

第5章

光合成科学

～新エネルギー創成への挑戦～

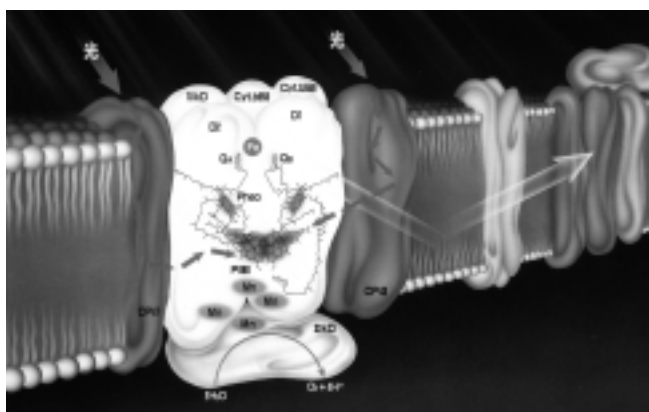
理研が20年にわたって展開した「植物の光合成」研究は、光合成研究における理研の高いポテンシャルを世界にアピールするものになった。光合成水分解触媒である「マンガングラスタ」の構造を解明し、太陽光エネルギーを利用して水を分解し、水素を生産する「新エネルギー創成システム」設計に指針を与えるという研究目標を達成した。また、特定の温度領域で葉緑体が発光する熱発光という手法で理論的に解明した成果は、新しい標準的な測定法として定着し、世界の光合成研究の進展に大きな影響を与えた。

それだけではない。この研究は「日米」、「サミット先進国間」という2つの国際研究協力事業として推進したもので、理研として本格的に取り組んだ初めての国際研究協力であった。ここで取り入れた研究システムは、理研はもとより、日本の研究機関が国際研究協力を進めるうえでの“雛型”になった。すなわち、「欧米の若手研究者を理研に招き、理研の研究に直接参画させる」という研究システムを構築し、その後、理研にとって研究体制を大きく変革する「国際フロンティア研究システム」のモデルにもなった。

第1節 20年間、国際的地位を確保

日米光合成研究協力は、1979年（昭和54年）に開始し、1999年（平成11年）の日米研究協力協定の終了まで20年間にわたり実施され

た。第1期（1979－1988年）には、理研特定研究（太陽光エネルギー科学研究）として、植物の葉緑体に存在する光合成反応中心の構造と機能を解明し、太陽光エネルギーで水を分解、水素を得る人工系の設計に指針を与えることを目標に、生物部門に重点を置いた基礎研究を実施した。第2期（1989－1999年）には、理研基礎科学研究（光合成研究）として、植物の光合成をモデルとして大気中CO₂濃度の上昇に対処する人工系を開発することを目標に、化学・物理部門に重



光合成水分解系の分子構築モデル

点を置いた基礎研究を実施した。

いずれの部門でも、全研究実施期間を通じて活発な研究が展開された。とりわけ生物部門においては、理研独自の研究手法を駆使して活発な国際協力研究が実施され、その成果の頻繁な論文出版によって、理研太陽光エネルギー科学研究グループの評価は国内外で急速に上昇した。約20年間にわたって、光合成研究分野における国際的有力研究グループの地位を保ち続け、種々の面で理研の存在を世界にアピールした。

これらの研究の特徴は、「日米光合成研究協力」と「ヴェルサイユ・サミット先進国間研究協力」の2つの国際研究協力事業を下支

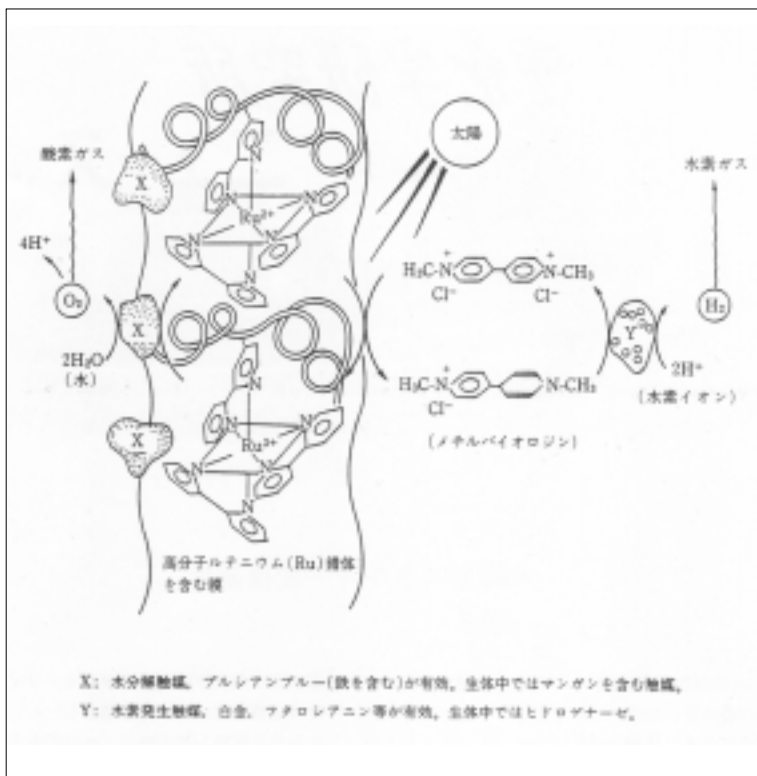
える「受け皿研究」として実施された点にある。また、それまでの国際研究協力では、先進国の科学技術の吸収を主たる目的に理研の研究者を欧米諸国に派遣したのに対し、本事業では欧米の若手研究者を理研に招き、直接理研の研究に参画させることを目的に実施された点で革新的であった。この国際研究協力事業の実践を通じて、研究内容、研究手法や技術が十分に個性的ならば、欧米諸国の若手研究者は躊躇せず理研の研究に参画することが実証された。

そのことが理研国際フロンティア研究システムを含め、1986年（昭和61年）以降、急速に推進された理研国際化に関する基本的な考え方を形成するうえで、先駆的な役割を果たしたと位置づけることができる。

ここでは、具体的な研究内容・研究成果に関する記述は最小限に留め、日米光合成研究協力事業を手探りで開始することになった経緯、とりわけその過程で遭遇した困難な体験を中心に記載する。

太陽エネルギー研究提案の時代的背景

1972年（昭和47年）に、ローマクラブがまとめた報告書「成長の



人工光合成による水素生産システムの想像図

X: 水分解触媒、ブルリアンブルー(鉄を含む)が有効。生体中ではマンガンを含む触媒。
Y: 水素発生触媒、白金、アタロレアニン等が有効。生体中ではヒドロゲナーゼ。

Episode

朝永振一郎と光合成研究

「原子核研究をやめて、食糧増産の研究を」と

敗戦直後、理研生き残りの恩人、ハリー・C・ケリー（GHQ）から、「いまの日本の経済状態で原子核の研究をやるのは、少し早過ぎる。日本人は、いま食うや食わずで生きているのだから、そういうときには、自分ならシャベルを取って一緒に働く」と言われた。現実を直視して、もっと食糧増産につながる研究に力を入れるべきであると痛烈に示唆された。

原子核理論の研究者であった朝永振一郎らは、そのころ開催された「物理学・生物学境界領域討論会」（主査伏見康治）などにも参加し、熱心に議論に加わった。また、朝永ら10人の理研研

究者は、斯界の権威・田宮博の光合成の本を手して、「食糧増産に寄与」すべく大まじめで勉強した。ある者は、バクテリアの窒素固定能の研究なども始めた。

そうした中で、仁科芳雄所長は、食糧増産関係の研究として、安定同位元素の重窒素（ ^{15}N ）の分離濃縮の重要性を農林省に訴え、研究の委託を受ける。後に、この研究は中根良平研究員を中心に見事に ^{15}N 濃縮法として確立し、広く実用化され、農業、食糧生産技術の発展に大きな貢献を果たし、また長く理研の収入源にもなった。

限界」は、地質時代を通して地中に蓄えられた化石エネルギーを略奪的に使用して大量消費型の文明を築き、高度成長のバラ色の夢にうつつをぬかしていた20世紀の人類に対して強烈な警鐘を鳴らした。これに引き続いて世界を襲ったエネルギーショック（石油ショック）は、世界先進諸国に「燃料資源の局地性と有限性」を痛感させることとなった。これを契機に、1974年ごろから、自然エネルギー、とりわけ太陽エネルギーの有効利用に関する研究が世界各国で国家政策として取り上げられるようになった。

このような状況の下、わが国においても1974年度に通産省がサンシャイン計画の一部として太陽エネルギーによる発電と冷暖房を

重点項目として取り上げた。

提案前後の理研の状況と異例の提案書づくり

当時、理研では、生物科学特定研究（いわゆるBS研究）として「生体高分子及び顆粒の理化学的研究」、「生態系における細胞と個体の理化学的研究」、「生体生理活性物質の生物有機化学的研究」の3課題が1969年（昭和44年）から順次開始されており、第1陣の「顆粒研究」が第2期の終了を迎えようとしていた。この研究は元来、植物生理学の基礎テーマの1つである光合成エネルギー変換のメカニズムを、物理学・化学・生化学を横断する理研的な研究手法を駆使して解明するという意図で開始されたものであった。しかし、光



メルビン・カルビン教授が講演



カルビン教授夫妻を囲んで（左から、宮崎友喜雄副理事長、柴田和雄主任研究員、福井伸二理事長）

合成反応中心が太陽光エネルギーを効率よく化学エネルギーに変換する「エネルギー変換素子」的な機能を有することが明らかになるにつれて、この研究の第3期をエネルギー問題に関連させ、BS研究とは独立の特定研究として拡大して実施する考えが浮上した。1976年（昭和51年）度の認可予算でそのための「研究計画化調査費」が認められた。

そこで主任研究員会議は、「顆粒」研究を担当する主任研究員を中心に「理研太陽エネルギー変換研究調査委員会」（委員長：柴田和雄植物薬理研主任研究員、委員：池上明生物物理研、今村昌放射線化学研、宇野木早苗

海洋物理研、長倉三郎理論有機化学研、山田瑛高分子化学研、山崎博史有機金属化学研の各主任研究員）を組織し、国内外における太陽エネルギー変換研究の状況を実態調査して、「太陽エネルギーの生物・化学的変換に関する研究計画化調査報告」を取りまとめた。

この報告書には、世界各国政府のエネルギー関連研究に関する施策と研究実施体制の調査記録や、調査委が主催した合計7回のシンポジウム記録のほかに、サー・G・ポーター（ノーベル化学賞受賞、英国王立研究所所長）、W・クレンペラー（ハーバード大学教授）、R・B・キング（ジョージア大学教授）、N・N・リヒティン（ボストン大学教授）、P・ハルダー（オスロ大学教授）ら海外の有力研究者に依頼した講演の記録が含まれており、この研究を国際的に展開する意図が見られる。その後、この報告書は「太陽エネルギーの生物・化学的利用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ」の3巻として学会出版センターから刊行された。

1978年（昭和53年）4月19日昼過ぎ、科学技術庁振興局管理課から企画部企画課長関理夫に電話が入った。「来る5月初めに、福田赳夫総理がジミー・カーター米大統領と会談のために渡米する。日米間の慢性的な貿易摩擦の解消と外貨（ドル）減らしを求められている状況下、日米共通関心分野における研究協力テーマを日本側から提案するので、今夕までに提出されたい」と。企画部は、1979年度概算要求に向けてすでに主任研究員会議によるヒアリングを終えていた研究計画の中から、特に多額の予算を要する①リングサイクロトロン建設、②数式処理コンピューター

の開発、③太陽光エネルギー研究の3課題を候補として科学技術庁に伝えた。

翌20日、科学技術庁から「振興局としては③太陽光エネルギー科学研究を取り上げ、『光合成研究』というタイトルで進めることに決定したので、早急に相談したい」との連絡があった。太陽光エネルギー科学研究は、研究計画化調査を終えた夢に富むテーマであった。科学技術庁は、理研が米国と対等に協力研究を行い得るものかどうかについて検討するために、JICSTに理研の光合成研究関連論文の調査を依頼、その結果、質量ともに優れているとして太鼓判を押した。

この計画の実現のために、科学技術庁内での調整を慎重に進めてきた佐々木白眉管理課長は、会談に向けて対米事前折衝が必要と考えた。佐々木の要請に応じて、理研は当時、国際光生物学会会長であった柴田主任研究員を米国に派遣、かつてバークレー留学時代のホストであった大統領科学顧問のメルビン・カルビン（ノーベル化学賞受賞、UCバークレー校教授）、アンドリュー・A・ベンソン（同教授）、A・サンピエトロ（インディアナ大学教授）、L・ボゴラード（ハーバード大学教授）ら米国の有力光合成学者に働きかけを行った。

他方、企画部は直ちに、4月末までの約10日間で具体的な日米協力研究計画の検討作成を太陽エネルギー調査委に要請した。しかし、この時間的な制約の中で企画部の半ば強引なやり方に抵抗を感じていた調査委は、時間的に無理との理由でこれを拒否し、事態は紛糾した。

しかしながら、厳しい予算状況の下で、多額の資金を要する「太陽光エネルギー科学研究」の予算獲得のためには“渡りに船”と考えた企画部は、調査委の意向を無視して関連研究室の研究員数名を募って対米提案書作成用の資料収集を進め、集めた膨大な米国側資料をもとに調査委に再度検討を要請した。こうした状況を察知した吉田清太主任研究員会議議長は、柴田調査委委員長らと企画部を緊急招集して事情調査を行った。その結果、吉田議長の発案で提案書の作成を若手研究員に続行させることを決定、その日のうちに、植物薬理研の井上頼直研究員をはじめとする5



理研とイリノイ大学の研究協力協定の協議（同大学のコンタクトパースンのアンツェン教授と柴田主任研究員）



イリノイ大学のアルガトロン内で（左から2人目が柴田主任研究員、その右がアンツェン教授）

名の研究員が指名された。吉田の特命を受けた5名は、企画部とともに約1週間の連続徹夜作業によって、日米光合成協力研究計画「太陽光エネルギー変換—光合成計画」（案）（64ページ）とその英訳版、関連ポンチ絵を作り上げた。

1978年（昭和53年）と言えば、ワープロやパソコンが普及する以前のこと。研究計画書の作成は、粘着リボン式イレーザーの付いたIBMタイプライター数台とゼロックス複写機を事務棟2階の第2会議室に持ち込んでの大奮闘であった。特命を受けた5名は、全員30歳代で、井上のほか、**小川晃男**（植物薬理研）、**金子正夫**（高分子化学研）、**安福克敏**（有機金属化学研）、**木下一彦**（生物物理研）の研究員らであった。

吉田が採った手法は、少なくとも機動性の点で極めて革新的であったが、その後の研究グループの運営、とりわけ主任研究員会議との関係では、少なからず問題を残すことになったのも事実である。

理研側で実施可能な研究テーマについては、すでに調査委によって概略の構想が出来上がっていたが、米国側の事情に応じて手直しするのは容易ではなかった。結局、柴田—カルビンの「電話」による調整（電子メールの普及はずっと後）や幾つかの妥協を経て、米国側の協力実施機関として、スクリップス海洋研とUCSD、イリノイ州立大、UCバークレー、アルゴンヌ国立研、ノートルダム大、ボストン大、その他ハーバード大、マイアミ大、インディアナ大などの個人研究者を選抜した。



低温蛍光スペクトル測定装置

理研側実施テーマとしては、光合成科学研究、光合成生産研究、膜系光物性研究、有機・金属光化学研究の4課題を中心とする研究協力計画がまとまった。

福田・カーター会談

福田総理大臣とカーター米大統領の会談が1978年5月2日、ワシントンで開催され、理研が作成した日米協力研究計画書は首尾よく米国側に届いた。引き続き5月4日にはニューヨークで昼食会が開催され、福田総理が日米首脳会談の報告を行った。この演説で福田総理は、諸懸案事項の解決とともに「新たな代替エネルギーの開発」の一環として太陽エネルギー、核融合、石炭液化等に関する開発研究推進の必要性について言及した。以下の引用は、日米光合成協力に関する部分の抜粋である。

『太陽エネルギーの利用は、化石燃料など全てのエネルギーの源である太陽の熱と光をより効率的に捉え、利用しようとするものがあります。（中略）。太陽エネルギーの利用には現在知られているよりも、はるかに大きな



温度可変藻類の培養装置

可能性が存在しているのです。その一例として自然界において植物が光のエネルギーを吸収して必要な養分を作り出す光合成の機能を応用することが考えられております。このような分野における共同研究の努力を行うことが考えられてもよいのではないのでしょうか』

このような経緯により、日米光合成研究協力は現実のものとなった。これは、わが国の内閣総理大臣が公式の場で「植物の光合成」について語った最初の例である。

研究体制づくり

このようにして、日米光合成研究協力事業はめでたく両国首脳間で合意し、翌1979年5月には協定書が締結されたが、ここに至るまでの1年間に詰めなければならなかった各方面との折衝と調整は、苦勞の連続であった。

最初の問題は日本側窓口の問題である。当時、科学技術庁と文部省は科学技術振興調整費制度等を巡ってことごとく対立関係にあり、「わが国が実施するすべての学術国際協力事業の窓口は文部省国際学術局」とする文

部省と、「本事業は科学技術庁の委嘱に基づいて理研が立案したもの」とする科学技術庁は互いに一步も譲らず、省庁間対立は研究者間にも持ち込まれるところとなった。理研が作成した日米研究協力計画は、理研の研究者だけでなく、大学に在籍する研究者の研究分野を十分に考慮した全日本バージョンといえるもので、少なくとも生物学分野の研究者らは理研計画に参画することで一応の合意に達していた。しかし、「理研計画に参加する研究者には、文部省は科研費を出さない」との噂が飛び、理研計画からの離脱を申し出る大学研究者が続出し、大混乱となる一幕もあった。

対米国折衝も容易ではなかった。最初の難問は日米間のequity account（対等の原則）問題であった。当時のわが国の研究費制度は米国と異なり、研究費と人件費を厳密に分離していたので、双方の研究投資総額の相互換算が容易でなかっただけでなく、日本側の国内研究費の負担は科学技術庁か文部省か、米国側国内研究費の負担はNSF（全米科学財団）かDOE（米エネルギー省）か、派遣研究者経費の負担は派遣側か受け入れ側か等々、難問山積であった。理研と科学技術庁は、日本側の理研、分子研に相当する拠点研究機関を米国側も指名するようNSFに執拗に要請したが、「NSFはすべての大学、すべての研究者と等距離でなければならない」という原則論でうまく撃退された。

このような状況の中、当時の企画部関係者（船田孝司現総務部次長、当時科学技術庁に出向中であつた木田光春現横浜研推進部長

ら)は、科学技術庁とよく連携して対米国折衝、対文部省折衝の現場を担当し、山積する問題1つひとつを決着させた。

日本側の窓口一本化問題の解決策として、科学技術庁—DOE、文部省—NSFの2本の協定を結ぶ案が真剣に考えられた時期もあったようだが、米国側が窓口をNSFに一本化し、DOEには側面から協力させると態度を決めたので、この案は沙汰止みとなり、結局、米国側窓口はNSF、日本側窓口は「科学技術庁—理研」、「文部省—分子研」の2窓口体制とすることで大枠が固まり、これらを一括する「外務省交換公文」の形で「日米エネルギー協定」が締結された。

協力研究テーマは、(a) 生物分野として「光合成基礎過程」、「水素生産」、「炭酸同化の制御」、「バイオマス生産性決定因子」の4テーマ、(b) 化学・物理分野として「人工光合成」、「光電気化学」、「光化学」、「光触媒」、「分子によるエネルギー貯蔵」の5テーマ。協力実施方式は「研究者交換」と「情報交換セミナーの開催」で、「研究者交流費用は派



世界の光合成研究者が一同に(和光で、国際シンポジウムを開催。1983年)

遣側が負担」。これら取り決め事項を原則に、毎年開催する日米計画協議会(Steering Committee)が合議によって運営するという枠組みが決定した。懸案のequity accountについては結局うやむやで、「はなはだしく解さず」が原則となった。

日米計画協議会での対応

こうして決定された日米協力の諸ルールは多数の大学・研究機関に所属する多数の研究者に対し、公平な対応が義務づけられているNSFや文部省を念頭に設計されたもので、関連研究者をわずか十数名しか持たない理研には元々そぐわない点が多く、日米計画協議会では困難な対応を迫られることになった。

例えば、理研は日米交流事業の開始を記念して1983年(昭和58年)に「Photosynthetic Water Oxidation and Photosystem II Photochemistry」と題する比較的大がかりな国際シンポジウムを和光で開催し、そのProceedingsとして「The Oxygen Evolving System of Photosynthesis」(Academic Press Japan)を出版した。しかし、参加者が日米研究者だけでなく、英国、仏国、独国、オランダ、スウェーデン、イスラエルの研究者を含んでいたために、文部省側からの強硬な反対に遭い、このシンポジウムは日米協力事業の正式記録として採用されなかった。

研究者交流費派遣側負担の原則や情報交換セミナーのルールも理研にとって困りものであった。所帯の小

さい理研太陽光エネルギー科学研究グループは、なけなしの研究者を長期間、米国に派遣するわけにいかず、情報交換セミナーの企画も少人数では不可能であった。そこで、「正式記録」や「情報交換セミナー」は専ら文部省に任せることにして、理研は米国の有望な若手を積極的に輸入し、理研の研究に直接参加させる方法に切り替えた。会計処理上は問題があったはずだが、理研企画部と科学技術庁は柔軟に対処した。

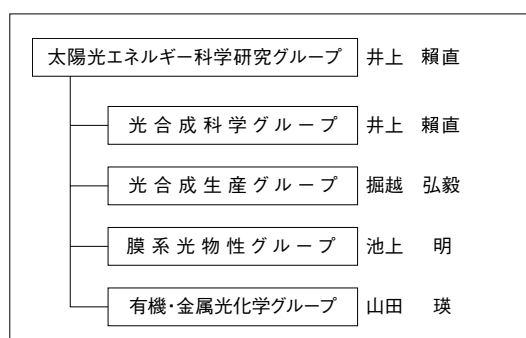
余談になるが、正式記録に載せる、載せないの論争は、日米計画協議会の席で毎年繰り返された。文部省代表の分子科学研究所の吉原経太郎教授（元理研理論有機化学研究室研究員）と英語で言い争うのは苦勞であったが、毎度仲裁に入ったNSFの担当官C・ウォレスにとっては苦勞を通り越して苦痛だったに違いない。少なくとも協議会の席では、NSFは文部省よりもフレキシブルに見えたが、「NSFは、more than two ministriesだと評した米国研究者もいた」と井上は述懐する。

この問題はその後、ヴェルサイユ・サミット先進国間研究協力の発足を契機に次第に緩和していく。1983年のヴェルサイユ・サミット首脳会談で、欧州諸国との科学技術研究協力を提案する話が持ち上がり、日米光合成研究と同じ内容で応募し、認可された。予算増はなく、従来の国際交流費の中身に1項目が追加されただけであったが、この協定は派遣費と招聘費の区別が曖昧だったので、外国人研究者の招聘が半ば合法化される結果となり、日米の正式記録さえ気にしなければ不自由を感じなくて済んだ。理研太陽光エネルギー

科学研究グループはこの協定を使って欧州諸国と活発な研究者交流を開始したが、米国側はどう思ったであろうか。

理研内の推進体制づくり

協定締結直後の1980年（昭和55年）に、日米光合成研究協力を推進するための研究組織として、「太陽光エネルギー科学研究グループ」が新設された。グループは「光合成科学研究」、「光合成生産研究」、「膜系光物性研究」、「有機・金属光化学研究」の4サブグループで構成。生物学、化学、物理学をそれぞれバックグラウンドとする研究者を一堂に集めて



学際的研究領域の開拓を狙うものである。この研究の前身である特定研究「顆粒の構造と機能」のアイデアの踏襲で、元々は総合研究所である理研の伝統的手法でもある。太陽グループの設立に際してグループヘッドのポストが認可されなかったため、改廃時期を迎えていた植物薬理研究室（当時、農薬研究部門）の主任ポストをこれに充てた。この経緯もあって、初代のグループヘッドには井上を指名した。

サブグループ中の「光合成科学」と「光合

成生産」は生物部門で、旧植物薬理研メンバーが基幹研究者集団（わずか数名）を作り、これに生物物理研、微生物生態学研、海洋物理研が協力研究室として参加した。一方、化学・物理部門の「膜系光物性」と「有機・金属光化学」については、当初幾つかの研究室に分散して設置した。1984年（昭和59年）、放射線化学研に吉良爽主任研究員が就任した後初めて基幹研究者が集結し、これに高分子化学研、有機金属化学研、理論有機化学研、生体高分子物理研、触媒化学研、無機化学研が協力研究室として参加する形態が完成した。

太陽光エネルギー科学研究グループの設置

に際しても、幾つか問題があった。その1つは専任／兼任問題であった。グループの予算である「太陽光エネルギー特定研究費」は、年間数千万円の経常研究費、年間1,500万円程度の日米交流費、初年度設備費約1億円のほかに、10名程度の流動研究員枠が含まれており、当時の化学系、生物系研究予算としては



国際シンポジウムで歓談する研究者
(中央がピエール・ジョリオ、右端が井上主任研究員)

Episode

「人工光合成システム」は、いつ？

人工放射性同位元素の父が語った新エネルギーへの夢

仏国の代表的な光合成科学者、ピエール・ジョリオ・キュリーは、太陽光エネルギー科学研究グループとの研究協力のために、いく度か和光を訪れた。ピエールは、自ら開発した「高速応答型のポーラログラフ電極」を用いて、閃光一発ごとに起こる光合成反応を測定し、独創的な研究を行ったことで知られる。

1969年、「閃光4発照射ごとに、分子状酸素の発生が起こる」という画期的な観測に成功した。ピエール・ジョリオの父、フレデリック・ジョリオ・キュリー（1935年ノーベル化学賞）は、マリー・キュリー夫人（1903年ノーベル物理学賞、1911年化学賞）の娘婿である。

ところで、父フレデリックの原子力委員長時代の演説に有名な一節がある。「私は、原子力平和利用の未来を信じる。しかし、人類が真に尽きることのないエネルギー源を手に入れるのは、植物の光合成と同様の人工システムを開発したときであろう」と。

息子のピエール・ジョリオが、光合成研究を志した陰には、こうした父親の信念と励ましがあったという。フレデリック・ジョリオは、人工放射性同位元素研究の父であったが、同時に、光合成太陽エネルギー研究の先覚者でもあったのである。

規模が大きかった。ちなみに、当時の理研全体の国際交流予算は年間500万円以下であった。

また、当時は研究費の人件費化が厳重に禁止されていたので、人件費付きの流動研究員枠は大変に貴重であった。予算が異例の規模と内容だったこともあり、グループ組織は専任の研究者で構成するよう科学技術庁から求められた。

しかし、理研では先行する「レーザー科学研究グループ」に準じて、各研究室所属の研究者が「原籍研究室」を保存したまま兼任の形で集合してプロジェクト研究班を構成していたので、この要請に応えることは容易でなかった。研究課題名が「目的指向型研究」的に見えたことも一因だが、「水素生産に失敗すると首が飛ぶ」等々、政府の締め付け強化に対する懸念が針小棒大に語られ、原籍を放棄して参画しようという研究者は容易には集まらなかった。

結局、研究室改廃で原籍が曖昧だった旧植物薬理研究室の研究員数名だけが覚悟を決めてグループ専任となり、その結果、グループ専任研究者は「水素が出なくとも良い論文を出す」という背水の決意を否応なくさせられるハメになった。

2つ目は研究スペースの確保と1億円の使い道である。多数の流動研究員と米国研究者を受け入れるためには相応の研究スペースが必要で、研究施設を新設すべし、研究機器を整備すべし、汎用性の機器は化学用、生物研究にも新鋭機器が必要等々、議論百出したが、特殊実験棟（現在の第2事務棟）の改築で一



光合成細菌による水素発生実験

挙に問題が解決した。

当時、特殊実験棟には同位体研究用と海洋研究用の大型実験装置が格納されており、これらの研究がすでに一定の成果を上げて終息期に入っていた。

この建物は外見上2階建てだが、同位体分離用の蒸留塔を入れるために吹き抜けになっていたので、1億円の一部を投入して2階を増設、「水生生物実験施設」（通称アルガトロン）と命名して、それなりの居住スペースと大きな実験スペースを同時に確保した。2階フロアの増設は比較的安価で、小さな空調暗室を合計9個も設置したにもかかわらず、He（ヘリウム）低温EPR（電子スピン共鳴吸収測定装置）をはじめ、新鋭研究機器もそれなりに揃えることができた。

第2節 世界に示した先導的研究

原著論文908編の成果

科学技術庁一理研の「太陽光エネルギー科学研究」は、プロジェクト研究である。しかし、日米研究協力のサブテーマには「水素生産」と並んで、「光合成基礎過程」が入っており、前者は明らかにプロジェクト研究だが、後者は基礎研究的で各個研究的である。この乖離はなぜ生じたのか、あるいは仕込まれたのか。原作者に聞かねば本当のことはわからないが、文部省と米国にも『勸進帳』が存在したのではないかと井上はみている。つまり、生物的な水素生産が決して容易でないことを知る人物（恐らく米国研究者）が日米協力プログラム作成の中心にいて、日米協力は当面、基礎研究でいかざるを得ないと喝破していたのではないだろうか。

理研でも、当初は真剣に水素発生実験を手がけた。光合成細菌をL-リンゴ酸を含む嫌気性（アルゴン置換が必要）培地で培養すると、2日目ごろからコップに注いだ冷たいビールのように細かい気泡が発生し始め、約1週間持続する。気泡はほとんど純粋な水素ガスで、全培養期間を通して回収すれば2リットルの培地から5~10リットル（大気圧下）は回収できそうだった。しかし、L-リンゴ酸は高価でアルゴン置換は手間がかかる。どう見ても理研での継続は無理で、結局、水素からは撤退し、「光合成基礎過程」研究で勝負することを早々と決心する。その結果、実施した研究内容は、以下のようなものとなった。



単色光藻類培養装置

生物部門では、植物の光合成系が生物の進化によって創出された理想的なエネルギー変換系との認識を出発点として、①光合成水分分解反応に特徴的な4電子過程の機構を解明して人工光合成系構築における最重要問題である「水分分解触媒」の分子設計に指針を提供するための研究と、②藻類に特有な光依存性CO₂細胞内濃縮機構を解明し、これを支配する遺伝子を高等植物に移入して植物の有機物生産性の向上を図るための研究—の2課題を主要テーマとして研究を進める。

一方、化学・物理部門では、水分子（H₂O）が酸化剤、還元剤のいずれにも利用可能である点に注目し、これを原料としてCO₂の還元を行う人工光レドックス系の構築を目標に、その3大要素、すなわち①水の酸化触媒、②プロトンの還元触媒、③光触媒の光化学反応の3課題を主要テーマとして研究を進める。

いずれの研究も日米研究協力、ヴェルサイユ・サミット研究協力の下に推進し、得られた研究成果はすべて学術論文として国内外の

科学雑誌に出版する。また、これら論文等の研究成果は、すべて隔年発行の研究成果報告書「Collected Papers of Solar Energy Research Group」に複写収録して約300部を印刷し、そのうちの約半分を国内外の関連研究機関、図書館に配布して、理研太陽光エネルギー科学研究グループの存在と活動に関する国際的認識を大いに喚起した。結果的に研究成果報告書は、全10巻(総ページ数7,721)に原著論文908編を収録する大冊となった。



研究成果報告の第1巻

①生物部門の研究

生物部門の研究は、植物の光合成エネルギー変換機構の基礎的研究である。植物は太陽の光エネルギーを利用して光合成反応を行い、水を分解して酸素ガスを発生すると同時に、大気中のCO₂を還元固定して有機物を生産する。光合成は地球生態圏における物質大循環を駆動する地上最大の化学反応であり、地球上のほとんどすべての生物にとって生命エネルギーの根元である。光合成反応では、4個の光子のエネルギーで2分子の水を段階的に酸化して1個の酸素分子を発生する、独特の4電子反応が稼働している。また、ある種の藻類細胞では、光エネルギーを利用してCO₂を細胞内に濃縮し、炭酸固定酵素の機能を増強して有機物生産性を高める機構が稼働している。生物部門の研究はこれら2つの現

象に集中して進めた。

〈葉緑体熱発光法利用研究〉 水分解4電子反応の研究には、理研が独自に開発した葉緑体熱発光測定法を用いた。閃光照射した葉緑体を速やかに液体窒素で冷却し、その後、徐々に加熱すると特定の温度領域で葉緑体が発光する。葉緑体熱発光と呼ばれ、1965年に米国の物理学者が発見した現象である。本研究は、この発光が光化学系IIによって生成された正負電荷対の部分的再結合に由来すること、さらに、これに関与する正電荷は水分解触媒である4核マンガククラスターに蓄積される酸化中間体であることを明らかにし、これを利用して光合成酸素発生機構の研究を広く展開した。

本研究で葉緑体熱発光の理論的背景が明らかになった結果、熱発光測定は光合成研究の新しい標準的測定法として欧米各地の主要研究室に定着して頻繁に利用されるようになり、同時に理研太陽光エネルギー科学研究グループの研究を特徴づける大きな要因になった。ちなみに、国際研究協力事業の一環として本研究に参画した外国人研究者の多くは、この技術の習得を目的として来日しており、欧米におけるこの技術の急速な普及の原因となった。この研究を源流とする関連研究成果には、熱発光強度の4周期振動とその機構解明、熱発光グローカーブのシミュレーション解析による電荷対トラッピング解析、X線吸収端構造(XANES)測定によるマンガククラスター4電子酸化観測、フーリエ変換赤外(FTIR)差スペクトル法によるマンガククラ

スター配位構造研究、表在性タンパク質による酸素発生中心構造の制御、酸素発生補助因子としての Ca^{2+} 、 Cl^- イオンの機能研究等がある。

〈細胞内 CO_2 濃縮機構研究〉 ある種の藍色細菌は低 CO_2 環境（例えば大気中）に曝されると、光化学系 I が吸収する光のエネルギーを用いて細胞内に CO_2 を輸送・濃縮する機構が適応的に発現し、 CO_2 に対する親和性が低い藻類型の炭酸固定酵素の欠陥を補う。これは、地質時代に起こった大気中 CO_2 濃度の希薄化に対処して獲得された適応機能である。藍色細菌が CO_2 濃縮機構を発現すると、細胞膜内に42kDa（キロダルトン）の機能未知タンパク質が大量に蓄積することを発見したが、これは硝酸イオン（ NO_3^- ）の細胞内への取り込みに関与するタンパク質であった。

一方、化学変異剤処理を用いて CO_2 濃縮機能を喪失した変異株を分離し、これを相補する遺伝子 ictA を単離したところ、NADH（ニコチン・アデニンジヌクレオチド還元型）脱水素酵素のサブユニット II をコードする ndhL と同一であることが判明した。この変異株の光合成電子伝達特性の解析から、NADH脱水素酵素が光化学系 I を巡る環状電子伝達系の電子担体成分であるとの重要な発見につながった。本研究にも多数の外国人研究者が参画したが、この研究の後半部分は、担当研究者が大学に転出したために、一部理研外で実施され完成した。本研究の関連成果としては、気孔開孔にはクロロフィル励起によるATP（アデノシン 3 リン酸）生産と、リボフラビ



理研グループが自作した藻類ガス代謝測定装置



定電位・定電流電解装置

ン励起による信号刺激の両方が必要である事実を、単色 2 光束式作用スペクトル測定によって証明した研究がある。

②化学・物理部門の研究

化学・物理部門では、光エネルギーの新しい変換法の探索と並行して、その基礎となる物理過程や化学反応の研究を、人工光合成に関する基礎研究として推進した。すでに工業化されていた半導体太陽電池等は対象から除外し、将来それを代替あるいは匹敵する可能性を持つ新しい方法の開発を目標に、高分子

膜を利用した光電池や金属錯体、有機化合物の光化学特性に重点を置いた基礎研究を進めた。また、本研究の第2期には、大気中CO₂濃度上昇による温室効果が社会的に問題になったこともあり、CO₂の電極還元に関する研究を推進した。

〈水の可視光分解研究〉 可視光エネルギーによる水の酸素と水素への完全分解は、太陽光エネルギー変換研究の1つのゴールである。本研究では、ルテニウム・ビピリジル錯体とプルシアンブルーコロイドの混合水溶液を可視光で照射すると、水素ガスと酸素ガスが同時に発生することを発見した。この反応にはルテニウム・ビピリジル錯体とプルシアンブルーの両方の励起が必要で、プルシアンブルーが酸素発生触媒と水素発生触媒の両方

の機能を果たしていた。この系の量子効率₀は0.1%と低い₀が、プルシアンブルーコロイドは原子価混合錯体で、植物の酸素発生触媒である4核マンガン錯体が示す正電荷蓄積と類似の反応機構を想像させる点で興味深い発見であった。

本研究の発展系として、アンミン配位子型のルテニウム錯体に高い活性が見いだされ、特にその3核構造錯体は1分子で水の光分解に必要な4電子酸化能力を有し、RuO₂、PtO₂など既知の貴金属酸化物の活性をはるかに凌ぐものであった。これと並行して電気化学的な水の酸化系に関する研究も進めた。光触媒分子を分散注入したナフィオン膜被覆電極では、触媒分子の分子間距離を制御して2分子反応を抑制すると高い効率₀が得られた。さらに、ナフィオン膜中にクレゾール分子を共存

Memo

■ 光合成研究雑感

日米光合成研究で最初に理研に好意を示したのはイリノイ州立大であった。同大学を中心に、技術交換や試料交換で協力できそうなポストドク級の若手研究者を選び出し、彼らのボスの了解を取り付けて理研に数ヵ月間受け入れた。理研メンバーも積極的に米国に送り込み、先方の研究機関で協力候補を探させた。

光合成研究は、最初は米国だけであったが、1983年のヴェルサイユ・サミット協力協定の後は、独国、仏国、オランダ、英国、ベルギー、ギリシャ、ハンガリー、イスラエル等にも広がり、また、日豪科学技術協力によりオーストラリアと

の協力も活発になった。その際、理研としては、1年目のポストドクを優先して受け入れた。2年目のポストドクは次のポストを探す必要から、短期滞在を好む傾向が強かったからである。

その結果、太陽光エネルギー科学研究グループは研究施設も充実し、常時、3、4名の外国人研究者が滞在する理研随一の「国際研究拠点」となり、セミナーもディスカッションも「broken Englishで」という活気に溢れた状況が生まれた。

ちなみに、1987年から8年間で共同研究を目的としたものだけでも、研究者の派遣34名、受け入れ35名となり、当時としては理研内外で類のない規模であった。

させると活性が著しく上昇し、光合成酸素発生系の正電荷輸送にチロシン残基が関与するとの知見と関連して注目された。

この研究から派生した研究成果としては、分子性プロトン還元触媒の開発、色素増感酸化チタン光還元系の構築、金属ポルフィリン利用CO分子光還元系の構築、CO₂電極還元律速因子の解明などがある。

③超分子系電子移動に関する研究

1994年（平成6年）に田中真紀子衆議院議員が科学技術庁長官に就任し、長官の要請により「未利用エネルギーに関する研究」を実施する必要が生じたので、本課題をそれに見立てることとし、1995年（平成7年）度以降の4年間だけ実施した。本課題は、かねてより化学・物理部門と生物部門が共同で温めて

きたもので、その一部は兵庫県播磨に建設中であった「SPring-8」を利用する構造生物学研究の立ち上げを兼ねる形で推進された。

〈フラーレンを用いた光電荷分離系の構築〉

フェロセン-ポルフィリン-フラーレンの3分子をこの順に連結させたトライアド系の自己組織化膜が高い光電荷変換効率を示すことを見いだした。フェロセン-ポルフィリン間、ポルフィリン-フラーレン間のアルキル鎖長依存性を最適化した材料を金電極上で自己組織化させた膜は、最小個数の分子で最大の光電流を発生した。関連研究成果として、X線結晶構造解析によるNO還元酵素の立体構造の解明、NO還元酵素ヘム鉄原子周辺の電子移動経路解析、FTIR差スペクトル法によるホモダイマー／ヘテロダイマー型光合成反応中心電子移動経路の比較研究等がある。

第3節 人工光合成設計に指針

日米光合成協力研究は、協定締結後10年目の1989年（平成元年）に一度更改、延長され、1999年（平成11年）に円満裡に終了した。前述のように、理研太陽光エネルギー科学研究グループは、この研究を通して理研における国際協力研究の実行例を呈示し、同時に、すでに触れたように多くの量・質の学術論文を生み出し、主要な国際学術誌に発表した。これらは初期に期待された成果「水素生産技術の開発」とは異なる性質のものであったかも知れない。しかし、当初の研究計画においても、「…太陽光で水を分解して水素を得る

人工系の分子設計に指針を与えることを目標に…」とあるとおり、水素生産技術そのものだけがこの研究のゴールだったわけではないが、早期に目標を達成するに至らなかった原因は何であったか。

研究推進上の問題として、特に、化学部門と生物部門の連携や厳しい定員削減下での研究要員確保の困難さ、兼務研究者による研究推進の困難さ等々が挙げられる。基本的には「水素生産」が達成困難な問題であることを認識しながら、この研究がエネルギーショック対策と日米貿易不均衡対策の両方を望む



ベンソン教授と井上



理研史料室を訪れたベンソン教授

「政府の強い風」の下で企画、立案されたことにあると考えられる。

このような事情もあってか、太陽光エネルギー科学研究は、当初、プロジェクト指向の強いテーマとして立案されたにもかかわらず、日米間で実施可能な協力テーマに関して具体的な調整が進行するにつれて、次第に基礎研究色が強まり、最終的には「光合成基礎過程」等、プロジェクト研究とは縁の遠いテーマが協力実施分野としてノミネートされたことは前述した（日米間の勧進帳）とおりである。恐らくこれは、M・カルビン教授、A・ベンソン教授ら光合成研究の中身をよく知る米国の有力研究者が、「光合成研究からは一朝一夕に水素は得られない」と進言した結果であると推察される。

これに呼応して、理研内の研究も基礎研究指向が強まり、1988年以降の第2期においては、国際交流を除き、現在の中央研究所の「基礎科学研究」と大同小異の研究へと変質し、研究組織についても長柄喜一郎副理事長（当時、在米日本大使館参事官）の提案により、それまで「原籍研究室なし」を貫いてき

た生物部門が「光合成科学研究室」として再編された。

研究内容のこのような変質を、研究予算に対する違反と見なす向きもあるだろう。しかし、「光合成科学研究」と「水素生産研究」は互いに深く関連するものの、研究の現場はまったく別のものであり、この研究に現場で従事した理研研究者、並びに日米協力で参画した米国人研究者の経歴と特性を考慮すると、水素生産で勝負することは到底不可能だったと井上は述懐する。結果として、化学部門の研究は吉良の理事就任（1996年）を契機に縮小され、中核研究者は理研内の他の研究室を兼務しつつ研究を続けたが、化学部門の中心テーマ「水の酸化触媒開発」は、外部の客員主管研究員に頼らねばならなかった。

マンガククラスターの構造解明へ

一方、生物部門担当の井上は、「超分子系電子移動研究」を構造生物学と関連させて実施する傍ら、タンパク質のX線構造解析を軸とする新しい光合成科学基礎研究を展開すべく、和光本所の光合成科学研究室の播磨研究

Episode

「八重桜」、出生の秘密

サミット光合成研究協力の名残りの1株

光合成研究の拠点『アルガトロン』（現第2事務棟）は、安普請であったが、独立棟のため住み心地は悪くなかった。本館から離れ、雑務の襲来は少なく研究に専念できた。多種の暗室実験を同時並行でできた。また冷暖房完備で、午後6時半以後も冷暖房は止まることなく、本館研究棟の居住者たちを羨ましがらせた。

しかし、外国人プロフェッサーをも含む常時12~13人の研究者が、2階の小さな「大部屋」に机を並べた。実験計画、データ整理、ディスカッション、論文作成（パソコンは、NEC1台のみ）に、昼間のコーヒーから夜のワインまで。そして国会議員からNSF長官の視察対応まで、すべてをここで行った。今からすれば貧しく劣悪であったが、“broken English”でのコミュニケーションと切磋琢磨は、パチンコ玉を磨く



が如く活発であった。

大部屋からは、企画部が見下ろせた。連日煌々と灯がとる事務棟1F北側を見て、外国人たちは「何をする建物か？」といぶかった。理研のヘッドクォーターだと答えると、夜中まで仕事をするのかと驚嘆しきり!? やがて驚嘆は、賞賛と羨望にかわった。計らずも、理研事務のハードワークを国際的に宣伝することになった。

また大部屋は、「お花見」に絶好のポイントであった。南側窓外に2本の「ソメイヨシノ」があり、その見事な満開にめぐり会えた外国人研究者たちは、己の幸運を祝ったものである。

1985年ごろ、共同研究者のベルリン工科大学のG・レンガー教授が桜の苗を所望し、田口マミ子秘書が膝丈ほどの3株の苗を調達してきた。1株は海を渡ってベルリンへ、1株は井上頼直主任研究員宅へ。そして、残る1株を同棟入り口の東側脇に植えた。

膝丈のマッチ棒は、たちまち活着して成長し数年後に花をつけた。咲いたのは、ソメイヨシノのつもりが『八重桜』!! アルガトロンが「第2事務棟」と名を変えても、毎春、ソメイヨシノに一足遅れ、「主」を偲ぶが如く咲き誇る。「八重桜」出生の秘密である。

所への移転を構想し始める。太陽光エネルギー科学研究グループが果たせなかった「水素生産」に代わる成果として、植物の光合成水分分解触媒である「マンガクラスト」の構

造解明に焦点を当て、秘かに、しかし公然と最後の挑戦に賭けた。

1993年（平成5年）、井上は中国生まれの基礎科学特別研究員、**沈建仁**の「モノ取り」

技術を評価して研究員に採用し、小規模ながらタンパク質結晶化設備を整えて好熱性藍藻の光化学系Ⅱ超分子複合体の結晶化研究を開始する。研究は紆余曲折を経たが、播磨研究所に「分室」が設置された1998年（平成10年）になって、初めてX線回折を示す結晶が得られた。井上は、1999年度末（平成12年3月）で定年を迎え、研究室を離れたが、この研究は沈と神谷信夫（当時、播磨研究所研究技術開発室長）に引き継がれ、2002年に分解能3.7 Å（オングストローム）で3次元構造が解明され、2003年、米国アカデミー協会誌に論文が発表された。これは、好熱性藍藻の光合成水分解機構の光化学系Ⅱのマンガククラスターであるが、高等植物の葉緑体にあるマンガククラスターとほぼ同一の構造と機能を持つものとして極めて重要である。

すでに、研究実施期間を2年経過しており、分解能も十分とは言い難いが、この成果は、将来の人工光合成系において、常温・常圧・中性pHで水を光酸化分解する触媒分子の設計に手掛かりを与える大切な情報を含んでいた。まさに、太陽光エネルギー科学研究グループがその発足以来、主たる目標に掲げ、再編後の光合成科学研究室においても敢えて最後の挑戦として執拗に推し進めてきた研究の締めくくりであった。

こうして理研は、井上の飽くなき挑戦の下に、沈（現岡山大学教授）の結晶作りと神谷（現三木理論構造生物学研究室副主任研究員）のSPring-8を利用したX線結晶構造解析を協力させることによって、「…太陽光で水を分解して水素を得る人工系の分子設計に指針を



アルガトロンの中の好熱性藻類大量培養装置

与えることを目標に…」として進めてきた研究目標をようやく達成したのである。

人材の輩出と将来展望

このような経緯を経て、2004年時点で理研内に残っている光合成関連研究は、フロンティア研究システムのフォトダイナミックス研究センター（仙台）で光合成4電子反応機構の研究を続行している小野高明チームリーダー（元光合成科学研究室副主任研究員）と、中央研究所基礎科学研究「環境分子科学」のサブテーマ「光合成による物質変換」のみである。太陽光エネルギー科学研究グループでは、中核研究者の早期転出により、生物部門からだけでも国公立大学に教授8名を輩出した。その結果、研究の成果が理研内から広く理研外へと発展的に展開したことは特筆すべきである。

21世紀を迎えて地球温暖化の脅威が高まる中、燃料電池自動車が開発され、政府の施策ではあるが水素ステーションが稼働を始めるなど、水素エネルギーは再び社会の注目を浴びている。アルカリ水電解、固体高分子利用

による水電解、原子力高温ガス炉による水の熱分解、地熱やバイオマス利用等々、さまざまな水素生産技術開発研究が注目されているが、再生可能な非核エネルギーによる水素生産技術は、未だ開発されておらず、当面、原油の軽質化や脱硫、あるいは製鉄やソーダ電解等の副生成物に頼らざるを得ないのが現状である。

こうした状況の下で、太陽光エネルギーを利用し、常温・常圧・中性で水を分解する

「光合成系マンガングラスター触媒」の人工化研究が、再び本格的に登場する日が巡ってくるかも知れない。そしてそのとき、世界に先駆けてこの難題に挑んだ理研太陽光エネルギー科学研究グループの成果が何らかの形で貢献し、さらに多くの努力の積み重ねによって、人類の手に真の意味での「新エネルギー創成」の技術を提供する日がくることを期待したい。