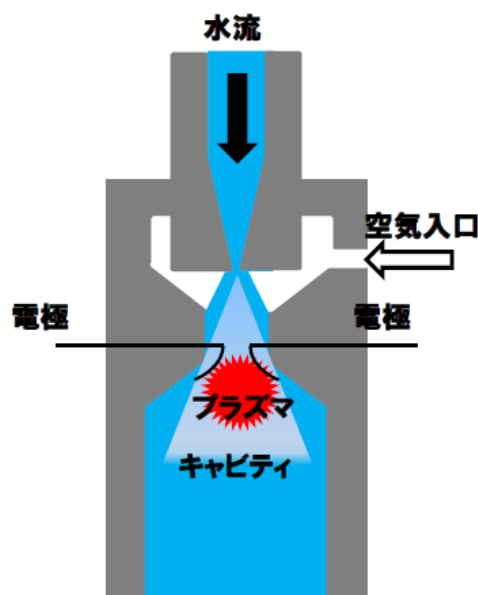


図3 フロー式プラズマ発生部の構造

(岩瀬彰宏記)

## 2. サブミクロンの放射線挙動から解き明かす放射線の物質影響

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター

環境・放射線科学ディビジョン 放射線挙動解析研究グループ 研究員 小川 達彦

高エネルギー放射線が物質に照射されることにより、物質の性質は大きな影響を受けることは以前からよく知られている。講師の小川氏は、計算機シミュレーションと理論的考察により、放射線照射効果の実験事実を再現する試みを行ってきており、本講演では、その成果の一部を紹介いただいた。

放射線による物質への効果を記述するのによく使われるパラメータは、物質によって吸収される放射線のエネルギー（吸収線量）である。この単位として、有機材料では、Gy がよく使われ、これは物質 1 kg 当たり吸収されるエネルギー（ジュール）であり、生体影響では、Gy に生物学的影響の因子を加味した Sv が使われるのはよく知られることとなっている。

さて、今までの放射線照射効果では、吸収線量によってほぼ決まる例が大変多く、それでも説明できない場合は LET 補正を試みるということが行われてきた。そのため、吸収線量や LET 以外のパラメータについては、考察がほとんど無かったようである。しかし、実際には、Gy や LET だけで説明できないような照射効果も多くあり。ここではシンチレータ発光量を例にとった説明があった。放射線検知によく用いられるプラスチックシンチレータは基本的には、エネルギー付与量（吸収線量）に応じて発光するが、電離密度の大きな放射線に対しては、Forster 効果、すなわち、放射線によって励起した分子が発光する前に、励起エネルギーが近隣分子に非蛍光的に吸収され、それによって発光量が抑えられるという現象が生ずる。このため、発光量はもはや吸収線量には比例しなくなり、それを説明するために、放射線の軌跡に沿った単位長さあたりのエネルギー付与である LET を用いる試みがなされてきた。しかし、図 2 に示すように、同じ LET でも、線種により発光量が異なることが実験的に明らかになってきた。これは、LET が飛跡方向に沿った 1 次元的なエネルギー付与密度であり、実際には、飛跡の動径方向へのエネルギー分布も考慮する必要があることを示している。そこで、付与エネルギーの 3 次元的分布を計算機シミュレーションコード RITRACKS により計算した。それを用いて、励起分子と損傷分子の配置をもとに Forster 効果が起こらない確率を求めて、シンチレータ全体としての発光強度を求めた。このような方法でさまざまな放射線に対し発光量を計算した。その結果、電子線照射の場合は、エネルギー付与が空間的に局在



図 1 講演中の小川講師

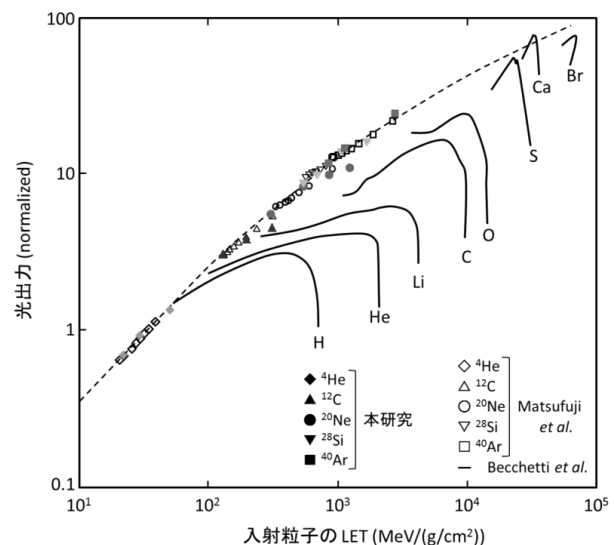


図 2 高エネルギー重イオン入射に対する NE102 シンチレータの発光量。×は本研究の計算値、他は先行研究の測定値やモデリング



しないため Forster 効果は起こらず、放射線の入射エネルギーに比例して発光が起こるが、低エネルギー陽子線の場合、エネルギー付与密度が高くなるため、発光量は電子の場合と比べ3分の1程度に抑えられることが理論的に説明できた。図3に、さまざまなイオン照射の場合の発光強度を入射エネルギーに対してプロットしたものである。本方法による計算で求めた値は、実験値を見事に再現している。

以上のように、本研究では、吸収線量やLET だけでは説明できなかった放射線照射効果を、微視的な放射線挙動解析やエネルギー付与分布の分析により、実験データを再現することに成功した。

そして、本研究の理論的妥当性を検証できる信頼すべき実験データについて提案いただきたい、また応用先も模索しているので、協力研究者を募集中である、ということと講演を締めくくられた。

今回例に用いたプラスチックシンチレータだけでなく、付与エネルギーやLET だけで説明できない照射効果は、有機材料だけでなく、金属材料なども含め他にも多くあると思われる。実験屋としては、ぜひ今後とも交流を図って、いろいろ議論していただきたいと願うものである。

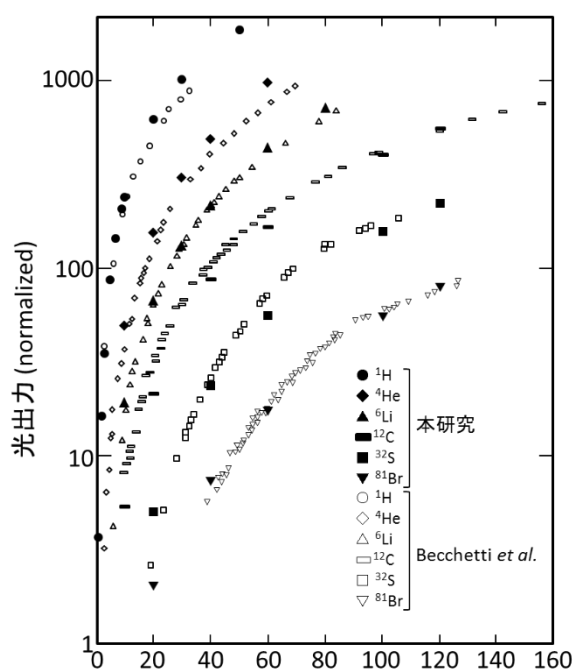


図3 低エネルギー重イオン入射に対するNE102シンチレータの発光量。濃いマーカーは本研究の計算値、他は先行研究の測定値

岩瀬彰宏記)

### 3. レーザー・コンプトン $\gamma$ 線による高速陽電子の材料研究への応用

#### —NewSUBARU 放射光施設における陽電子ビーム装置の開発—

大阪府立大学 大学院工学研究科 マテリアル工学分野 准教授 堀 史説

堀講師は陽電子消滅分光法を主たる測定手段として、材料格子欠陥を中心に材料物性の先進的な研究を行っている研究者の1人である。イントロダクションでは、物質内の欠陥の種類と各種評価法の比較と陽電子消滅分光法の利点を述べて、陽電子分光法の詳しい説明を行った。次に「陽電子はどこから」とその生成法を述べた。放射性同位体の $\beta^+$ 崩壊を用いる方法と $\gamma$ 線をターゲットに当てて、電子と陽電子を対生成する方法を解説した後、高エネルギー $\gamma$ 線の発生方法としてレーザー・コンプトン散乱(LCS)の説明を行った。図2のようにレーザー光をNewSUBARUのリング内の電子に照射することにより $\gamma$ 線を発生させる。レーザーの波長と電子のエネルギーにより陽電子のエネルギーを変化させることが可能である。もし高エネルギー陽



図1 講演中の堀講師

電子を作れば、非常に厚い材料の非破壊検査が可能である。例えば波長532nmのレーザ光を1.5GeVの電子に当てると40MeV近いエネルギーの陽電子が生成できる。図3に装置の概要（左）を装置の写真（右）を示す。試料の位置を変えることは、陽電子のエネルギーを変化させることに対応する。

図4は最大エネルギー545keVの $^{22}\text{Na}$ からの陽電子とLCS- $\gamma$ 線を用いた $8 \pm 2\text{MeV}$ の陽電子によるドップラ広がりスペクトルの比較である。直径3cmの $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$ のアモルファス状態と結晶状態の違いを測定している。 $^{22}\text{Na}$ 線源の場合はせいぜい $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下の表面の情報であるのに対して、LCS- $\gamma$ 線による陽電子は、数mmまで透過するため内部の情報が得られる。図は結晶化により、アモルファス内に大量に内包していた空隙が消滅したこと、表面と内部で差がないことを示しているため、 $\text{Zr}_{55}\text{Cu}_{30}\text{Al}_{10}\text{Ni}_5$ は内部まで均一に結晶化していると結論することができる。

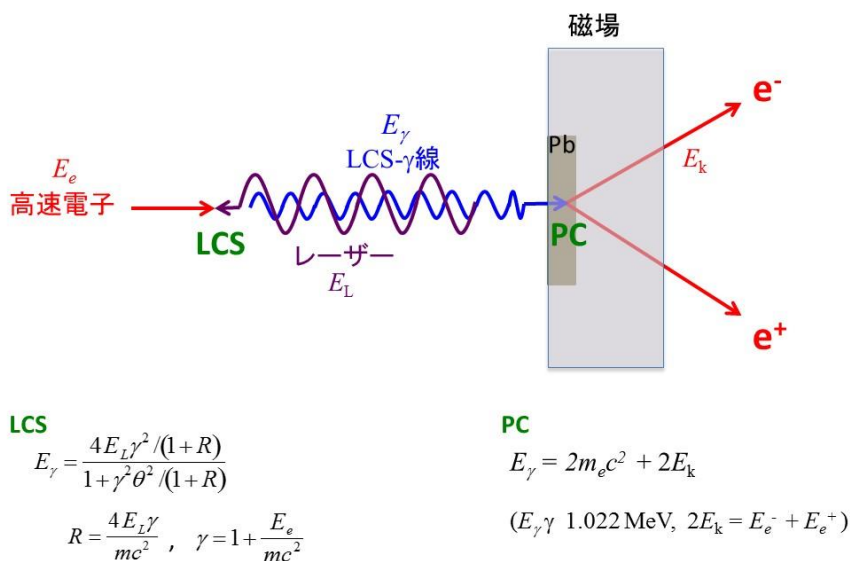


図2 LCS- $\gamma$ 線による陽電子生成と分離の概念

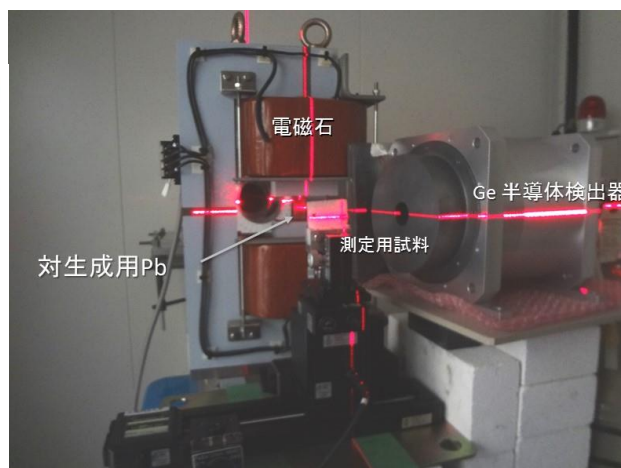
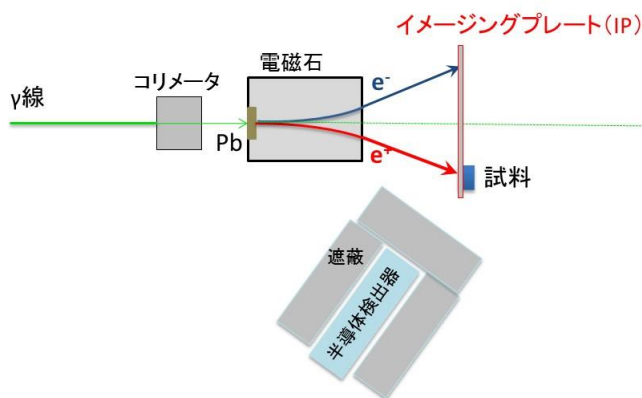


図3 陽電子生成-消滅装置レイアウト（左）とその写真（右）

放射光施設を利用した陽電子消滅測定実験の利点としては、対生成した陽電子ビームは空气中を走らすことができるため、試料環境（雰囲気、対象試料、動的観察など）の自由度が高いこと、共同利用施設を利用することでだれでも陽電子消滅分光実験ができる可能性を有していること、産業ベースの品質評価に用いることができることなどを挙げている。

今後の予定と課題としては、陽電子の強度の向上、エネルギー制御、2D、3Dマッピング技術の検討、計数の同期化による寿命測定やAMOC（Age Momentum Correlation：陽電子消滅寿命法とドップラー広がり法の相関測定）、計測データ処理の簡便化を挙げた。

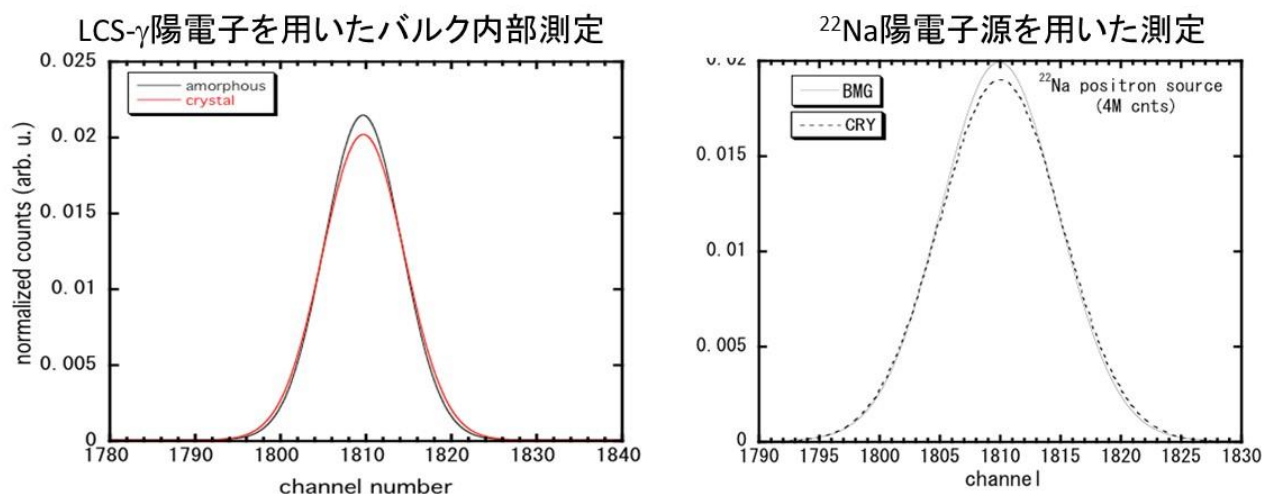


図 4 LCS- $\gamma$  陽電子と  $^{22}\text{Na}$  陽電子とドップラ広がり測定結果の比較

陽電子消滅寿命測定のためには、陽電子の材料へ入射した時間と消滅した時間の差を測定する必要がある。その方法についての質問には、陽電子が入射した時の信号を、アバランシュダイオードを使って測るとの回答であった。陽電子のエネルギーが高いため空気中に試料を置いても問題がなく、厚い試料の内部の測定が可能である。従って、大型の装置や構造物に対する非破壊検査への発展が今後期待される。

(義家敏正記)

#### 4. 103 番元素でみつけた周期表の綻び

ー103 番元素ローレンシウムの一イオン化エネルギー測定に成功ー

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター 重元素核科学研究グループ 研究副主幹 佐藤 哲也

ご存知のように周期表は、元素を陽子の個数の順に、それぞれが持つ物理的または化学的性質が似たもの同士が縦に並ぶように配列した表である。元素がその原子の電子配置に従って並べられるため、似た性質の元素が規則的に出現する。しかし、ランタノイドやアクチノイドはどうなっているのか疑問に思った人は少なくないと思う。或いは単純にランタノイドの次の原子番号 72 番の Hf やアクチノイドの次の原子番号 104 の Rf が第 4A 族であるので、原子番号 57 番から 71 番目までと 89 番から 103 番目までを 1 つのマスに押し込み 3A 族としたものと納得しているのではないだろうか。すると 57 番から 71 番、89 番から 103 番は同じ性質をもつかという疑問が生じる。自然界に存在しない超ウラン元素は材料としてはあまり利用されないが、ランタノイドには 60 番 Nd、62 番 Sm、64 番 Gd など磁石の材料と



図 1 講演中の佐藤講師



して重要なものが多く存在するため、それらの化学的性質にどのような関連があるかは重要である。

本講演ではアクチノイドが103番Lrで終わることを実験的に検証した結果について発表された。

元素も重たくなり、超重元素 ( $Z > 100$ ) になると、ボアーの原子モデル的に考えたとき、電子は光の速さに近い速度で原子核の周りを回ることになる。そのため、原子の電子軌道が変化し化学的性質も変化する。すると周期表での位置が変わることもあり得る。

本研究の論文は図2に示すようにNatureの表紙で紹介された。図2では小さくて読みづらいが、EXTREME CHEMISTRYとして” Experiments on rare lawrencium atoms illuminate a relativistic region of the periodic table” ( Lr 原子実験が周期表の相対論的領域を照らしだす) と書かれている。EXTREME CHEMISTRYとはここでは、1個の原子からその元素の化学的性質を抽出することを意味する。

ランタノイドのLuは $[\text{Xe}]4f^{14}6s^25d$ であるのでアクチノイドのLrは $[\text{Rn}]5f^{14}7s^26d$ であることが予想されるが、計算により $[\text{Rn}]5f^{14}7s^27p_{1/2}$ である可能性が指摘されていた。Lrは加速器でのみ生成し、半減期27秒であるので化学的方法は使えないため第一イオン化エネルギー(1PI)を測定することが計画された。そのため表面電離法を応用した新しい1PI法が開発された。高温の金属に原子を衝突させると、イオン化する。イオン化効率からイオン化エネルギーを得ることができる。JAEA タンデム加速器実験施設を用いて実験が行われた。 $^{249}\text{Cf}$  ターゲットに $^{11}\text{B}$  ビームを照射して $^{256}\text{Lr}$ を作り、加速器に設置される JAEA-ISOL でイオン分離し、2700K に加熱されたTa 表面に衝突させてイオン化させ1PIを求めた。その結果図3のように非常に低い値が求まり、ランタノイドとの比較でLrがランタノイドの最後であることが確認された。また、理論値と非常に良い一致がみられた。更にFm、Md、Noの第一イオン化エネルギーも求められた。これらは今後の計算の高精度化に役立つことが期待される。一方図3からも分かるように、LuとLrは他のランタノイドやアクチノイドと異なるので、周期表の位置に関する議論が起きているそうである。

話題になっている原子番号113番のNhの化学的性質と周期表の位置はどうかとの質問には、114番までは周期表のままで良いようだとの回答。しかしg軌道が



図2 Natureの表紙に掲載された講演者の研究成果  
T. K. Sato et al., Nature 520 (Apr. 9) (2015)

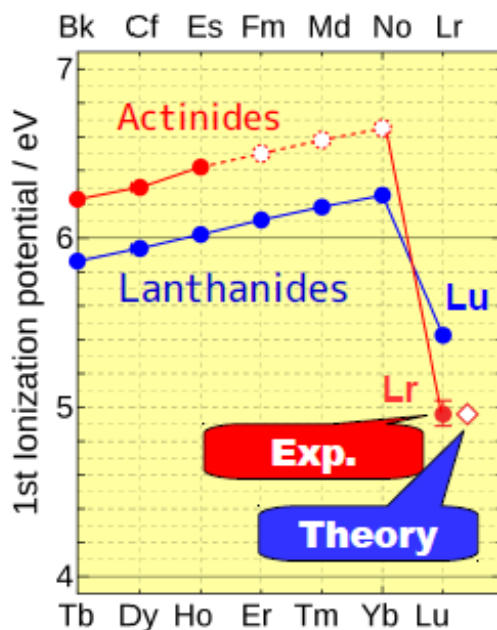


図3 Lrの第一イオン化エネルギーの決定と理論値との比較

電子で埋まり始まる元素については、今回のデータで計算の精度上がったので、計算により正しい周期律表での位置が求めることが可能になるであろうとのこと。更に Rf の電子配置については国際協力研究が現在進行中とのことである。

周期表は材料を扱う研究者や技術者が最も信頼する、最も単純なデータベースである。今回の話は余り材料として用いられる物質ではないので影響はないが、超重元素の物性は何が出現するか分からないとの印象を受けた。

(義家敏正記)

## 平成 28 年度第 1 回見学会「大阪ガス 泉北製造所・ガス科学館」見学記

もうすっかり夏の装いの 7 月 1 日午後 南海電鉄羽衣駅に見学者 12 名が集合して、タクシー 3 台に分乗し、大阪ガス株式会社泉北製造所を見学させて頂いた。大阪ガス 泉北製造所は同社の主力工場で、都市ガスの 70%と営業運転用電力の殆んどをこの工場で製造し、販売している。

我々一行はガス科学館玄関で、浜本成久館長らの出迎えを受け、同館長のプレゼンテーションを約 1 時間伺った。この時に配布頂いた大阪ガス発行の下記冊子と合わせて要旨を概説する。

「暮らしと産業をささえるマルチエエネルギーをつくる 泉北製造所」

### 大阪ガスグループの現況

大阪ガスグループの都市ガスの供給状態は、近畿 2 府 4 県の約 722 万戸でお客様数が年々増加で供給している。しかし、販売量（容積・ $\text{m}^3$ ）は 2011 年をピークに 2014 年で約 5%の減少を見ている。ここでも、明らかに我が国の「核家族化」と「少子高齢化」が見て取れる。営業的には 1 戸当たりの販売量が減少して、客単価が下がっている。

### 泉北製造所の概要

都市ガス供給の 70%を泉北製造所が 30%を姫路製造所が分担している。泉北製造所は「第一工場」（1971. 10 稼働）と内海を挟んで「第二工場」（1977. 08 稼働）に分かれているが、「LNG 海底連絡管」で一体運営されている。

### 都市ガスの変遷

都市ガスは泉北製造所が稼働する 1970 年代までは、石炭を原料にした石炭ガスやナフサ・ブタンなどを改質したガス（4,500kcal）が使われていたが、現在では中東・東南アジアなどから輸入した液化天然ガス（LNG）を気化した天然ガス、および国内で産出される天然ガスに液化石油ガス（LPG）を混合して熱量調整した「13A」（燃焼性等によるガスグループ区分）と呼ばれる規格（11,000kcal）で販売されている。「13A」の商品化で単位容積当たりのカロリーが増えた結果、大阪ガスは売上が同じで、ガスの販売量（容積・ $\text{m}^3$ ）・取扱量が約 6 割減少して、ガスタンクの廃止や導管等の保守作業の低減が進んだ。昔は、高さ 100m 以上の超大型都市ガスタンクが関西各地で見られたが、取扱量 6 割減少の結果、姿を消した。

### 冷熱利用

泉北製造所ではこの $-160^{\circ}\text{C}$ の超低温 LNG 気化の際に発生する膨大な冷たい熱（冷熱）を利用して、液化酸素、液化アルゴン、液化窒素、ドライアイス、電力等を製造している。これら冷熱利用の液化窒素等は最初から電気で空気を冷却して製造するより、低コストのため高競争力を誇る。また、これら液化窒素からの冷熱利用で低温粉碎や冷凍うどんの製造等に活用されている。筆者は子会社の「近畿冷熱社」の「冷凍うどん」を活用したレストランの恩恵を受けている一人である。