

# レーザー、光ファイバー、超伝導検出器の研究を終えて



量子計測研究グループ ■ 中 沢 正 治 ■

「量子計測研究グループ」では、原子炉でレーザーを発振させる核励起レーザー、原子炉計測用の耐放射線性光ファイバー、半導体検出器よりも30倍も高エネルギー分解能化をめざす超伝導トンネル接合X線検出器の3つの研究を行った。もとより、研究にはこれで終わりということはありませんが、当グループの研究としては一度終了して、今後は個別に研究が展開されるので、この機会にまとめて報告する。

## 1. 核励起レーザーのヴァーチャルな発振

本研究では、イリノイ大のMiley教授のところ、 $10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ 程度で発振したという博士論文のある ${}^3\text{He} - \text{Ne} - \text{Ar}$ 混合ガスを用いて、 ${}^3\text{He}(n,p)$ 反応 ( $Q = 762 \text{ keV}$ ) を核励起源としたレーザー発振の研究を行った。

この混合ガスは図1のようなエネルギー準位を持つ。 ${}^3\text{He}(n,p)$ 反応と各種の気相イオン反応を考えると、荷電粒子のエネルギーがNeの励起状態である2pにより多く集まって、1sが少ないという逆転配置を作り、585.2 nmのレーザー発振をさせようという訳である。右下のArガスは、1s準位のNeをクエンチさせて1s密度を減らし、2pと1s間で逆転が起こり易くしている。

研究は、 ${}^3\text{He} - \text{Ne} - \text{Ar}$ の混合ガスセルを作って、実際の原子炉（東大の弥生炉，原研のJRR-4）で照射実験を行うことと、次にそれを解析するためのモデルを作成しシミュレーション計算を行うことの2本立てで実施した。

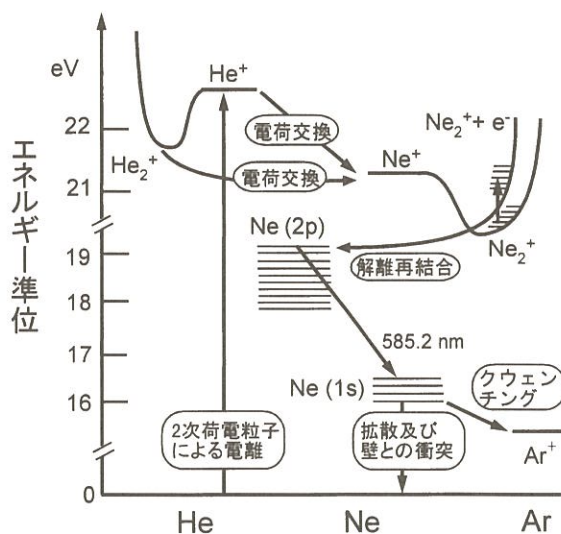


図1 核励起レーザーガス ${}^3\text{He} - \text{Ne} - \text{Ar}$ のエネルギー準位

まず、 ${}^3\text{He} - \text{Ne} - \text{Ar}$ 混合ガスセルを用いた核励起レーザー実験により、本ガス系での核励起レーザーが $10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の中性子レベルで発振しないことを確認した。このため、混合ガスの最適化による発光強度の高効率化と発振しきい値の低減化を目的に、詳細な ${}^3\text{He} - \text{Ne} - \text{Ar}$ の励起過程データを基礎とした核励起モデルを作成した。 $1 \times 10^8$  から  $1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ にわたる照射実験結果と照合することにより、このモデルの妥当性を確認した。本モデルをもとに3ガスの混合比の最適化を試みた結果は、やっと  $3 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の中性子束で発振するはずというものであ

って、初期に予測した $10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>・secでは無理ということがあらためて分かった。本当であれば、JMTRの $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>・secオーダーの中性子場やNSRRの Puls 場で照射実験を行えばレーザーが見えたかも知れないところであるが、<sup>3</sup>He(n,p)t反応で発生するトリチウムのややこしい処理問題や安全性を考えるとガラスセルでは到底無理で、金属性の気密箱を必要とし、そうするとレーザー光の取り出しができないなどで、結局トライできずに、レーザー発振はヴァーチャルなもの（机上計算に）終わってしまった。

そこで、中性子束が $10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>・secも強くなくても発振する方式はないかと考え、ガス比例シンチレーション検出原理との併用を考案し、芯線をこのレーザー管中に張り、電子のガス増幅を利用すると、レーザー発振に必要な中性子束が $10^9$ 分の1も少なくなることを見出した。これで、東大の弥生炉でも発振できそうになり、トリチウムの問題も余り起きずに実験できそうであり、今後は楽しみなところである。しかし、実験の途中では、原子炉で実際にやろうとしたときのトリチウム問題には全くお手挙げの状態、これには本当に参ったという気がしたものである。

## 2. 耐放射線性光ファイバーと分布センシング

上記の核励起レーザー実験には、光の伝送媒体として光ファイバーの利用が不可欠である。そのためには、放射線に強い光ファイバーを開発することが第一の研究目標であった。目標の達成には、以前から水酸基(OH)を光ファイバー内に拡散させると良いことが知られていたが、この方法ではガンマ線で $10^6$  Gyの耐放射線性が限界であった。今回は、これにフッ素(F)を加えること、なおかつ初期構造欠陥の少ない光ファイバーを作ることの2点を工夫することにより、耐放射線性光ファイバーを開発した。

JMTRでの重照射試験により、ガンマ線で $10^9$  Gy、中性子で $10^{20}$  n/cm<sup>2</sup>の照射量に十分耐える性能の光ファイバーが実現し初期の目標を達していることを確認した。また、照射試験データをもとに、光ファイバーのコア内の非架橋酸素正孔センタ及びE'センタの挙動を解析し光ファイバの可視光領域における耐放射線性強化法も見出すことができた。さらに、光ファイバ自身による発光現象とその強度が原子炉出力に比例す

ることを確認したことから、耐放射線性光ファイバー自身による原子炉内の光学的中性子・γ線計測の可能性の道を拓くことができた。

一方、光ファイバーは光通信はもとより、最近では、分布センシングの手段として用いられている。例えば、長さ2 kmにわたる温度分布、ストレス、歪分布などを、光ファイバーにレーザー光を入れて、その散乱線を測ることによって測定する方法があり、既に一部では市販されて利用されている。

この光ファイバーによる分布型の測定を放射線環境下で行うということが本研究のもう一つの大きな目標であった。この目的に最適な耐放射線性光ファイバーが開発できたことから、国内の多くの計測関係専門家の方々と協力し、原子力計測への利用を図った。この結果、常陽の1次冷却系配管表面の温度分布測定(図2参照)や東電の原子力研究所との協力によるBWRシュラウドの応力腐食割れの観察などの成果を得ることができた。更には、原子炉の各部のストレスや歪を計る原子炉健全性モニター、加速器のまわりの放射線分布測定あるいはスポレーション中性子源のターゲット温度分布測定などについて、極めて広い範囲の方々と協力し、その適用性の検討を始めているところである。

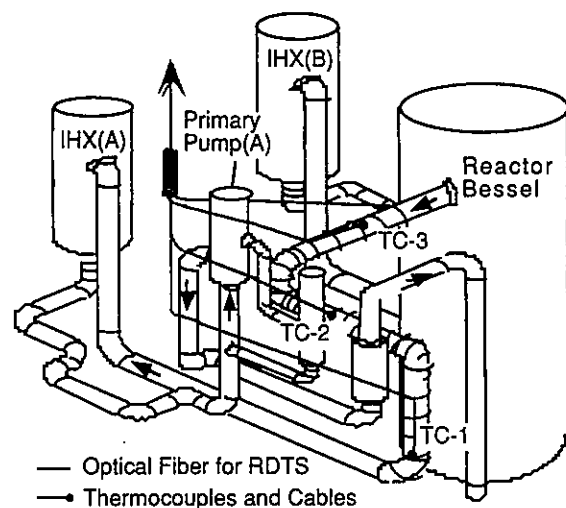


図2 動燃「常陽」一次系ナトリウム冷却系の配管表面に巻き付けた温度分布測定用の光ファイバー

### 3. 超伝導トンネル接合X線検出器の開発

放射線検出器は、進歩していないように見えるが、漸進的な開発がポツリ、ポツリと進んでいるといえる。最近では、イメージングプレートや、マイクロストリップガスカウンターなどが新しい測定器の例として挙げられるが、さらに一方で、もうじき市販品としても市場に登場して利用されそうな検出器に、超伝導トンネル接合X線検出器がある。略してSTJ (Superconducting Tunnel Junction) と呼んでいる。

この検出器のどこが素晴らしいかというと、そのエネルギー分解能が、現在最高性能である半導体検出器の30倍近くも良くなるらしいという点である。

このSTJの開発には、倉門さんの寄与を忘れるわけにはいかない。ガンコー徹という感じで、京都の大学院生時代からとり組み、もう20年程になるが、現在も、新日鉄で続けている方で、この人のSTJ素子を使うと、とても良い性能が出る。このため、当研究グループにおいても倉門さんの素子を用いてSTJ検出器の研究を行った。

研究目標としては2つあった。1つは、実際に実験現場で高エネルギー分解能でX線スペクトル測定に使用可能なSTJ素子を用いた検出器の開発である。もう1つは、STJ素子の放射線に対する信号生成のメカニズムがどのようなものか調べることである。まず、外部からX線を入射可能な<sup>3</sup>He吸着型クライオスタットを設計・製作した。本クライオスタットに新日鉄製Nb/Al-AlO<sub>x</sub>/Al/Nb超伝導トンネル接合を取り付けた外部入射型X線スペクトロメータは、Nb接合素子の<sup>55</sup>Feの5.9keV X線に対するエネルギー分解能としては国際的にもトップデータの66eVを得ることができた。この分解能を得るには、STJの最高の性能を引き出す必要があり、STJ用低雑音プリアンプの開発及び最適化研究、STJの詳細なX線測定試験にもとづく最適動作条件の選択、STJ素子自身の固有雑音に関する研究等の成果が生きている。

一方、<sup>55</sup>Fe線源及び放射光等を用いた実験により得られた4~25keVのX線に対する検出特性をもとに、エネルギー分解能や検出効率の改善に不可欠な素子内でのX線信号生成過程の研究を行った。はじめに、吸

収X線により発生した光電子・オージェ電子のエネルギー付与分布をクーロン多重散乱過程をモデル化し固有ピーク計数率の導出を可能とした。本モデルは素子構造の最適化にも役立つことを確認している。また、準粒子が超伝導トンネル接合内で拡散する過程(準粒子拡散過程)をモデル化することにより、X線スペクトルの応答を求めることを試みた。接合素子の電極中に生成した準粒子の拡散と素子周辺部での捕獲を考慮し、古典的な粒子拡散モデルにより計算した結果は実験により得たX線スペクトルと良く一致した。

STJ素子を用いたX線スペクトロメータの当面の応用分野としては蛍光X線分析への適用がある。このため、SPring-8の放射光施設に開発したX線スペクトロメータを設置し、強力なX線ビームを用いて蛍光X線分析への適用試験を行った。この結果、検出効率は非常に小さいが高エネルギー分解能を要求する蛍光X線分析に実用できることを確認できた。

超伝導を用いたX線検出器については、最近、トランジションエッジ型と呼ばれる新しいモードでの動作状態で使うことも検討され始め、まだまだ超伝導検出器としては開拓中というところであるが、STJ素子について原研でここまでいったということ、特にこの研究に携わっている若い研究者や院生が、今後も熱意をもって取り組んでいることが、今回の当グループでの研究の最大の成果かも知れないと思っているところである。そのうちの院生の1人は、STJ素子を自分で作りたいと言って電総研に就職してしまった。今後にも更に期待したいところである。

### 4. 終わりに

各テーマ毎の成果は、以上に述べてきた通りであるが、全体的な特徴として、現在の放射線計測研究の状況をよく表わしていると思う。核励起レーザーは、永年の夢であったテーマであり、光ファイバーは、一次元位置分布イメージング測定法として新しい原子炉、核融合炉、加速器に広く適用される程に実用的であり、超伝導トンネル接合検出器はまさしく21世紀を担う測定器として期待が持てる。

これからの放射線計測は、PETにしる、放射光や中性子にしる、すべてイメージングが主流になるかと思う。イメージングと言うと、人間の目のような測定

器は、今迄もそうでしたが、これからもずっと人間の目標であり続けることでしょうし、私自身の理想でもある。あたかもカラー-TVのように、放射線の挙動

を、人間の目で見えるようにすることが放射線計測屋の夢であり、量子の世界を人間にとって日常化するために必須ではないかと考えている次第である。

