

レーザーコンパス

「レーザーウラン濃縮」特集号に寄せて

中 根 良 平*

Ryohei NAKANE*

昨年6月、米エネルギー省は、ウラン濃縮の次世代生産技術として、遠心分離法よりコストの安い“原子蒸気レーザー同位体分離法AVLIS”，所謂“原子法”を最終的に選択すると発表した。日本は遠心分離法によるウラン濃縮工場を下北半島に建設することを既に決定していただけに、原子力および電力業界など各方面が受けたショックは非常に大きかった。

ウラン濃縮とか重水製造などの同位体分離法において原理が最も魅力的な方法はレーザー法である。原理的には1段で同位体を完全に分離できるので、気体拡散法や、遠心分離法のような巨大なカスケードを必要とせず、分離施設の規模が非常に小さく、要するエネルギーも少なくなる可能性が大きいからである。もともと気体拡散法や遠心分離法は、他の機械工業や化学工業などの技術に較べると甚だ効率が悪く、欠点の多いものであるが、他に代る方法がないから仕方なく採用されている。もしレーザー法が技術的に可能となるならば、それは窮極的な同位体分離法になりうると私は常々述べたり、書いたりしてきた。10年程前、ある学会誌に「原子力とレーザーは今世紀が生んだ最大の発明といわれるが、70年代に入って両者のドッキングが始まった。その一つがレーザー・ウラン濃縮である。」という書出しで基礎的な解説を行ない、未来の展望を行なったが、工場建設がこんなに早く実現するとは当時は夢にも思っていなかったの、米エネルギー省の発表を聞いたと

きは私も感無量であった。

同位体を分離しようという試みは、同位体の存在が発見された直後から始まっている。一番最初に試みられた方法は、やはり原理が簡単なために気体拡散であって、Astonが素焼管を通してネオンを拡散させ、 ^{22}Ne を少し濃くしている。その後大多数の元素には同位体が存在することが発見されると、いろいろな方法でそれらを分離しようという研究が始まった。そして現在のレーザー法の原型ともいべき光を利用する方法も早速試みられたのである。まず1922年はMertonは H_2 と Cl_2 の光化学反応によって ^{35}Cl と ^{37}Cl を分離しようと試みた。しかしこれは勿論というか、完全に失敗であった。1930年代になってKuhnがフオスゲンの光分解で、Zuberが水銀蒸気の光化学的酸化でそれぞれ同位体を分離しようとし、Zuberが始めて僅かであるが水銀同位体の濃縮に成功した。これが光を利用した同位体分離の最初の成功例である。次いで戦時中には既にアメリカでは、重水素の発見者であるUreyをリーダーとした研究チームがウラン有機化合物の光分解によるウラン濃縮を試みている。

光を利用して同位体を分離しようというのであれば、その光は当然単波長でなければならない。レーザーの存在さえ知らなかったその当時、どのようにして単波長の光を得ようとしたか、それぞれ皆大変苦労している。水銀の場合を除いてはまず不可能であったが、ZuberはZeeman

* 理化学研究所 (〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1)

* The Institute of Physical and Chemical Research (2-1, Hirose, Wako-shi, Saitama 351-01)

効果を利用し、戦後は Zelikoff が放射性金の核変生成物である ^{198}Hg を集めて水銀ランプをつくり、水銀蒸気と水蒸気の混合気体に照射して ^{198}Hg を酸化物として、1.5倍に濃縮しているのが唯一の成功例といえる。いずれにしろ、単波長の光さえあればなあ、と言うのが当時の同位体分離研究者の嘆きであった。そして1960年にレーザーが発明された。当然のこのようにレーザーを利用する同位体分離の研究が1960年代の後半から少しずつ発表され始めた。しかしさすがに、ウラン濃縮を始めとする同位体分離の研究では Urey の昔から断然進んでいたアメリカである、1970年には早くも AVCO社が原子法によってイオン電流規模であるが50% ^{235}U の濃縮を行なった。そして1974年、第8回量子エレクトロニクス国際会議で、ローレンス・リバモア研究所が原子法によってmg/hオーダーの低濃縮ウランを分離したと発表したことが、同位体分離の研究者以外の人々にもレーザー法に興味を持たせる端緒を作ったことはよく知られている。

光を利用して同位体を分離しようとするとき、原子法と分子法 MLIS の原型が既に戦前から行なわれていたことは既におわかりのことと思う。原子法の原型は Zuber や Zelikoff らの水銀同位体の分離であり、ただ現在のウラン分離法と異なるのは、励起後の操作で前者は化学的方法を用い、後者はイオン化して磁場で分別しようとしているところにある。一方、分子法の原型は Merton らに見出されるが、この方は根本的なところにおいて現在の分子法と大きな違いがある。すなわち戦前に考えられた同位体分子の励起による分離の原理は、1乃至2程度の光子を吸収して励起した分子と他の分子を反応させようというのであって、現在の数十個の光子を吸収して分子が分解するという赤外多光子解離とは全く原理が違っているのである。 BCl_3 に炭酸ガス・レーザーを照射して ^{10}B を分離しようという研究から発見された赤外多光子解離は、赤外線分子が分解するなど夢にも想像しなかった、光化学といえば紫外線によるものと思っていた

当時の化学者には思いもかけぬ大発見であった。したがって分子法の方はウラン濃縮を始めとする同位体分離のものには関心を持たぬ物理や化学の基礎の研究者にまで興味を与えることになったのである。

1976年2月、コロラドでレーザー・ウラン濃縮に関する DOE 主催の Informal Meeting が開かれたが、Lamb や Bloembergen などのノーベル賞学者が講演をして、当時その現象が発見されてから余り時間が経っていなかったためホットな話題であった赤外多光子解離について一生懸命に論じていたのが非常に印象的であった。なおこの時始めてロス・アラモス研究所から極低温における UF_6 のスペクトルが数字抜きで発表され、16 μm レーザーの必要性が論ぜられた。

原子法、分子法とプラズマ法の三種の新しいウラン濃縮法がアメリカでは Advanced Isotope Separation として1970年代を通じて進められたが、結局1982年になって原子法が採用され、分子法の開発は中止との決定が下された。そして1960年頃から研究開発が行なわれていた遠心分離法との比較を1987年に行ない、何れか一方の方法を将来のアメリカのウラン濃縮法にするとの発表が行なわれたが、その決定が2年早められ、1985年6月のエネルギー省の発表となったというわけである。

1982年に原子法が採用され、分子法の開発が中止されたのには二つの理由があると私は考えている。第一は当時の段階で原子法の開発がより進んでいたこと。原理からして、分子法の赤外多光子解離が1970年代に入ってから発見されたに対し、原子法の基本的な考え方は Zuber の昔から知られていた。そのため研究開発の開始も早く、技術的進歩が一步先んじ、しかも最も重要な銅蒸気レーザーの開発が1970年代の終りに成功したことが大きな決め手となったと思われる。一方、分子法は決め手になるべき強力なラマン・レーザーがその段階でまだ開発されておらず、そのため弱い16 μm ラマン・レーザーで励起、紫外レーザーで分解という方法を用いて小さい分離効果しか得られなかったことが致命

傷となった。もう一つの理由は、将来宇宙空間におけるエネルギー源として利用されると思われる ^{239}Pu の分離の問題があった。原子法によれば、 ^{235}U も ^{239}Pu も分離できるが、分子法では $16\mu\text{m}$ レーザーを用いては ^{239}Pu を分離できない。この第二の相異も大きなポイントになったと思われる。事実、ロス・アラモス研究所ではウラン濃縮の研究は中止となり、 ^{239}Pu の分離の研究だけをやることになった。そして昨年になって $16\mu\text{m}$ レーザーならぬ、近赤外レーザーでの分離実験が開始されたのである。

この第一の理由について、現在理研で開発しているような強力なラマン・レーザーが1982年当時にアメリカにおいても開発されておったならば、あるいは1982年の決定の模様も少しは変わったのではないかと思う。というのはドイツでは後で述べるようにラマン・レーザーで大きい分離効果を得ているからである。そして第二の理由の、 ^{239}Pu 分離の研究をロス・アラモスでも行っていたならば、1982年の決定が下された後で、ロス・アラモス研究所の研究者が、分子法が原子法に負けたのではない、ただ研究所のマネージメントが悪かったのだと言っていたのは何を意味するのか、甚だ興味深い。

1982年4月、原子法採用を米エネルギー省が発表する直前、アメリカ化学会のLISシンポジウムでVenusと呼ばれる銅蒸気レーザーシステムとかMarsと呼ばれる大形分離装置のスライドを含めて原子法の詳細が発表された。直前まで予告がなかったので会議出席者も驚いたようであるが、トリチウム分離の研究発表のため出席していた理研関係者から報告を聞いて、私はアメリカの実力に改めて驚嘆したことを覚えている。余談であるが、その報告を含めた解説を原子力学会誌に日本語で書いたところ、その翻訳がイギリスなどで読まれ、どこから写真が手に入ったかと問合せがきて苦笑したことがある。

1982年段階はそうであったが、しかしそれでもまだ1985年に遠心分離法を中止してまでも原子法を採用するとは想像もしなかった。結局、濃縮ウランの需要は現在の拡散プラントで今世

紀中は充分まかなえること、遠心分離法はウラン濃縮だけのものであるが、レーザー法はいろいろな他の同位体を分離できる可能性があること、そしてさらに種々のレーザーの開発など大きな波及効果が望まれることなどが決め手となったのであろうと考えている。

このアメリカの決定は当然のことながら他の国々にも大きな影響を与えた。フランスも原子法、分子法などの研究を行ってきたが、アメリカにならって原子法を採用する模様である。しかしドイツは分子法の開発を進めている。それは、ロス・アラモス研究所と違って、基礎研究の段階で10程度の分離係数の値を得ているため、と非公式ではあるが基礎研究の責任者であるKompaが述べていた。

一方日本では、1973年に大阪大学でLISの研究が開始されたのを皮切りに京都大学でも研究が始められ、1976年以来、原子力研究所では原子法、理化学研究所では分子法の基礎研究が進められている。その現況については本文で詳しく紹介されるであろう。今後数年間にさらに平行して開発研究を進め、その後の評価でいずれか一方にしぼることになっているが、当初原研が原子法、理研が分子法を選んだ理由は、原子法がより直接的であり、一方分子法は赤外多光子解離という基礎研究的側面が強く、それぞれの研究所の性格に適していると考えられたからである。

レーザー法は原子法、分子法ともに理想的な同位体分離法であると言ったが、先に触れなかったもう一つの大きな特徴がある。それはたとえば気体拡散法や遠心分離法でウラン濃縮はできるが、重水製造は化学交換法や蒸留法でなければ駄目といったように、それぞれの方法はある特定の同位体の分離に限定されることが多い。それに較べてレーザー法、とくに分子法は重水素、トリチウムから、 ^{235}U 、 ^{239}Pu まであらゆる同位体を分離することができる。すなわち既存の方法ではほとんど不可能であった週期律表の真中に位置している、主として金属の同位体までも分離することができる、オール・マイティ

一の同位体分離法であるということである。

もし分離できればそれは非常に約に立つ、しかし適当な分離法がないからとあきらめられていた同位体が沢山ある。たとえば核融合炉器材として現在、ステンレス鋼やモリブデン鋼が想定されているが、実際に核融合反応が起った場合、強い中性子を吸収して長寿命の放射性金属に変わったり、水素やヘリウムを発生したりするなどの大きな問題が発生する。そこで ^{53}Cr , $^{57,58}\text{Fe}$, ^{61}Ni , ^{65}Cu , $^{96,97}\text{Mo}$ などを分離して、それを用いてステンレス鋼やモリブデン鋼をつくり使用すれば、これら重金属同位体は中性子吸収断面積が小さく、また放射化されても比較的減衰の早い核種となるので、上述の問題は一気に解決する。 ^{50}Ti , ^{90}Zr なども原子力材料として非常に優れている。その他プロトン照射によ

る医用RI原料として ^{68}Zn , ^{76}Se , ^{112}Cd , ^{124}Te , ^{203}Tl などを分離することが望まれているが、これらの同位体を分離するには分子法が最も優れている。

同位体は元素という化学的性質からすれば同じ物質であるが、その原子核の性質に着目すれば全く異種の物質である。同じ元素を如何に純粹にしても、それは依然として不純物を含んだ混合物にすぎない、したがってあらゆる同位体は分離されなければならない、そしてそれはやがて将来必ず実現するだろうと昔からよく夢のようなことを言っていたが、21世紀になればレーザー法によってそれが本当に可能になるのではないかと最近では思うようになってきた。そしてその実現を強く期待している。