

第4章

レーザー科学

～新しい光化学反応に道～

1970年代半ばから21年間にわたって理研が推進した大型プロジェクト研究「レーザー科学研究」は、新レーザーの開発や光化学反応の新しい学問領域を切り拓き、多くの優れた研究成果を創出した。同時に、優れた人材を育成、輩出するとともに、理研の研究システムそのものを大きく変革させる契機となった。この研究は、極めて困難であった波長可変レーザーを開発し、その利用も展開する、いわば「開発と利用」をリンクさせながら研究を進めるという、それまでの研究機関にはなかった研究スタイルを実践した。また分子法レーザーウラン濃縮という高度な研究に適用する要素技術の開発だけでなく、工学システムの確立に成功した。このレーザー研究は時代を経て、レーザーの持つ無限の可能性をさらに開花させようという大型研究「コヒーレント科学」を切り拓いている。

レーザー科学研究プロジェクトを成功させたのは、理研固有の研究員のみによらず、理研内外の広範な分野の研究者を招聘して展開した学際的な研究システムにある。この研究システムは、その後続く理研の「光合成科学」、「国際フロンティア研究システム」などの基本モデルとなり、理研が科学技術史に輝く、多くの成果を上げて飛躍する源流となった。

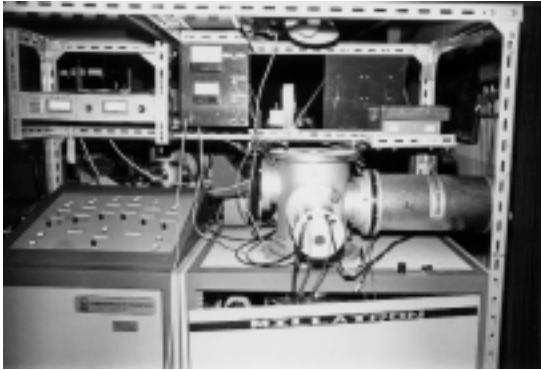
第1節 レーザーの広範な応用、理研から始まる

1960年代から着手

レーザーは20世紀最大の発明の1つといわれる。日本におけるレーザーの研究は、理研で始まったと言っても過言ではない。1960年（昭和35年）4月、理研でマイクロ波物理研究室が発足し、霜田光一主任研究員（東大教授本務）がレーザーの前身となるメーザーの研究を始めた。しかし当時、霜田は50万円の研究費調達のために苦闘していた。また、この年には半導体研究室（菅義夫主任研究員）においても、難波進研究員が電子ビーム微細加工の研究（通産省の補助金2,000万円／年で3年）をスタートさせている。これが1962年

6月ごろから始めたレーザー微細加工の研究につながっているため、理研のレーザー研究に対する取り組みは非常に早かった。

理研におけるレーザー研究に大きなエポックとなったのは、1968年（昭和43年）から3年計画で行った特別総合研究「レーザーの理化学的応用に関する研究」である。この研究は当時まだ歴史が浅かったレーザーの基礎研究を強化し、広い分野への技術的応用の可能性を探るために立ち上げた。菅理事をコーディネーターに、一宮虎雄主任研究員（後に副理事長）を代表研究者にして高性能レーザー・検出器や新光学材料の開発、レーザーに



レーザー素子開発を促進させたイオンエッチング装置

による化学合成、高出力レーザーの応用、レーザー光干渉による光計測を対象とし、レーザーそのものの開発、物質構造解析、精密計測などに研究の目標を置いた。

この研究を推進することにより、それまで、2、3の研究室に限られていたレーザー研究が多くの研究室に広がった。実際には、物理、工学、化学の分野から9つの研究室が参加し、新レーザーの研究、加工、光計測、分光、散乱測定、光化学、熱化学、熱分析、海洋研究への応用など、幅広いレーザー応用技術に関する先駆的研究が行われた結果、理研におけるレーザー研究の総合的なポテンシャルを高めるうえで極めて大きな役割を果たしている。

同じ期間（1968年から3年間）、文部省特定研究「量子エレクトロニクス」が行われているので、1970年（昭和45年）9月に京都で開催された「第6回量子エレクトロニクス国際会議」に向けて、日本全体としてレーザー研究が加速した時期である。

「レーザー科学特定研究」の立ち上げ

レーザー研究の重要性がますます高まるに

つれて、理研としてその飛躍的發展を図るため、グループ体制で新たにスタートしたのが「レーザー科学特定研究」である。レーザー研究は大学などでも行われていたが、あくまで研究室レベルであった。理研がグループ挙げてレーザー開発とその利用を進めることができたのは、同位体分離の中根良平（同位元素研究室。後に副理事長）、レーザー分光の霜田（マイクロ波物理研究室）、半導体の難波（半導体工学研究室）ら各主任研究員の存在が極めて大きく、それぞれその分野を先導する権威であった。

「レーザー科学特定研究」を始めるきっかけとなったのは、1974年（昭和49年）6月20日、東京・丸の内の日本工業倶楽部で開催された理研懇談会での中根、霜田、難波の三者会談であった。このとき、霜田がこの年の6月10日から13日までサンフランシスコで開かれた「第8回量子エレクトロニクス国際会議」の話題を提供した。ホットな話題の1つがレーザー同位体分離であり、米国のローレンス・リバモア研究所が原子法によるウラン濃縮研究を初めて公表し、注目を集めたというのである。

当時、理研には同位体分離、レーザー分光、新レーザー開発の3分野の研究室が併存していた。しかも、それぞれの分野でわが国の指導的役割を果たしていたし、このような研究を展開している研究所は理研以外にはなかった。「レーザー同位体分離のような研究こそ、理研で大きく取り上げるのにふさわしい研究テーマではないか」と3者で協議し、「レーザーウラン濃縮の基礎研究を3研究室共同で

Episode

「二号研究」悲話

ドイツ降伏で、ウラン資源は届かず

もし、二号研究が成功し、ウラン濃縮法が確立されたとして、「では、ウラン資源はどこから持って来るのか?」。稀元素の権威、飯盛里安主任研究員の回答をもとに、陸軍は全前線司令部に極秘調査命令を発し、並行して、降伏寸前の同盟国ドイツに資源の提供を要請した。1945年（昭和20年）3月24日夕刻、ドイツ海軍Uボート-234号は、日本への機密物資と日本海軍技術中佐2人を輸送する特命を帯びてキール軍港を出港する。4月15日、ノルウェー南端の寄港地クリスチャンサンを出港し、喜望峰を回る日本へ向かう大迂回コースをとる。

直後の5月7日、首都ベルリンが陥落し、ドイツは連合国に無条件降伏し、全軍に対して投降命令を出す。

当然同艦も、ただちに浮上し投降しなければ

ならない。しかし、2人の日本軍人が特命の完遂を艦長ヨハン・H・フェラーに迫り嘆願した。紆余曲折の末、艦長は浮上投降の最終決断を下し、2人に伝えた。その夜2人は自決し、丁重に水葬に付された。5月19日、同艦は浮上し、米海軍駆逐艦に拿捕され、ポーツマス軍港に抑留された。

ところで、同艦には、メッサーシュミット（高性能戦闘機）の設計者と設計図や200項目に及ぶ軍事物資のほか、特製の金属製収納箱10ケースが搭載されていた。

その後半世紀の間、米国公文書館に眠っていたU-234号関係資料等は、乗組員たちにも知らされなかったその箱の中身が『ピッチブレンド』（酸化ウランウム）560kgで、そこには“FOR JAP ARMY”と記されていたという。

推進しようということになった」と難波は語っている。

一方、日本原子力産業会議でも、先の国際会議で明らかにされたウラン濃縮研究に強い関心を示し、伏見康治委員長による「レーザーによる同位体分離についての懇談会」を発足させ、1974年（昭和49年）8月8日に第1回、9月12日には第2回と、数回にわたって委員会が開かれた。理研からは中根と難波が出席した。中根らの間では、すでに3研究室でレーザーウラン濃縮の共同研究をスタートしようという合意ができていたので、中根がその計画を話したところ、伏見委員長をはじ

め委員会に出席した委員も賛成し、11月ごろには「早急かつ相当の規模をもって着手すべき」との結論が出され、同委員会の全面支援を取りつけた。

理研が開いた日本のウラン濃縮研究

実は、わが国におけるウラン濃縮の研究は、理研におけるウラン濃縮の歴史でもある。ウランの同位体²³⁵Uに熱中性子が当たると、ウランの原子核が真二つに分裂することを発見したのは、独国のオットー・ハーンらで、1938年（昭和13年）のことである。ウランが核分裂するとき、2、3の中性子とともに



広島市の爆心地を訪れた仁科調査団

巨大なエネルギーが放出される。これが原子力エネルギーである。当時、理研の仁科芳雄の研究室でもウランに中性子を当てる研究を行い、エネルギー放出の兆候を見いだしていたが、それが“核分裂”の結果であることに気づけなかった。仁科がウランの核分裂をハーソンらよりも早く気づいていたら、ノーベル賞が与えられたかもしれない。

第2次世界大戦中に米国は、高濃縮ウランを精製して原爆にしたが、日本でも陸軍、海軍から委嘱を受けて理研と大学でウラン濃縮の研究が行われている。仁科が熱拡散法でトライした「二号研究」は陸軍の委嘱によるもので、ここで使用した熱拡散装置は終戦の4ヵ月前の空襲で破壊されてしまう。また、海軍の委嘱を受けた京大の研究もまったく基礎的な段階で、微量の濃縮ウランすらできない

状況であった。

ウラン濃縮に携わっていたわが国の研究者は、米国でさえも戦争中に濃縮ウランの製造に成功することはないと予想していたが、原爆が1945年8月6日に投下された直後に広島に急行した仁科は、日本赤十字社にあったX線乾板が感光しているのを見て新型爆弾が原爆であると確信した。そのショックは激烈であった。また、仁科が広島から送った銅線などの被曝試料の放射能を測定した木村一治（西川研究室、後に東北大学教授）は、その結果から原爆に間違いないと確認した。

戦後、ウラン濃縮研究に携わっていたほとんどの研究者は、敗戦により理研を去ったが、仁科は残った中根らに、ウラン濃縮ではなく、窒素の安定同位体（ ^{15}N 、重窒素）の濃縮研究を命じた。当時の日本が直面していた最も重要かつ差し迫った問題は食糧の増産であったが、この問題解決の一手段として、濃縮した重窒素を肥料などに加えて、それがどのような経路で植物に吸収されるかを追跡しようと計画したのである。1950年（昭和25年）、重窒素の濃縮に初めて成功、その後、それを事業化し、頒布を始めて食糧増産に大きく貢献した。この仁科研究室の一部が独立してできたのが、中根が主宰した同位元素研究室で、その後、同研究室は ^{15}N や ^{10}B の99.99%分離に成功し、理研に同位体分離技術が蓄積されていく。

ウラン濃縮法は、ガス拡散法、化学法、イオン交換法、遠心分離法、プラズマ法など多種多様な方法が開発されたが、ウラン濃縮で先行する米国が採用したのはガス拡散法であ

る。その心臓部は直径100オングストローム（Å）以下の孔が無数に開いた薄い隔膜にあった。隔膜はまったくのブラックボックスで、わが国の研究者がその中身を知ることはできなかった。

中根が住友電工の協力を得て独自にアルミナ隔膜を開発、この膜を通して $^{235}\text{UF}_6$ （6フッ化ウラン）を拡散させる「膜拡散法」を開発し、日本最初のウラン濃縮に成功したのは、1969年（昭和44年）3月のことである。この技術開発成果は、翌年（1970年）に日本原子力研究所に移管された。

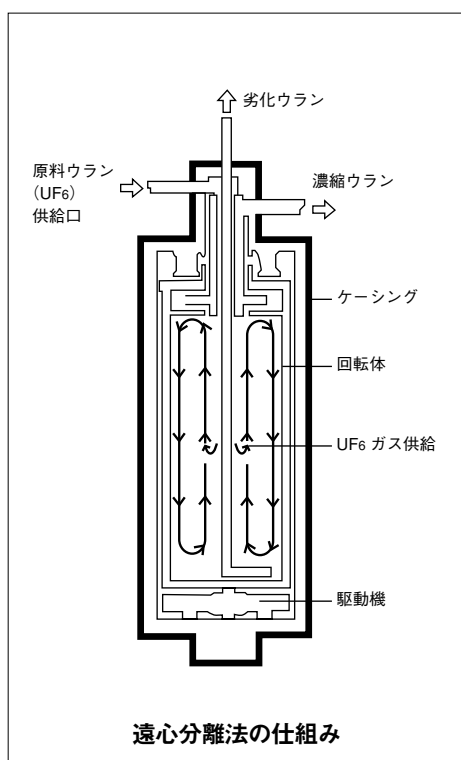
1967年2月ごろ、かつて理研の主任研究員を務め、後に日本原子力研究所の理事長を経て再び理研の招聘研究員となった核物理の大家、菊

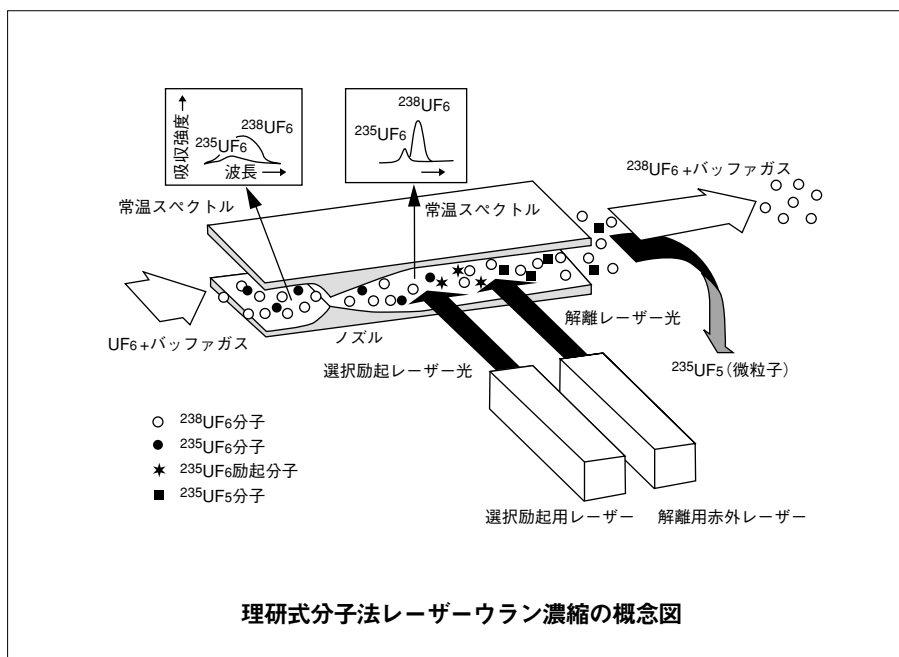
池正士が中根に次のように示唆している。

「これから日本でも濃縮ウラン軽水炉が建設される。肝心の濃縮ウランをすべてアメリカから供給してもらい、日本ではいっさい作らないというようなことをしていると、後々に禍根を残す。日本が独自の技術を持っていて、いつでも濃縮ウランを作れる態勢にあってはじめて交渉もできる。アメリカの完全支配を避けるためにも、ウラン濃縮の研究を行わなければならない」

つまり、日本で基礎研究を行って技術を蓄積すれば、いざというときに役に立つし、独自のウラン濃縮技術にまで高めることができれば、外交上、極めて有利な立場に立てると持論を展開した。菊池の考えに共鳴した中根は、同位元素研究室で蓄積してきた同位体分離と質量分析技術、それに住友電工が得意とする焼結技術を組み合わせて、 ^{235}U を濃縮できるアルミナ隔膜およびテフロン隔膜の研究と取り組み、開発に成功した。このとき、理研において本格的なウラン濃縮の研究の扉が開かれたのである。

他方、理研は遠心分離法にも取り組んでいる。1956年（昭和31年）、独国で開発された遠心分離法は効率良く濃縮ウランを作れる可能性があるといわれ、世界的に注目を集めた。これに刺激を受けた理研の化学工学研究室の大山義年主任研究員（後に東工大学長等を歴任）は、ただちに遠心分離法の研究に着手し、1959年（昭和34年）に試作機を製作して基礎実験を行った。しかし、大山の定年退職とともに理研における遠心分離法の研究は終止符を打ち、同装置と技術は2年後の1961年に原





子燃料公社、後の動力炉・核燃料開発事業団（現特殊法人核燃料サイクル開発機構）に引き継がれた。遠心分離法によるウラン濃縮が成功したのは1969年4月のこと。これが日本における遠心分離のパイロットプラントで、その後、改良を加えた遠心分離プラントが青森県六ヶ所村の日本原燃（ウラン濃縮事業会社）で原子炉燃料の製造に使われている。

分子法レーザーウラン濃縮研究にフォーカス

理研とともに、日本原子力研究所もレーザーウラン濃縮の計画を立てていた。原研は理研と共同で、1970年（昭和45年）からガス拡散法によるウラン濃縮の研究を行ってきたが、1975年（昭和50年）度で終結することになっていたので、その後継としてレーザーウラン濃縮を検討していた。しかし、理研と原研は

ともに科学技術庁傘下の特殊法人で、2つの研究所が同じ研究テーマで行うのは得策ではなく、中根は原研の山本賢三理事、青地哲男ウラン濃縮研究室長、理研の宮崎友喜雄理事と協議するとともに、原子力委員会の基本方針に沿って、理研は $^{235}\text{UF}_6$ の振動励起による、いわゆる「分子法ウラン濃縮」を、原研はウラン原子を直接励起する「原子法ウラン濃縮」で取り組むという棲み分けが行われた。

ところが、1974年（昭和49年）当時、日本のウラン濃縮技術の開発は、電力消費量の少ない特徴を持つ遠心分離法にすることが決定されていた。理研と原研の棲み分けはほぼ同じ時期であったために、原子力予算としてレーザーウラン濃縮の研究費を要求することは認められず、理研としてはウランだけでなく、いろいろな元素の同位体分離、レーザーによ

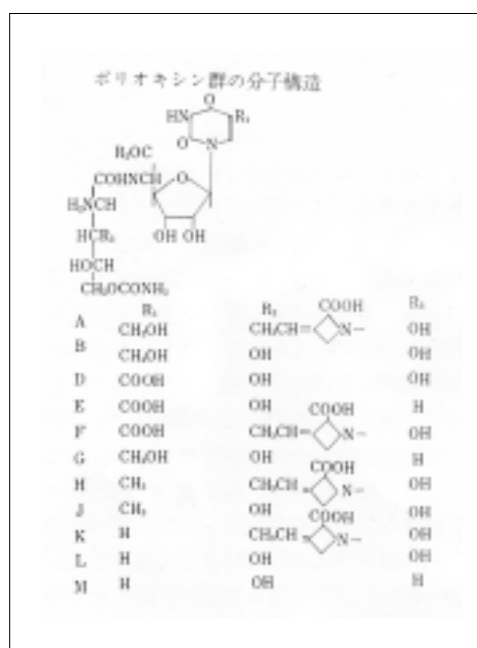
る分子の化学反応の反応機構を基礎から追究する特定研究「レーザー誘起化学反応の研究」を行うことにした。

この年の秋ごろから3研究室で同位体分離、レーザー分光、新レーザー開発などを中心に研究計画の作成に入り、レーザー関係の1976年（昭和51年）度予算を科学技術庁に要求した。日本原子力産業会議の支援と大蔵省の理解により、1970年から1975年まで毎年、理研に配分されていたガス拡散法によるウラン濃縮の研究費を実質的に転換し、当時としては巨額の予算がレーザー研究に異例の早さで投じられることが認められた。この結果、レーザー関連の研究をここに集約して「レーザー科学特定研究」をスタートさせ、理研におけるレーザー研究一般のレベルアップを図るとともに、レーザー同位体分離の基礎研究を推進する方向ができた。

この間、理研のレーザー研究を先導する出来事があった。1973年秋に第1次エネルギー（石油）ショックが突発、日常生活全般に大きな影響を及ぼしたが、鈴木三郎（抗生物質研究室）主任研究員らが開発した農薬用抗生物質ポリオキシンの特許実施料収入が収入予算額を大幅に超え、約5,000万円の余剰金が生じた。余剰金は、発明者への報償金を除いて国に返さなければならない。そこで関理夫普及課長代理らは、西本靖経理部長や企画部の山本剛部長、宮川寿夫課長らと相談。この予期せぬ余剰金は直ちに国に返すことはせず、理研として当面緊急に推進すべき研究（例えば、レーザー研究）への使用を得策と考え、中根、霜田、難波各主任研究員に進言した。

この事務局からの進言を受けて、中根らは粕谷敬宏副主任研究員を中心とする「レーザー誘起化学反応研究」を取りまとめ、主任会議に提案し同意を得る。引き続き、経理、企画両部は、科学技術庁、大蔵省に強く要請して承認を得るに至った。こうして、この余剰金（自己収入）の中から約3,000万円の弾力的措置が講じられ、上記研究計画が開始された。当時としては画期的であったこの措置が、1975年（昭和50年）度に「レーザー科学特定研究」計画をスタートさせるための“呼び水”として有効に利用できたことは付記しておかなければならない。

このようにして、6研究室（マイクロ波物理研究室、半導体工学研究室、同位元素研究室、プラズマ物理研究室、光学計測研究室、



レーザー科学研究の呼び水（研究費）をもたらした農薬用抗生物質「ポリオキシン」

理論有機化学研究室)の参加のもと、「レーザー科学特定研究」が(1)レーザー誘起化学反応の研究、(2)光情報処理技術の基礎研究、(3)新しい高性能レーザーの開発の3つのテーマの下にまとめ、1976年度に科学技術庁から研究費1億円が予算化された。

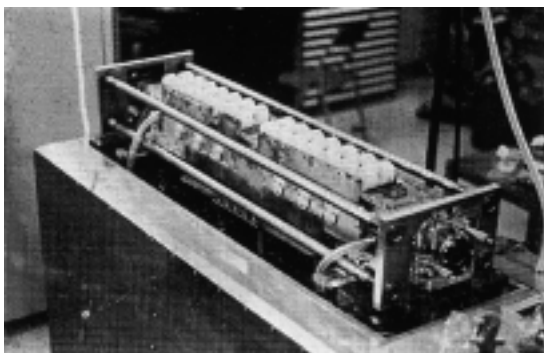
大学などから「流動研究員」を初めて招聘

研究を推進する組織についても、1977年(昭和52年)度概算要求の申請に当たって種々検討された。レーザー・サテライト研究所(案)も浮上したが、物理から化学など多分野の研究者がより緊密に協力する必要があるとの観点から、研究室の枠を超えた多数の研究員で構成した「レーザー科学研究グループ」を新設し、「レーザー分光」、「レーザー光化学」、「新レーザー技術」の3グループで研究を推進することにした。

1977年1月13日に研究費1億7,400万円、レーザー科学研究棟の建築(1977年度と1978年度の債務負担行為)が内示され、同年4月16日に「レーザー科学研究グループ」が正式に認可された。新規に人員(副主任研究員3名、

研究員2名)も認められて研究体制が確立した。まず、理研の各研究室に所属する研究者が専任または兼任の形で参加し、このほかに、長期、短期の流動研究員17名を外部から迎える仕組みを採用、併せて研究棟の建設に取り掛かった。6月末にグループヘッドに中根、レーザー分光研究リーダーに粕谷副主任研究員、レーザー光化学研究リーダーに霜田、新レーザー技術研究リーダーに難波を選出した。また、レーザー科学研究に関する研究の現状や成果を周知させるために、定期(毎年)刊行誌「レーザー科学研究」を出版することとした。

レーザー科学研究を推進するために、1977年度からスタートした、大学や他の研究機関、海外から研究者を招聘する「流動研究員制度」は、研究グループにとって研究者結集の強力な方策としてその後も続けられ、「レーザー科学研究グループのフレキシブルな研究展開に極めて有効であった」と難波は強調している。事実、流動研究員制度は革新的な研究システムとして理研で定着していく。



横放電型CO₂レーザー



色素レーザー

新しい分子法に目標を転換

1978年（昭和53年）1月、1978年度予算実行計画を検討し、レーザー誘起化学分野の研究を推進するうえで特に重要となる赤外域長波長レーザーの開発を重点とし、化学励起臭化水素（HBr）レーザー、TEA（大気圧横放電型）炭酸ガス（CO₂）レーザーの開発に着手することにした。

当初のレーザー同位体分離法は、弱い赤外レーザーによって²³⁵U原子を1段ないし2段励起し、次いで強い紫外レーザーで電離するものであった。

ウラン化合物の分子スペクトルは、原子スペクトルよりもはるかに複雑で、同位体シフトも未知であった。したがって、分子法ウラン濃縮を効率よく行うためには、各種ウラン化合物の分子スペクトルとその同位体シフトを十分精密に知る必要がある。そこで、第I期の研究目標を、精密赤外分光技術の開発（レーザー分光グループ）およびレーザーによる化学反応とその機構の研究（レーザー光化学グループ）、レーザー計測および制御技術と新型レーザーの開発（新レーザー技術グループ）に置いて、分子法ウラン濃縮の基礎研究を重点的に展開した。

1978年度予算で、研究費2億700万円、新規人員枠として主任研究員1名、研究員3名、技師1名（1978年3月31日認可）が決まった。ここで主任研究員枠が認められたのは、理研としては画期的なことであった。その後、1978年11月に組織を見直し、グループヘッドに主任研究員の霜田、レーザー分光研究リーダーに副主任研究員の粕谷、レーザー光化学



完成したレーザー科学研究棟（II期）



相対論的電子ビーム（REB）励起高出力エキシマレーザー

研究リーダーに荒井重義副主任研究員、新レーザー技術研究リーダーに豊田浩一研究員を選出した。霜田が1981年（昭和56年）3月に定年退職する後を受けて、難波がグループヘッドを引き継ぎ、予算執行を全面的に見直してプロジェクト研究推進方式に変更した。1978年11月にレーザー科学研究棟の1期工事が完成し、それまで別々に研究を進めていたレーザー研究者を一堂に集めて研究を推進する体制が整った。そして、1979年度予算で研究費2億9,200万円、レーザー科学研究棟の建設（1979年から1980年度2カ年の債務負担行為）が決まった。

以上のような経過により、レーザー科学特定研究の第Ⅰ期は、1976年（昭和51年）度に3期9年計画でスタートした。その第1期3年間（研究費4.8億円）では、レーザー科学全般にわたる開発研究に重点を置き、レーザー関連の設備、研究者の充実を目指した。

世界初のレーザーによる同位体分離

第2期（1979年度～1981年度の3年間。研究費8.7億円）にレーザー科学研究棟2期工事が完成（1期、2期のレーザー科学研究棟の総工費約9億円）し、前記3研究室のレーザー関連の研究を一堂に集めて、参加研究者各自の自律的研究を有機的に結合させつつ、総合的にプロジェクト研究を進めていく体制を構築、レーザー同位体分離の基礎となる超精密分光の研究や各種大出力長波長レーザーの開発を行った。

1982年（昭和57年）4月からの第3期3年間（研究費7.3億円）は、難波がグループヘッドを担当し、また豊田が半導体工学研究室主任研究員になったのを受け、**金弼鉉**副主任研究員が新レーザー技術の研究リーダーになった。第3期では分子法ウラン濃縮の研究に焦点を絞り、1984年度に新たに**高見道生**研究員をグループリーダーとする「重金属同位体分離グループ」を発足させ、本プロジェクト研究の最終年度である1984年度末までに、レーザーウラン濃縮の基礎実験を成功させるべく努力した。

レーザーによる同位体分離の研究に関しては、1980年（昭和55年）に「レーザー光化学」の中根グループがCO₂レーザーを用いてトリ

チウムの分離に成功した成果を挙げるができる。これは世界初のレーザーによるトリチウムの同位体分離で、分子法の有効性を確認するための重要なステップとなった。1983年11月には、高見らが16 μ m帯にある²³⁵UF₆の吸収スペクトルを、過冷却ジェット法と半導体レーザー分光により精密測定し、また**田代英夫**研究員（後に田代分子計測工学研究室



レーザー法でトリチウムの分離に成功（1980年）



赤外波長可変ラマンレーザー

主任研究員)らが16 μ m帯の高出力可変波長ラマンレーザーを開発した。この成果がレーザー科学特定研究第II期の計画を推進する原動力となった。

30歳代の研究者「3T」の協力が奏功

レーザー法により世界の先陣を切ってトリチウム同位体分離に成功したのは、「レーザー光化学」の武内一夫(現武内ナノ物質工学研究室主任研究員)、栗原修らの研究員である。トリチウムは放射性物質で、原子力発電施設での環境保全のために分離、除去が欠かせない。武内らはまずトリチウム原子を他の化合物に移行させてトリチウム化合物を作った。これにパルスレーザー(TEA CO₂レーザー)の特定の発振線を選び、トリチウムを濃縮するために最も効率の良いレーザー光の波長、光強度、パルス幅などの条件を計算で求めた。この光を照射することにより、米国のローレンス・リバモア国立研究所よりも早く、1980年5月、初の濃縮に成功する。ここでは赤外多光子解離という新しい方法を利用しており、当初は10倍から1,300倍程度、半年後には2万から3万倍、さらに、それ以上は測定不能というレベルまで濃縮度を高めた。これにより、レーザー光で思い通りに反応を起こさせるという新しい学問領域を確立、この技術をウラン濃縮に結びつけた。

赤外多光子解離技術については、この技術が世界的に注目される1年前に武内らが成功していたが、これをウラン濃縮に生かすには、トリチウム濃縮とは比較できないほど高い技術的な壁があった。しかし、トリチウム濃縮

で確立した赤外多光子解離方式がウラン濃縮でも大きなアドバンテージとなった。それを実現する手段は高性能レーザーにあった。

天然ウラン化合物のUF₆は常温で気体である。これには同位体化合物として²³⁵UF₆と²³⁸UF₆があり、いずれも16 μ mという波長に強い赤外線吸収を持っているが、2つのウランの間には、質量のわずかな違いから赤外線吸収波長に極めて小さなずれ(0.015 μ m = 0.6cm⁻¹)が生じる。この同位体シフトを利用して、天然には0.7%しか存在しない²³⁵UF₆だけに16 μ mレーザー光を照射することにより解離反応を起こさせ、目的とする物質を捕集するのが、分子法によるウラン同位体の分離濃縮である。分離濃縮するためには、2つの波長の異なる16 μ mの光が必要になる。すなわち、同位体シフトを利用して²³⁵UF₆分子に共鳴する16 μ m光で振動エネルギーを与えて同分子を励起する。さらに、強力な16 μ mのパルス光を与えることにより、励起中の²³⁵UF₆分子に光解離を起こさせて²³⁵UF₅とフッ素(F)に解離し、目的とする²³⁵UF₅だけを微粉末として捕集する仕組みである。

当時、²³⁵UF₆を励起する16 μ mの波長帯には、この目的に適したレーザー光源がなかった。田代は波長10 μ mのCO₂レーザーを誘導ラマン散乱という波長変換法により16 μ mの光に変換する技術を開発した。具体的には、CO₂レーザーと波長変換部(水素ラマンレーザー)でレーザーを構成し、波長10 μ mのCO₂レーザー光を水素ガスを満たした変換部の中で数十回往復させることにより、²³⁵UF₆を解離するのにピッタリ合った16 μ mの波長



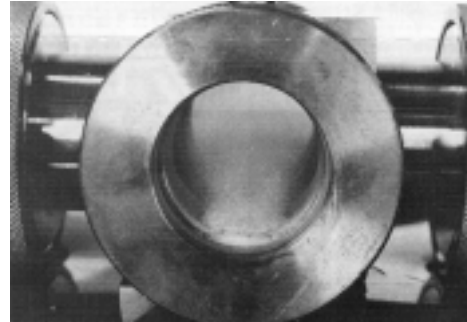
「分子法レーザーウラン濃縮の可能性の確認」で
記者会見する研究グループ（1985年8月）

を取り出すことに成功した。

この場合、パルス波形のピークパワーが高く、1秒当たりの出力も大きいレーザーが多光子解離の光反応には本質的に不可欠である。また、 $^{235}\text{UF}_6$ にまんべんなくレーザー光を照射するためには、パルスの繰り返し数を高めることも重要課題で、これら2つの課題を克服して高性能TEA CO_2 レーザーを開発した。田代は「 CO_2 レーザービームのクオリティと出力をいかにバランスさせ、安定して運転できるようにするかがポイントだった。ここに緑川克美ら若手研究者のチームワークが寄与した」という。

ラマンレーザーを使ってウラン濃縮研究で連携し、指導的役割を果たした田代と武内はともに30歳代の若さで、ここに加わった高見とともに、レーザー研究グループの“3T”と称された。

しかし、まだ課題があった。常温では UF_6 の振動状態はさまざまで、いろいろな状態で光を吸収するため、吸収スペクトルの幅が広がってしまい、 $^{235}\text{UF}_6$ と $^{238}\text{UF}_6$ の吸収スペクトルがその中に隠れて区別できなくなる。そ



レーザー法で製造した $^{235}\text{UF}_6$ 粉末

こで、 UF_6 分子の振動エネルギーを最も低い基底状態にすることが必要で、そのためには冷却すると良い。これによって同位体による差がはっきりと現れ、微粒子状の $^{235}\text{UF}_5$ を得ることができる。武内と田代は、赤外多光子解離方式で UF_6 ガスを100K以下に冷却すれば、1段の分離係数が4を超える見込みが十分あるとの結論を得ていた。真空中に高压ガスを噴出させる過冷却ジェット法によってガスを冷却し、スペクトルの精密測定研究を担う高見道生グループとの連携プレーが功を奏していく。この実証研究に的を絞ったのが第Ⅱ期研究である。

新体制で第Ⅱ期計画を推進

レーザー科学研究第Ⅱ期は、1985年（昭和60年）度から「重金属同位体分離」、「新レーザー」、「レーザープロセス」、「レーザー分子加工」の4グループ体制で発足した。第Ⅱ期では、レーザー分光とレーザー光化学をプロジェクト研究から外し、第Ⅰ期で成功を収めた分子法レーザーウラン濃縮の成果を原理実証研究としてさらに発展させるために、レー

ザープロセスグループが中心になって、各グループが連携して研究を行うことを主要な柱とした。

また、レーザー分子加工グループでは、将来発展が望まれる分野を開拓することを目的として短波長レーザーの開発、並びにレーザーによる新材料の研究も推進していくこととした。各グループとリーダーは、以下の通りである。

- ◇ 重金属同位体分離グループ（高見）
- ◇ 新レーザーグループ（難波）
- ◇ レザープロセスグループ（難波）
- ◇ レザー分子加工グループ（青柳克信）

1987年（昭和62年）には組織を見直し、新レーザーグループリーダーに田代副主任研究員、レーザープロセスグループリーダーに武内主任研究員が選ばれた。1988年3月末で難波が定年で退職、同年4月から青柳克信主任研究員がレーザー科学研究グループを率いることになった。

この第Ⅱ期内に、武内、田代らは新たな成果を導き出した。反応装置内で極低温に冷却した²³⁵UF₆に16μm付近でわずかに波長が異なる複数の赤外レーザー光を照射したところ、分子レーザー法の限界といわれていた分離係数2に対して、1987年4月に2.3を、翌年4月には4.7を得て、分子法の有望性を示した。

この分子法によるウラン濃縮に関し、1984

年（昭和59年）の春から夏にかけて動力炉・核燃料開発事業団から協力研究の申し入れがあった。当初は、単にレーザー技術の提供といった程度の依頼であったが、動燃が将来、自前のレーザー濃縮技術を持たなければ、分子法の発展は不可能との結論が両者間で得られた。

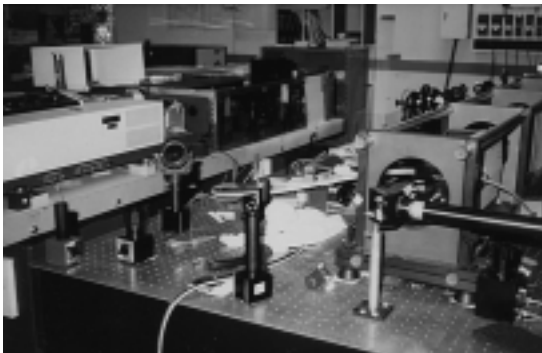
1985年4月、両者は「分子法レーザーウラン濃縮に関する研究協力協定」を結び、1990年（平成2年）から理研・動燃の共同プロジェクトがスタート、1993年度から理研における研究成果は動燃に移管された。田代は動燃のレーザー開発について直接、技術指導に当たり、パルス繰り返し周波数100Hz規模の大型分子法レーザーシステムを完成させた。これにより、同年9月には分離係数7.5（濃縮度5%に相当）、1994年10月には分離係数が約15（濃縮度10%に相当）を得るほどの優れた成果を上げ、分子法レーザーウラン濃縮研究は成功を収めた。

このように、産業の基盤になるような要素技術を開発し、大きな足跡を残したが、濃縮ウランの需給が長期的に供給過剰に推移する方向が強まったこと、動燃が1998年（平成10年）に特殊法人核燃料サイクル開発機構に衣替えするときに行った事業縮小により、分子法レーザーウラン濃縮研究は残念ながら中断された。原子法についても2004年に同様の措置が取られている。

第2節 光をデザインする時代

軟X線レーザーなどエポックを画す成果

「レーザー科学研究」では、分子法レーザーウラン濃縮用のCO₂レーザーをはじめ、色素レーザー、エキシマレーザー、フェムト秒レーザーのほか、半導体へのイオン注入など多彩な研究が行われた。中でも、第Ⅰ期の1980年（昭和55年）に、河村良行研究員が電子ビーム励起によるKrF（フッ化クリプトン）レーザー（エキシマレーザー）の開発に成功し、半導体のリソグラフィーに応用でき



超短パルスレーザー



可変波長ピコ秒レーザーシステム

ることを示した。この成果は、エキシマレーザーアブレーションの先駆的な研究となり、半導体微細加工に新しい流れを作り出した。エキシマレーザーによるリソグラフィーは現在、主要な半導体の微細加工に欠かせない手法となっており、理研のレーザー開発の中でもエポックを画すものとなった。

さらに、第Ⅱ期プログラムを展開中の1980年代半ば、青柳、瀬川勇三郎らは新しい2つの現象を捉えることに成功した。通常、レーザー光は結晶の中も光の速度に近いスピードで進むものと考えられていたが、特殊な結晶中では、通常の400分の1、あるいは1,000分の1といった非常に遅いスピードで進み、結晶から出た光は、通常の光の速度となって進む現象を見つけた。また、結晶にレーザー光を当てると、反射光と透過光が出てくる。これが一般的な現象で、マクスウェルの境界条件という理論で説明される。ところが、特殊な結晶と特定の条件下では、反射光と透過光がそれぞれ1本ずつではなく、反射光が1本、透過光が2本現れる現象を見つけた。このことは、万能とされたマクスウェルの理論では説明できない、いわば、常識を覆すものであった。これらの現象は、この期間中に青柳、瀬川らが開発と取り組んだ可変波長ピコ秒レーザーシステムを使ってはじめて突き止めたものである。光のスピードが結晶中で遅くなる現象を利用すると、光の遅延回路などを構成することが考えられている。

一方、未踏の波長域に踏み込む成果も上げ

ている。特に、X線領域のレーザー、それよりも波長が少し長い軟X線領域のレーザーができれば、医療や半導体リソグラフィ、X線ホログラフィーといった高度な応用が期待されているが、技術的なバリアの高さがその実現を阻んでいた。3～4 ÅレベルのX線領域、100 Åレベルの軟X線領域でレーザーを発振させるには、建物1つくらいの巨大な装置にする必要があった。そのため、青柳、原民夫らは小型化を目指し、レーザー励起方法を工夫することによって、従来とはまったく異なった領域にX線レーザーを得る高利得領域があることを見だし、机に乗るほど大幅に小型化した軟X線レーザーを開発した。

具体的には、ガラスレーザーの光を細長いレンズで絞り、アルミの金属ターゲット上に線状（帯状）に集束すると、アルミの表面に電子がほとんど剥ぎ取られたイオン（多価イオン）と電子によるプラズマが発生する。これに加え、レーザーパルスを1回出した後、パルスを繰り返し出す方式にし、最初のパルスで発生したプラズマを次のパルスで加熱するような方法を採用することにより、超大型装置と同等のX線領域のレーザー発振に必要な利得を得ることに成功した。

この軟X線レーザーで狙ったのは、23 Å～44 Å近傍にある「ウオーター・ウインドー」と呼ばれる波長域。ここは水に吸収されない波長域で、この波長を使うと、人体のいっそう精密なX線像が得られる。水分で吸収されることがないため、診断したい領域だけに焦点を絞って弱い光で照射できる利点があり、従来のX線診断装置に比べて精密な情報をつ

かむことができるとともに、人体にやさしい特徴がある。この波長のレーザーはこの期間では実現できなかったが、実現できた135 Åの軟X線波長は、次世代半導体のリソグラフィに欠かせないEUV（極端超短波長）光源として極めて重要で、この波長は現在、多くのところでリソグラフィ用光源として研究開発が進められている。

これら軟X線レーザーはまだ実用に結びついてはいないが、軟X線レーザーの小型化や高性能化、エキシマレーザーなどを含めて、各種レーザー開発では理研はいろいろな面で先鞭をつけたのは言うまでもなく、内外で研究を加速させる火付け役となった。これらのレーザーの基礎研究成果をもとに、「レーザー科学研究」の第Ⅲ期研究へと移行した。

1991年（平成3年）4月から、豊田主任研究員のもと組織を一新し、第Ⅲ期がスタートした。レーザー研究分野での先端的研究課題を推進するために、「短波長レーザープロセッシング」、「新レーザー技術」、「レーザー分子制御化学」、「表面ダイナミクス」の4研究グループ体制で基礎から応用まで特色ある研究が行われた。各グループのリーダーは、青柳（半導体工学研究室）、豊田（レーザー科学研究グループ）、高見（無機化学物理研究室）、青野正和（表面界面研究室）の4主任研究員である。

第Ⅲ期では、短波長レーザーや可変波長レーザーの光源開発と、それら特徴のあるレーザーを駆使した新しいエレクトロニクスへのアプローチという、いかにも理研らしい研究が行われた。

「コヒーレント科学」研究プロジェクト

レーザー科学研究は1996年（平成8年）度末をもって研究を終了したが、その後、1997年（平成9年）4月にはレーザー関連研究を推進する研究室として新たに「レーザー物理工学研究室」（緑川主任研究員）が発足し、レーザー科学研究の成果を継承すべく「コヒーレント科学研究」がスタートした。

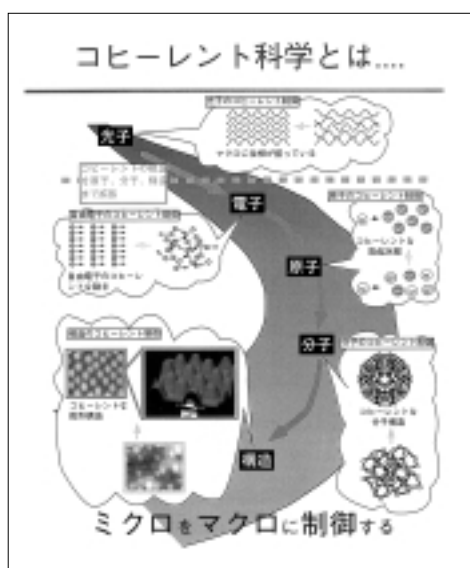
レーザーのように光波の位相がそろっていることをコヒーレントというが、緑川はミクロな物質の配列や構造が協調的に相互作用し、マクロな現象を生じる性質をコヒーレントと呼び、これを利用して新しい機能や特性を持つ材料やデバイスを作る基礎を築くことを目標に、「コヒーレント科学」を提唱する。コヒーレントという概念を光だけでなく、電子、原子、分子などの物質系までに拡張したのが「コヒーレント科学」である。レーザー

科学研究をバックグラウンドにしているが、切り口を大きく変えたもので、コヒーレント科学という新しい研究分野を開くために、1997年に和光キャンパスの研究室、研究員を横断する形で「コヒーレント科学研究推進グループ」を組織した。青柳がグループリーダーになってプロジェクトを立ち上げ、その後、緑川に引き継がれた。

ここでは、レーザー研究を中心とした「コヒーレント自由電子制御」、量子ドットなどを扱う電子工学分野の「コヒーレント量子プロセッシング」、フラーレンやナノチューブなど規則正しい物質構造を扱う化学・材料科学分野の「コヒーレント構造制御」、表面分子と吸着分子の相関を扱う表面科学の「コヒーレント分子相関」があり、制御対象も光子、電子、原子、分子、構造と広範囲に及んでいる。

第1期（1997年度～2002年度）では、緑川グループでフェムト秒を用いたX線レーザーの発生、また多光子吸収による極短波長の発生などの成果を上げ、これを受けて、第2期（2003年度～2007年度）に入っている。第1期では、光科学から生まれたコヒーレントという概念を物質系に拡張し、第2期では、原点である光を中心にコヒーレント科学の追究に移行している。いろいろな光をデザインして物を見たり、物質の状態を変えたり、加工することにチャレンジしている段階である。

この第2期では、緑川レーザー物理工学研究室、田原分子分光研究室（田原太平主任研究員）、石橋極微デバイス工学研究室（石橋幸治主任研究員）を核に、中央研究所のさま



コヒーレント科学のコンセプト

Memo

■理研と応用物理学会

理研は応用物理学会と深い関わりがある。物理学と工学を結ぶ『応用物理学』を冠にした初の学会（社）応用物理学会が設立されたのは、終戦の翌年の1946年（昭和21年）。雑誌『応用物理』はその14年前（昭和7年）に創刊されている。この雑誌は23名のメンバーから成る応用物理懇話会が編集母体となって創刊された。懇話会の顔ぶれは、ピストンリングの海老原敬吉、アルマイトの鯨井恒太郎、X線と結晶構造研究の寺田寅彦、磁性金属の三島徳七ら理研の研究者を含む23名、顧問には、財団理研の黄金期を支えた長岡半太郎（理研）、本多光太郎（東北大）、大河内正敏（理

研）の重鎮が、小野鑑正（九大）、松村鶴蔵（京大）とともに名を連ねている。

理研と東京大学工学部の有志が物理、電気、機械、金属、化学などの学問をいかに実社会に適用させるべきかを議論しているうちに、形（雑誌）に残そうという機運が強まり、雑誌創刊に結びつけた。創刊号では、「応用物理とは何か」など応用物理の重要性について、長岡、本多、大河内がそれぞれ「発刊の辞」を述べている。当初、事務局は理研に置かれたが、その後、東大工学部の応用物理学教室を経て、東京・九段北にあり、現在は英文論文誌「JJAP」も発行し、日本有数の学会になっている。

ざまな分野の研究者が加わり、研究のスピードアップを図っている。コヒーレント科学のカギを握るのが、短いパルスや短波長のレーザーの開発で、フェムト秒（ 10^{-15} 秒=1,000兆分の1秒）よりもさらに1,000分の1も短いアト秒（ 10^{-18} 秒=100京分の1秒）単位のパルスレーザー開発にも見通しをつけており、未知の研究分野に切り込む体制を整えつつある。

「コヒーレント科学を、理研が誇る光科学や応用分野の最先端の研究者と連携して大きく発展させ、可視光で極限まで開発された技術をテラヘルツからX線までより広い波長域でも実現したい。そうすれば、ミクロからマクロまでマルチスケールでの計測や物質の制御が可能になり、生命や物質の階層構造を横

断的に理解できるようになる。それがコヒーレント科学の発展形」と緑川はビジョンを示す。

学際研究の効果を証明

1976年（昭和51年）度にスタートしたレーザー科学研究グループは、発足から21年を経て1996年（平成8年）度末に終了した。難波は「今こそプロジェクト研究やグループ制は珍しくないが、レーザー科学研究グループの発足当初は加速器研究を除くと、理研では初めての大型プロジェクト研究であった。先端的な高性能レーザーの開発とその利用を並行して推進するという研究上の特色に加えて、その運営もまた新たな試みであった。第I期末から第II期にかけてのレーザーウラン

濃縮の原理実証の成功後は、研究のスペクトルも多彩に広がり、国際的にも注目を集める成果が多数現れるようになった」と総括している。

中でも、特筆すべきことは、グループ研究ということで成果発表や調査研究のための渡航費用が予算化されていたことだけでなく、流動研究員（期限付き雇用研究者）制度ならびに外国人研究者の招聘など、現在では当たり前になった制度の多くがレーザー科学研究で初めて導入されたことである。

いわば、レーザー科学研究は物理、化学、電子、光化学、光計測・分析、材料、プラズマ、放射線化学といった極めて幅広い多分野の研究者が参加し、展開したもので、この新しい研究システムが数多くの成果に結びついた。このプロジェクトに参加した研究者は延べ1,000名を超え、そのうち、外国人研究者を含む流動研究員は数百名に上る。理研の「レーザー科学研究」プロジェクトを通して全国に巣立った多くの研究人材が、大学や研究機関、企業を舞台に多面的なレーザー開発、応用を推進する立役者となっている。

これは学際研究が多大な効果を上げることを実際場で証明したといえるもので、この流動研究員と外国人研究者招聘による研究システムはその後、理研が展開した「国際フロンティア研究システム」などのモデルとなり、理研の研究システムはもとより、日本の新しい研究システムを構築するさきがけとなった。しかも、レーザー科学研究は新しい光をデザインする21世紀の「コヒーレント科学」領域を切り拓いており、レーザー科学研究は

当初の使命を十分に達成し、グループ研究のあり方を含めてその成果を次世代に引き継いだと言える。

レーザー科学研究は新しい分野を拓く大きな成果を挙げたが、すべてがスムーズに展開できたわけではない。「大型プロジェクト」ということだけで、理研内だけでなく、グループ内にも反発する勢力があった。レーザー科学研究が始まって10年目の、1985年（昭和60年）にスタートした「分子法レーザーウラン濃縮研究」でも、同じような反発があった。しかし、レーザーの持つ広がり、将来性などに期待した当時の宮島龍興理事長の指導方針と上坪宏道主任研究員会議議長らの強力な指導力があったから、プロジェクトは大成功を収めたのである。

霜田は「レーザー科学研究」の最終号（第19号、1997年9月30日発行）に「レーザー科学の革新性」と題し、次のような一文を寄せている。

「レーザーは基礎科学の成果を応用して生まれたものではなく、理学と工学の融合により生まれたもので、これまでの基礎科学と応用科学の概念に変革を迫っている。レーザー科学は科学技術の階層構造に革新をもたらし、分子制御化学、量子細線などのナノ構造科学、近接場光学、レーザープロセッシングなどレーザー科学が与えた革新性は明らかである。X線レーザー、テラワットを超える超高尖頭出力、フェムト秒、アト秒といった超短パルスなど革新的科学技術の夢は広がっていく」。レーザーはまさに、そうした夢にフォーカスしながら発展している。