

放射線と共に歩んだ 50 年



鷺尾 方一
Washio Masakazu

1. はじめに

長崎の原爆記念日に誕生（1953 年 8 月 9 日）した筆者は、幼少より東京で暮らすも、常に原爆・放射線について考えて勉強していたことを思い出す。現在の筆者のルーツはまさに自身の誕生日に帰結できるように今更ながら思う。

以下、大学時代から現在までの筆者の歩んだ道を簡単に紹介していきたい。

2. 卒論から大学院生（1975 年 10 月～1981 年 3 月）

東大工学部 12 号館の廊下で田川精一助手（現大阪大学産業科学研究所招聘教授）に出会い、以来ほぼ 50 年にわたりご指導をいただいている。この後東海村の田畑米穂先生の研究室において、田川先生の下でパルスラジオリシス研究に没頭し、N-ビニルカルバゾールの放射線カチオン重合のメカニズム解明に挑んだ。

1976 年 4 月に同大学院に進学した。このころ東海村の東大ではピコ秒ライナックが稼働を開始し、実験を手伝うようになった。また、1977 年 4 月から 1979 年 3 月まで、東大の大学院生の立場のまま、高エネルギー物理学研究所（現高エネルギー加速器研究機構）の特研生として加速器ビームの高時間分解測定器の開発研究に従事した（指導教官：田中治郎教授、佐藤勇助教授—お二方とも故人）。この時まで放射線化学反応を中心に研究を進めてきたが、装置開発に直接従事することとなり、大きなカルチャーショックを受けることになった。1979 年 4 月から東海村の東大ライナックに戻り、卒論時代から続けていたビニルカルバゾール系の放射線化学反応の研究に没頭し、放射線誘起反応を詳細に解明することが

でき、それらをまとめて博士論文を仕上げ、1981 年 3 月に工学博士の学位を獲得することができた。

3. 原研研究員から助手（1981 年 4 月～1989 年 1 月）

放射線化学の研究を続けることも視野に、1981 年 4 月から日本原子力研究所東海研究所の環境安全研究部の低レベル放射性廃棄物処理処分研究室に着任した。ここでは、放射性物質の地中移行の研究（Cs の地中移行に関する実験的研究）に没頭した。そんな折、東大より、ライナックの運転管理に人材が必要であるとの強い要請を受けて同年 11 月に東大助手に転進した。ここでの仕事は、全国共同利用の受付窓口として、多くの国内研究者の実験のお手伝いをするというものであったが、同時に自身の研究テーマとして、ポリスチレン系の放射線化学（特にハロゲン溶液中での）反応研究を行った。ここでは、前記の田川精一先生のほか、勝村庸介先生（東大名誉教授）、小林仁先生（KEK 名誉教授）、高木敏行先生（東北大学名誉教授）、上坂充先生（現原子力委員長）等、素晴らしい方々と一緒に業務をこなすことができた。

このような中、田畑先生の定年退職を前に転身を目指し、住友重機械工業にアプライ、中途採用をしていただけることとなった。

4. 住友重機械（1989 年 2 月～1998 年 3 月）

4.1 新事業開発本部時代

住友重機械工業では新事業開発本部に配属され、電子線照射事業に携わった。1990 年の春にはつくばの照射施設専任ということで、茨城県つくば市に引っ越した。ここでの事業は順調に進展し、1991 年

には厚生省（現厚生労働省）から電子線の医療用具滅菌の国内初の認可を得ることができた。また筆者は、米国の電子線加速器製造会社と共に、新規の照射装置開発に携わった。その中で、アメリカ東海岸の RDI 社、西海岸の RPC 社等、アクティビティの高いアメリカの会社と深い付き合いができた。特に RPC 社のプロジェクトでは、新しい電子線の加速器（WIPL）の開発で、かなり長期のカリフォルニア滞在を経験し、東京電力殿の支援を受けながら、最終的に商品化に成功した。

4.2 研究所時代

1991 年の春に平塚研究所に移籍し、電子線を用いたスチレンの重合システム開発や通常の化学反応用のリアクターの開発研究に従事した。また、科学技術振興事業団（現 JST）の支援（委託開発制度）を受けて、ナノ空孔のサイズや数を計測するための、陽電子寿命測定装置の開発（1998 年まで継続）にも携わった。更に、田無研究所において、当時住友重機械工業が開発に成功していた、超電導シンクロトロン、オーロラの研究部隊に合流した。ここでは、放射光の応用研究を実施すると共に、新しい電子加速器であるレーザーフォトカソード RF ガン（以下 RF ガンと記す）の開発に没頭することとなった。この装置は当初、高エネルギー加速器研究機構から開発委託があり、それを受けて、社内で新規の装置開発という位置づけでプロジェクトを開始した。具体的には、このシステムの開発の先駆者であった、米国エネルギー省・ブルックヘブン国立研究所（BNL）の X-J. Wang 先生に協力を依頼し、開発を

進めた。実務的には筆者及び会社のメンバーがニューヨーク州ロングアイランドに出向き装置の開発を行った。

一方、住友重機械工業では 1995 年に始まったフェムト秒テクノロジー（NEDO-FST）に参画し、この新しい電子加速器を使った高輝度・短パルス X 線生成を目指した研究を計画し、前記の超小型の RF ガンシステムの開発に力を入れることができた。

5. 早稲田大学（1998 年 4 月～2024 年 3 月）

1998 年 4 月に早稲田大学理工学部キャンパス（現西早稲田キャンパス）に着任した。その後、1999 年には、文部科学省私立大学ハイテク・リサーチ・センタープロジェクトに応募し、採択をいただいた。プロジェクト名は「高品質ビームの発生とその物性・反応研究への応用」というもので、喜久井町キャンパス（新宿区）において住友重機械工業時代に開発した、RF ガンと高輝度短パルスレーザーを導入した新しい科学研究を実施するというものであった。

以下、時間のオーバーラップが多々あるので、研究プロジェクトごとに紹介を進めていきたい。

- 1) 5.1 喜久井町プロジェクト
- 2) 5.2 シルマンホールプロジェクト
- 3) 5.3 共同原子力専攻立ち上げ

5.1 喜久井町プロジェクト

喜久井町におけるプロジェクト研究の歴史概観は表のとおりである。

表 喜久井町における研究プロジェクトの歴史概観

年	概 要
2000 年 9 月	早稲田大学・喜久井町キャンパスに加速器建屋完成
2001 年～	RF ガン等、装置設置
2002 年 4 月	放射線施設としての認可取得 ビーム実験開始
2003 年 1 月	逆コンプトン散乱 X 線発生に成功
2003 年 10 月	ピコ秒パルスラジオリシスシステム整備
2004 年 4 月	文部科学省によるハイテク・リサーチ・センタープロジェクト第 2 期 承認
2005 年	パルスラジオリシス及び逆コンプトン X 線システム高度化
2006 年	RF ガンの高度化研究開始
2008 年	新型（高加速勾配）RF ガン開発成功、運転スタート
〃	JST プロジェクト（KEK 共同研究）、（逆コンプトン散乱高度化）
2012 年	ECC RF-gun 成功 超短パルス電子線発生 THz 波生成へ
2012～2016 年	上記 JST プロジェクト（第 2 期）
2016 年	NEDO プロジェクト（大出力レーザー開発）
2021 年	JST SICORP スタート

5.1.1 RF ガンとその周辺技術開発

このプロジェクトでは、まず、高品質加速電子を生成するための小型の RF ガンの設置とその性能試験を実施すると共に、RF ガンの電子発生に使用しているレーザーを更に増幅して高輝度レーザー光とし、加速電子ビームと衝突させて生成する逆コンプトン散乱 X 線発生の実験も実施し、ピコ秒の逆コンプトン X 線の実測に成功した。

またフォトカソード RF ガンの改良も実施した。米国 BNL から技術供与いただいたフォトカソード RF ガンの種々の運転上の困難を取り除くため、新型の RF ガンを開発した。具体的には、加速空洞の Q 値¹を高め加速勾配を大きくし、なおかつ放電によるマシニング等を起こさないようにするよう、空洞の設計・加工方法を見直し、大きな成果を得ることができた。具体的には、Q 値を 7900 → 12200 と、1.5 倍に上昇させることに成功しただけでなく、周波数の精密制御に必要な RF チューナーにも大きな工夫を加えた。更に高量子効率フォトカソード開発研究を通じて、1 パルス当たり、数百 pC が限界であった加速電子の電荷量を 4nC 程度まで上昇させることに成功し、多くの加速器実験を容易に実施できることとなった。

5.1.2 パルスラジオリシスシステム開発

早稲田大学のシステムでは、ナノ秒時間領域及びピコ秒時間領域の実験を 1 つのシステム (Photonic Crystal Fiber (PCF) を用いた白色光発生に基づく) で実施できるよう全く新しいシステム開発を行った。この PCF と高輝度のピコ秒領域の短パルスレーザーとその増幅器を用いることでスーパーコンティニウム光という白色光でありながら、レーザーと同等の光学特性を持つ優れた分析光を得られることが実証できたので、これを筆者らの実験に利用できることとなった。これにより、広い時間領域でのパルスラジオリシス実験が実現し、ピコ秒領域の計測では時間分解能 22 ps を達成できた。

1 空洞内の高周波電力が熱等によって失われる割合を示す値で、大きいほど損失が少ない。

5.1.3 高輝度 THz 光発生を目指した新型 RF-gun (ECC-gun) の開発

前記で述べてきた改良型の RF ガンにおいても、加速器出口での電子線のパルス長はどれだけ頑張ってもせいぜい 2 ps (rms) であったので、筆者らが目指した THz 光 (電波と光波の中間領域の電磁波) 発生には応用できないという欠点があった。そこで筆者らは、1 つのガンユニットでフェムト秒領域の加速電子を得ることを目的に新しい加速構造を導入した ECC (Energy Charing Cell) RF ガンを開発した。

これは従来筆者らが利用していた 1.6 Cell RF ガンの最終段に更にエネルギーを適切に変更できるようにした空洞を付加したもので、これにより 1.6 Cell を出た電子に速度変調をかけ、あるドリフト距離の時点で電子が超短パルスとなって THz 光を生成するに足る特性を持つようにしたもので、実際に 400 fs の超短パルスの生成を THz 光分析によって確認することができた。

5.2 シルマンホールプロジェクト

フッ素系高分子の機能化を中心に据えた、微細構造体創製、放射線グラフト重合技術を駆使した、固体高分子型燃料電池 (PEFC) や IPMC (Ionic Polymer Metal Composite) アクチュエータ、温度応答性細胞培養膜等を開発した。早稲田大学・大久保地区にあるシルマンホールに設置した低エネルギー電子線装置、住友重機械工業の超小型シンクロトンオーロラ 2 S からの放射光、放射線医学総合研究所 (現 QST) HIMAC からのイオンビーム、大阪大学ナノテクセンターの FIB (Focused Ion Beam) 等を利用した先端的な開発研究を大島明博先生 (現大阪大学特任教授) の支援を受けて行った。以下これらの開発の実績について紹介していきたい。

5.2.1 固体高分子型燃料電池開発

このプロジェクトは、田畑先生からのお誘いを受けて、NEDO プロジェクトの一環で開発を進めた。具体的には、放射線グラフト重合に適した、種々のフッ素系樹脂を用いて、ナフィオンベースの PEFC の性能を凌駕する、新しい水素を燃料とする PEFC を作製することを目的に開発を進めた。その結果、高いイオン電導率を持つ新規の電解質膜の開発に成功した¹⁾。

また、これ以外にも HIMAC からの重イオンビームを使って、傾斜機能を持つ燃料電池膜を創製したり、微細構造を入れた、膜の寸法安定性を格段に向上させたイオン交換膜等、多彩な機能性イオン交換膜を実現させた²⁾。更には、メタノール燃料電池膜についても開発を行い、実用レベルに近いシステム開発に成功した³⁾。

5.2.2 IPMC アクチュエータ開発

この開発では、PEFC と同様にフッ素系の高分子（主に ETFE (Ethylene-Tetrafluoroethylene)）を使用してイオン交換能を電子線グラフト重合によって導入し、そのフィルムの両面に金属電極を設け、数 V の電圧印加で機械的な動作をするシステムの創製を行い、10 V 程度の印加電圧で十分な動作を確認できる IPMC を開発できた⁴⁾。

5.2.3 温度応答性細胞培養膜開発

この開発では、フッ素系高分子、特に ETFE を基材とし、そこに Poly (N-isopropyl-acrylamide) (PNIPAAm) を機能付加材料として電子線グラフト重合を行い、温度応答性の細胞培養膜を創製した。PNIPAAm は 37℃ の上下で疎水性と親水性を変化させる特殊な機能性材料で、細胞培養に適した温度では疎水性を示すため、良好な細胞培養が実現できる。一方、温度を 37℃ 以下に下げると PNIPAAm は親水性となり、細胞を容易に剥離するようになる。このような膜の創製を実施する中で、特に生体を模擬した 3 次元の細胞培養膜や微細な配向性を持つ細胞培養膜を創出することができた⁵⁻⁸⁾。

5.2.4 フッ素系樹脂の微細加工体創製技術開発

これらの微細加工体創製には、大きく分けて 3 つの手法を用いて開発実験を行った。1 つ目はシンクロトロン光を用いた微細構造体創製、2 つ目は FIB を用いたナノ構造体創製技術、3 つ目は EB (Electron Beam) ナノインプリント技術を駆使した微細構造の創製に係るものである。

5.2.4.1 シンクロトロン光を用いたマイクロメートルオーダーの微細構造体創製

この技術では、フッ素系樹脂 PTFE (Polytetrafluoroethylene, 商品名テフロン) 及び架橋 PTFE を加工対象として、数百 keV ～ 数 keV のエネ

ルギーを持つ放射光を微細構造マスクを通じて直接照射し、照射部を高効率にエッチングするという技術である。このエネルギー領域の放射光は PTFE を構成する F 原子の 1s 軌道電子を選択的に励起するため、高効率に加工が可能であり、工業的応用も視野に入れることができる技術である⁹⁾。

5.2.4.2 FIB を用いたナノ構造体

この開発では、大阪大学のナノテクセンター設置の FIB 装置をお借りして実験を実施した。具体的には、フッ素系樹脂の FIB ダイレクトエッチング技術である。フッ素系樹脂加工では、PTFE の他に ETFE, PFA, FEP (共にフッ素樹脂) 等の加工にも挑戦したが、最終的には最も加工特性のよい PTFE を対象に微細構造体の創製を実施した。その結果、バルクの架橋 PTFE シート (厚さ 390 μm) に対して幅 1 μm の加工が非常にきれいにできる (すなわちアスペクト比 390) ことを実証すると共に、ナノピラー、ナノフィルターの創製にも成功した^{10,11)}。

また、FIB 照射による高分子の分解と架橋をその LET 変化をうまく使うこと (いわゆるポジネガ反転) で、架橋体のナノビーズを創製し、分解した周辺の高分子から離脱させる技術を確認した。これには、電子線レジストとしてよく知られている ZEP (商品名) を対象として加工を行い、ナノビーズとナノカップの創製に成功している¹²⁾。

5.2.4.3 EB ナノインプリント技術開発

電子線を使った重合技術を微細構造体創製に応用するという技術開発を行った。この技術は大きく分けて 2 つの部分からなっている。1 つは、電子線描画装置を使ってシリコンにナノ構造パターンを作製し、そこにテフロン[®]の乳剤を塗布した後乾燥してから高温・酸素不在化で電子線を照射し、インプリントパターンとしてシリコンナノモールドの転写構造を架橋テフロン (RX-PTFE) で作成する技術である。

筆者らはこれを Traf (Thermal and Radiation process for Fabrication of RX-PTFE) プロセスと命名した。更に、この生成パターンをモールドとして、電子線で容易に重合する TMPTA (トリメチロールプロパントリアクリレート) を塗布して薄い保護膜を表面に配置した後、電子線を照射してナノ構造を持つ TMPTA 重合体インプリントパターンの創製にも成功している¹³⁾。

5.3 同原子力専攻の立ち上げ

筆者は2008年初頭頃に、当時の早稲田大学・橋本周司理工学術院長と白井克彦総長に呼び出しを受けて新しい専攻（エネルギー関連）の立ち上げを実働部隊として支えてほしいという依頼を受けた。種々調整した結果、2008年、東京都市大学（旧武蔵工業大学）と共同で大学院専攻を立ち上げることで合意したプロジェクトである。

具体的作業としては、当時の東京大学原子力専攻の岡芳明教授（後に内閣府・原子力委員長）に組織・運営の相談を開始し、岡先生が新専攻設立の折りに教授として赴任いただけるとの内諾を得た。そして2009年6月、新専攻の立ち上げ届出書を文部科学省に提出し、この年の秋には新専攻の立ち上げ承認をいただいた。

2010年4月、新専攻（共同原子力専攻）の運営を開始した。早稲田大学は、当初、岡芳明教授、師岡慎一教授、大木義路教授と筆者が講座を担当し、現在は山路哲史教授、古谷正裕教授が講座を担当している。この頃は原子力に大きな追い風が吹いていたが、2011年3月11日の東日本大震災の影響を受けた。特に学内において原子力はどうなるの、というご心配を多々いただいた。しかし、若い学生たちの原子力の未来に大きな期待を寄せているという強い思いを受け、2012年度以降も非常に優秀な学生を多数獲得することができた。2024年3月には13回生の送り出しを盛大に行った。この13回生を含め、修了生合計392名を輩出できた。

6. おわりに

早稲田大学在籍中の26年間で鷺尾研を卒業・修了した学生数は186名に上り、多くの学生が社会において活躍をされていることを誇りに思っている。また鷺尾研の卒業・修了学生諸君に心からのお礼を申し上げたい。

最後になるが、以下のように、日本アイソトープ協会の理工学部会で委員を務めさせていただいたことで分野の異なる方々と様々な交流が持てたのも研究に役立った。ここに厚くお礼を申し上げておきたい。

2002年6月～2018年3月 理工学部会常任委員、
2006年6月～2008年5月 理工学部会・副部長、
2008年6月～2012年5月 理工学部会・部長、
また、2006年5月～2012年3月、2012年6月～2016年6月にわたって、理事を歴任させていただいた。

これまで、50年間にわたって放射線と共に歩んでこられた幸せな研究生生活をこのRI歴書を執筆しながら実感している。しかし、現在は、当方にとってはまだまだ一区切りに過ぎず、これからも放射線応用技術の社会実装を目指して、なお一層の努力を行うつもりである。これからも皆様のご協力をお願いできればと思っている。

参考文献

- 1) Y. Sato, *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **265**, 213-216 (2007) doi: 10.1016/j.nimb.2007.08.088
- 2) F. Shiraki, *et al.*, *Journal of Photopolymer Science and Technology*, **22**, 3, 335-340 (2009)
- 3) R. Tsuchida, *et al.*, *FUEL CELLS*, **14**, 2, 284-290 (2014)
- 4) A. Terui, *et al.*, *Radiation Physics and Chemistry*, **213**, 111258 (2023) <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111258>
- 5) Y. Yamahara, *et al.*, *Radiation Physics and Chemistry*, **142**, 88-93 (2018) <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.02.045>
- 6) R. Shimura, *et al.*, *RADIOISOTOPES*, **68**, 339-344 (2019) doi: 10.3769/radioisotopes.68.339
- 7) H. Horiuchi, *et al.*, *RADIOISOTOPES*, **69**, 129-134 (2020) doi: 10.3769/radioisotopes.69.129
- 8) R. Shimura, *et al.*, *Radiation Physics and Chemistry*, **171**, 108741 (2020) <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108741>
- 9) T. Kato, *et al.*, *Applied Surface Science*, **186**, 24-28 (2002) pii: S0169-4332(01)00657-2
- 10) N. Miyoshi, *et al.*, *Radiation Physics and Chemistry*, **80**, 230-23 (2011) doi:10.1016/j.radphyschem.2010.07.037
- 11) N. Fukutake, *et al.*, *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**, 065201 (2010) doi: 10.1143/JJAP.49.0652019
- 12) T. G. Oyama, *et al.*, *Nanotechnology*, **23**, 495307 (2012) <http://iopscience.iop.org/0957-4484/23/49/495307>
- 13) Kobayashi, *et al.*, *Nuclear Instruments and Methods B*, **295**, 76-80 (2013) <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2012.11.002>

（早稲田大学 名誉教授）