

話題

スピン偏極電子ビーム源の開発物語 —リニアコライダーでの実用化を目指して—

中西 彊*

Review on Development of Spin Polarized Electron Source for International Linear Collider at Nagoya University

Tsutomu NAKANISHI*

大学の小研究グループが加速器関連の研究を行ってきた経験について書かせていただいた。大学には単独でプロジェクトを担う体力は無いので、一部の特殊装置の開発を担うことになるのだが、小さいながら独自性を発揮したいという思いは強い。ここでは電子・陽電子リニアコライダーでの使用を目指すスピン偏極電子ビーム源の開発にからんで、先行する SLAC グループに“追いつきそして追い越す”という気持ちを持って研究を進めてきた経緯を中心に紹介したい。開発物語という体裁をとったので、個人的な思いを吐露した記述が多くなっていることをお許し願いたい。

1. スピンへのこだわり

私がもう 20 年以上もスピン偏極電子源の開発にのめりこんでいる遠因は、京大学生時の指導教官、西村圭吾先生の“日本は(貧乏だから)加速器のエネルギーではなく、精密測定で世界と競うべきである”という教えが私の胸に響いたからである。当時の先生は核研の 50 MeV-FM サイクロトロンにおいてスピン偏極させた陽子ビームを用いて核力を細かに調べる実験を主導しておられ“このようなスピン実験では日本にもチャンスがある”と言われた。この考えに共感し、名大の大学院に移ったときも偏極ターゲット開発グループに加えてもらい、日本ではおそらく最初の偏極陽子ビームと偏極陽子ターゲットを組み合わせた実験を 1968 年に体験することができた。名大の偏極ターゲット技術は、その後、梶川良一先生が獲得した特別設備費により「名古屋のお家芸」とみなされるまでに整備され、核研の 1.3 GeV 電子シンクロトロンにおい

て小さな核子共鳴も含めてその光励起機構を調べた一連の実験(1970~1980年)に用いられた。スピンのおかげで名古屋は Daresbury や Bonn と肩を並べるデータを輩出することができたし、個人的にも偏極度測定用 NMR 装置や極低温クライオスタットを設計段階から手作りで製作する苦勞と醍醐味を存分に味わうことができた。

しかしながら一方で私自身は偏極ターゲット実験の将来に強い限界を感じ始めていた。素粒子物理のフロンティアはすでにハドロンからクォーク・レプトンへと移り、加速器自体も衝突型加速器が活躍する時代に突入していたからである。おりしも SLAC においてスピン偏極電子ビームを用いた中性弱相互作用におけるパリティの破れを検出する実験が成功し、電弱相互作用の混合を表す $W-S$ 角の最初の定量的測定として高く評価された。これが“スピン制御をターゲットのみならずビームに対しても適用せねばスピン物理は生き残れない”と私に決意させる契機となった。SLAC の実験ではわずか 10^{-5} の左右非対称度を測定しているが、それを可能にしたのが 1974 年に発明された GaAs 半導体フォトカソードを用いた偏極電子源であることをエール大学で別のタイプの偏極電子源に携わった経験を持つ小早川久氏から教えられ、開発するならこのタイプだと決断した。図 1 にその原理図を示すが、円偏光のヘリシティを使って伝導帯へ励起される電子のヘリシティを選択する偏極機構と負の電子親和性 (NEA: Negative Electron Affinity) 表面を用いて偏極電子を真空へ放出させる機構をうまく組み合わせたもので、当時は素人の私にもこの原理はすっきりし

* 名古屋大学・理学研究科・物理学教室
Department of Physics, Graduate School of Science, Nagoya University
(E-mail: nakanisi@spin.phys.nagoya-u.ac.jp)

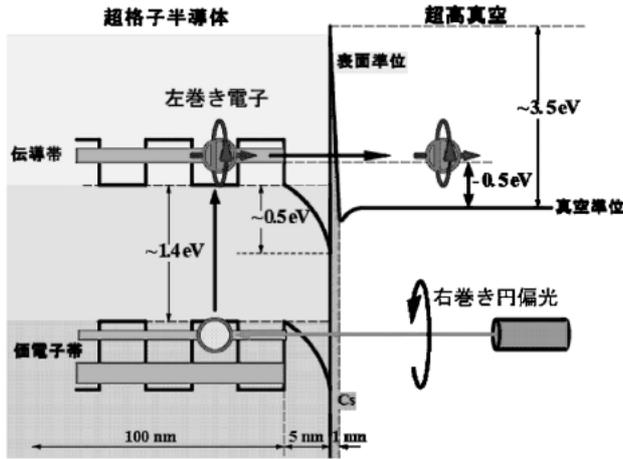


図1 偏極電子ビームの生成

ているとの印象を与えてくれた。なお、この図のフォトカソード結晶は当時使われたバルク GaAs ではなく、我々が開発した超格子結晶に代えてあることをお断りしておく。

こうして偏極電子源の開発を志したものの、一介の助手の身分の私には、知識も装置も予算も全くゼロからの出発であった。それでも電子顕微鏡の専門家であった名大の神谷芳弘氏（故人）、小早川氏、静大の助川徳三氏の諸先輩が力を貸してくれたおかげで、1986年にはエネルギーは4 keVながら量子効率と偏極度を測定できる機能を持つ偏極電子源1号機を完成することができた。この大部分は予算節約のため自分達で設計し学内の金工室で工作したものであったが、わざわざ上智大の鈴木皇先生、学習院大の溝口正氏が見学に来られて激励してくださった。

2. 高いスピン偏極度をめざして（SLAC との競争：第一幕）

この1号機を作った当時は GaAs 型偏極電子源の発明からすでに10年を経っていたが、最大偏極度は当初の40%のままに留まっていた。このことが“50%を超える偏極度を可能にする結晶の開発と実用化”に挑戦する機会を我々に与えてくれた。すでに3つの候補、①カルコパイライト結晶、②歪み GaAs 結晶、③超格子結晶についての研究が進行しており、当時この分野のリーダーであった SLAC の C. Sinclair 氏の影響もあってカルコパイライトが最有力視されていた。私も大阪府大の堀中博道氏にカルコパイライト結晶作成の可能性を打診する一方で、スイスの ETH、ドイツの Juelich と Konstanz の研究室を直接訪ねて開発状況を詳しく問い質した。そこで芳しい情報が得られ

なかったことが、私にカルコパイライトを断念し残りの候補に目を向けさせる契機となった。

歪み GaAs については、SLAC が結晶に外部応力を直接印加するという荒っぽい方法ですでに失敗していた。私と堀中氏はもっとエレガントな方法として“格子不整合を利用すれば安定した歪み GaAs 層が作れる”というアイデアを得て、1988年のミネアポリスの偏極電子源ワークショップで発表し、司会をしていた C. Sinclair 氏の注目を引いた。実際の歪み結晶としては、表面の GaAs 薄膜に垂直方向の引っ張り歪みを与えるため、GaAs 基板上に意図的に GaAs より格子定数の小さな GaAsP バッファ層を積み、その上に GaAs 薄膜を成長させる構造を選択した。この選択が SLAC を出し抜く成果をもたらすことになる。難題だったのはこれを無償で作成してくれる研究者を探すことであったが、2年余り方々で断られた挙句に、やっと半導体の専門家である大同特殊鋼の坂貴、加藤俊宏の両氏が結晶特性評価まで含めて面倒をみてくれることになった。

さらに、超格子についても可能性を追求し、KEK の大森恒彦、栗原良将の両氏が NEC の馬場寿夫氏に作成してもらった GaAs-AlGaAs 超格子結晶を我々の1号機で試験するという形での共同研究が同時期にスタートした。

すでに1990年のボンでの偏極電子源ワークショップで日本と SLAC が偏極度競争を演ずる舞台の幕が開いていたが、翌年は偏極電子源の偏極度がついに50%を大幅に超えた記念すべき年となった。すなわち、SLAC では歪み InGaAs 薄膜により70%、日本でも GaAs-AlGaAs 超格子により70%、さらに、歪み GaAs 薄膜により86%の偏極度が得られたことが相次いで発表された。特に、歪み GaAs 薄膜は、5月の PAC (サンフランシスコ) でポスターとして発表されたとき、参加者に強い衝撃を与えたことが当時イリノイ大で偏極電子源を開発していた L. S. Cardman 氏（現在 J-Lab）から私に伝えられた。この歪み GaAs 薄膜による偏極度と量子効率のレーザー波長依存性を示すデータを図2に示しておく¹⁾。減偏極効果抑制のため薄膜厚さは100 nmに制限したにもかかわらず、最大偏極度を与えるレーザー波長での量子効率は0.04%となり、従来のバルク GaAs 結晶よりも格段に優れたフォトカソードが直ちに実用化できることが関係者の強い関心を惹いたものと思われる。

当時は W-S 角の超精密測定を目標に SLC 実験が始まったばかりであり、私はこの歪み GaAs フォトカソードを SLAC に提供することを申し出たのだが、

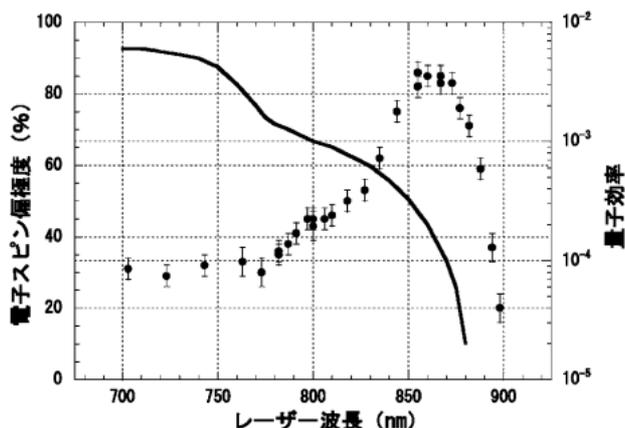


図2 歪み GaAs 薄膜によって得られた偏極度と量子効率

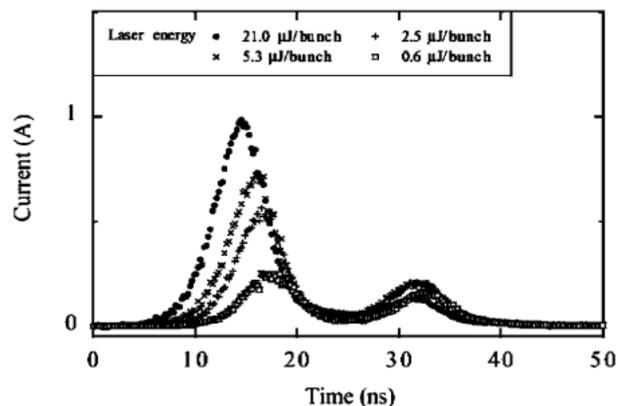


図3a 歪み GaAs 薄膜から生成したダブルバンチビーム

彼らは自前の結晶を作成する道を選んだため実際の使用はさらに2年間遅れることになった。この間のSLCデータは偏極度が2倍になった後半部のデータに対して1/4の重みしかなくなるという犠牲を払ってまでなぜ自前に固執したのかは今でも私には不明である。ともあれ、ルミノシティでは圧倒的に負けるLEPに対しスピン実験の利点を活かして巻き返すSLCの作戦は成功し、最終的なW-S角の決定精度において互角の勝負に持ち込むことができた。歪みGaAsの高い偏極度がこれに大きな貢献をしたことは明らかである。なお、このGaAs薄膜はその後Mainz大、J-Labなど世界各地の電子線加速器において使用されるようになった。

このように、SLACから見れば新参者であった我々が偏極度競争に勝ち残れたことは幸いであり、無名だった私にも1992年のオタワでのLinac国際会議を始めとして、Mainz大のE. Reichert氏、SLACのJ. Clendenin氏、イリノイ大のL. S. Cardman氏などを介して、幾つかの研究機関から講演依頼が来るようになった。国内でも、KEKの木村嘉孝氏、岩田正義氏、高田耕治氏、京大の政池明氏、名大の三田一郎氏など多くの先輩が研究の継続を後押ししてくださった。この声援のおかげで、1995年に物理教室内に研究室を創ることが認められ、さらに研究を発展させる環境ができた。

3. 表面電荷制限現象の研究 (SLAC との競争：第二幕)

第一幕の偏極度競争が一段落した後、我々はリニアコライダーでの偏極電子ビームの実用化に向けた研究を本格的に開始した。ハドロン物理ではなくエネルギーフロンティアでの偏極実験を志向したのは、ヒッ

グス粒子や超対称性粒子の生成と詳細研究における偏極ビームの魅力的な役割のせいである。そこで1993年からSLACには20年遅れで標準的な100 keV偏極電子銃の試作を開始したのだが、幸運にも電子銃で挑戦できる重要な課題が残っていた。それがリニアコライダー用マルチバンチ偏極電子ビームの生成である。具体的には、“ 2×10^{10} 個の電子を詰め込んだ約0.7 ns幅のマイクロバンチを2.8 ns間隔で100バンチ生成せよ”という当時の常伝導LC計画からの要求であり、現在の超伝導LC計画では、バンチ電荷量は同じだが、マイクロバンチ幅とバンチ間隔は2 nsと337 ns、バンチ数は2,820個にと変わっている。

さて一般的に、フォトカソード型電子では電子のバンチ波形はレーザーのバンチ波形がそのまま再現されると想像されるかも知れないが、NEA表面を用いて電子を真空中へ脱出させる場合はそう単純ではないことが、図3aのダブルバンチビーム生成時の電子バンチ波形を見ていただければわかる。均等なダブルバンチレーザーで照射しても生成される電子波形は先頭バンチの後半部が削られ、2番目のバンチにいたっては全体がへたってしまう現象が生ずる。この現象は1990年頃にすでにSLC電子銃でのダブルバンチ生成において観察されていたのだが、有効な克服策を彼らは示せなかった。彼らは120 keV電子銃の空間電荷制限値12 Aの半分しかない6 Aのピーク電流で運転を続けていたのである。

この現象は現在ではつぎのような機構として理解されている。①レーザーバンチの先頭部分で励起された伝導帯電子の全てが真空中へ脱出できずNEA表面のband bending領域に蓄積する。これによって、②bandの曲がり角が減少し真空レベルを上昇させる。そのために、③レーザー光の尻尾部分で励起された後続

の電子の真空脱出が妨げられる。表面の伝導帯電子は最終的には価電子帯の正孔と再結合して消滅するのだが、ピーク電流値が高くなると消滅過程が蓄積過程に競り負けて、結果として最初のバンチの後半部分が欠け落ち、2番目のバンチにいたっては全体がへたってしまうのである。ちなみに、我々の論文ではこの現象を真空中の“空間電荷制限効果”に対応させて“表面電荷制限効果”と名付けたが、現在ではこれが専門用語として定着している。

この問題を解決するヒントは我々が歪み GaAs 薄膜と平行して進めてきた超格子フォトカソードの開発からうまれる事になった。当初の GaAs-AlGaAs 超格子フォトカソードは、歪み GaAs に比べて偏極度、量子効率ともに劣っていたが、まもなく量子効率を飛躍的に向上させる手法を見出した。それが、band bending を作るために混入する p 型不純物を超格子構造に均等にドーピングするのではなく、表面を高密度、内部を中密度と使い分ける“変調ドーピング法”の発見である。この有効性は GaAs-AlGaAs 超格子を SLAC に持ち込んで 1995 年に試験した結果によって証明された²⁾。表面電荷制限効果が消滅し、空間電荷制限のピーク電流 12 A が引き出された。このフォトカソードにおいては、超格子効果による量子効率の向上 ($\geq 1\%$) と高密度ドーピング効果による band bending 領域幅の狭まりがそれぞれ表面電荷の蓄積減少と正孔と蓄積電子の再結合速度の増大をもたらし、この相乗効果が表面電荷制限効果を完全に抑制したのである。

残る課題は 70% 止まりの GaAs-AlGaAs 超格子の偏極度改善にあったが、これは歪み超格子構造の導入によって解決された。すなわち、InGaAs-GaAs, InGaAs-AlGaAs さらに GaAs-GaAsP の 3 種類の歪み超格子薄膜を順次開発してきたが、つい最近になって名大工の竹田美和研究室が作成してくれた GaAs-GaAsP 超格子によって偏極度 90%、量子効率 0.5% を達成することができた³⁾。

これらの歪み超格子フォトカソードのサブナノ秒マルチバンチ・レーザーに対応する応答は渡川和晃氏（現在は理研）によって詳しく調べられ、表面電荷制限効果を完全に抑制できることが実証された。そのデータを図 3b に示すが 2.8 ns 間隔のダブルバンチが均等に生成できたことを示している⁴⁾。高密度マルチバンチ偏極電子ビーム生成に関する懸案を基本的理解も含めて解決した彼の博士論文に対して、第 1 回の高エネルギー物理学奨励賞が授与されたことは研究室としても名誉なことであった。

超伝導 LC 用偏極電子源においてもバンチ間隔はず

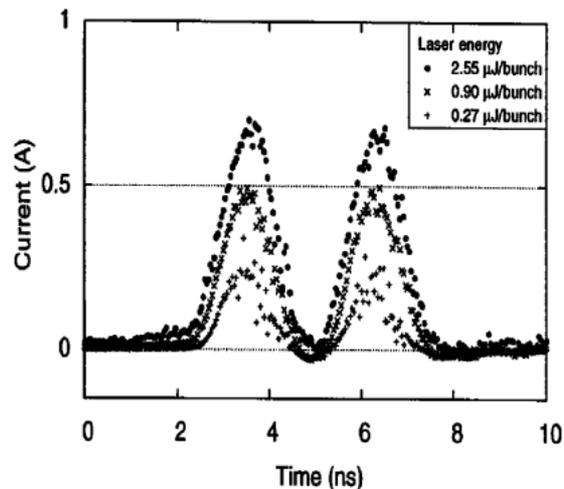


図 3b 歪み超格子によるダブルバンチ生成

っと広がるが、2 ns 幅マイクロバンチの生成が求められる事情に変わりはない、ここで述べた処方では依然として必要不可欠である。なお、この表面電荷制限効果が我々の理解通りに NEA 表面の band bending のへたりによって生ずることを当時岡崎分子研の鎌田雅夫氏のグループが作製した光電子分光装置を用いて ESCA 効果として直接確認できたことも収穫であった。

なお、歪み GaAs 薄膜の場合と異なり、GaAs-GaAsP 歪み超格子フォトカソードの開発には長い間追随者がなく、我々のみが国際会議において実験データに基づきその優秀性を主張してきたが、ごく最近になって SLAC がこれを追認し、現在ではリニアコライダーにおける偏極電子源フォトカソードの最有力候補と認められている。

4. 高電界・直流電子銃の製作 (SLAC との競争：第三幕)

これまでの 2 つの競争では GaAs 系の歪み(超格子)薄膜を世界に先駆けて開発したことが決め手となって SLAC に先んじることができた。別の観点から言うと、電子銃やレーザー系のようなシステム装置の優劣ではなく、半導体フォトカソードのようなデバイスの優劣で勝負が決まるテーマで得点を稼いだのである。これには最先端装置を実用化するための予算を獲るのに時間がかかったという別の事情があるのだが、“リニアコライダー計画における偏極電子ビーム源の実用化”という課題に挑むにはどうしても高性能電子銃の開発が必要となる。なぜなら、偏極電子ビーム源に要求される性能、①偏極度、②量子効率(表面電荷制限

効果の抑制), ③電流強度 (空間電荷制限流), ④ビームエミッタンス, ⑤ NEA 表面の安定維持 (寿命) のうち, ①, ②はフォトカソードで決まるが, 後者の3項目の限界は電子銃で決まるからである. 特に低エミッタンス電子銃には高電界化が不可欠であり, SLAC の 120 keV 電子銃の性能を上回る実用機の開発に挑んでいる現在を我々は競争の第三幕と位置づけている.

高電界化の前に立ちはだかる高い壁が, ⑤の NEA 表面状態の保持という厄介な課題である. NEA 表面は高偏極度, 高量子効率, 低い初期エミッタンスの実現に“女神”の役割を果たすのだが, 具体的には微量の Cs を GaAs の表面に添加して形成する Ga^+-Cs^- 双極子モーメントの働きにより実現されているので, その安定的保持には最高水準の清浄環境を求めするのである. すなわち, 偏極直流電子銃の電界を簡単には上げられないのも, NEA 結晶を装着した偏極高周波電子銃が未だに実現できないのもこの NEA 状態の不安定性が原因である.

NEA 問題には SLAC も随分てこずっているのだが, 我々がその深刻さを身に沁みて実感したのが 100 keV 電子銃の完成過程においてである. 高電界が印加された NEA 表面に対して, “ 10^{-10} Pa 以下の超高真空度に加えて 10 nA 以下の電極間暗電流という静かな環境”を用意してやらないと, デリケートな Ga^+-Cs^- 双極子モーメントの破壊を遅らせることができないのである. そこで, “ H_2O や CO_2 などの残留ガス分子が無いに等しい真空環境を実現し, 新たな残留ガス分子生成を誘発する電極間暗電流を徹底的に削減する”という旧くて新しい課題に腰を据えて取り組むことにした. なお我々はまだエレガントに NEA 問題を解決する幾つかのアイデア (二光子励起機構の利用, ニードル状エミッターによる電界放出機構の利用等) をすでに試しつつあるが, NEA 表面の役割があまりに偉大である故に, その代役を容易に見つけられないというのが実情である.

4.1 高電界トンネル暗電流の削減

この研究の原動力となったのは KEK の吉岡正和, 松本浩の両氏の肝いりで作製を開始した真空環境下に置いた試験電極間の暗電流をギャップ間隔と直流印加電界強度を変えて測定できる暗電流専用試験装置である. この装置自体は, 凝ったハイテク装置をマイクロ表面観察に使うこともなくむしろ古典的なものであるが, 試験電極に対して, 材質, 表面加工方法, 研磨方法を変えた性能試験を 10^{-10} Pa 台の極高真空下で実施できることを売り物とした.

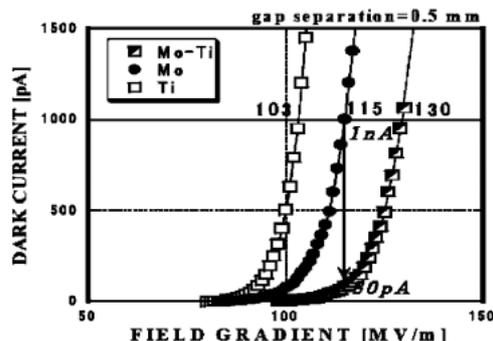


図4 Mo-Mo, Ti-Ti, Mo-Ti 電極からの暗電流測定データ

すでに, ステンレス鋼, 銅, モリブデン, チタンについて試験を行ったが, この研究過程で思いがけない知見を得ることになり2編の博士論文を作ることができた. ここでは例として, 暗電流を2成分に分類しそれらを分離評価できる手法を確立した経緯を書き留めたい. 我々の観察する暗電流は, Fowler-Nordheim 式で記述できる初期トンネル電流と電子, イオン, X線がアノードまたはカソード電極をたたいて生成する2次的暗電流を足し合わせたものであるが, 両者の電極間ギャップ依存性の違いに注目すれば, 全暗電流から初期暗電流成分のみを簡単に分離抽出できることを見出したものである. これは電極材料を選ぶときに重要な情報を与える.

カソード材には初期暗電流が少ないもの, アノード材には2次暗電流が少ないものを選ぶべきであり, 図4に示すように, モリブデンが前者, チタンが後者として, 飛びぬけて良い性質を持つことがはっきりと確認できたのである⁵⁾. 図の Mo-Ti は Mo カソードと Ti アノードを組み合わせた電極を指しており, この場合には 130 MV/m という高電界まで暗電流を 1 nA に抑制できた事を示している. なお Mo カソード表面のマイクロ電界増倍係数はこのとき 21 まで改善されたことも確認している.

暗電流や極高真空のように清浄化表面が性能限界を決める技術開発には材料入手, 金属加工, 表面研磨, 洗浄の各工程を任せられる製造会社と工場技術者を見つけることが決め手となることを強く意識し, 最良の結果が得られるまで試行錯誤を繰り返した. これらの技術開発のおかげで, 我々が当初抱いていた SLAC 技術へのコンプレックスを完全に払拭できたし, つぎに述べる 200 keV 電子銃に向かう意欲を掻き立てることもできた.

4.2 200 keV 電子銃の完成を目指して

ずっと SLAC の後塵を拝してきた電子銃の性能に

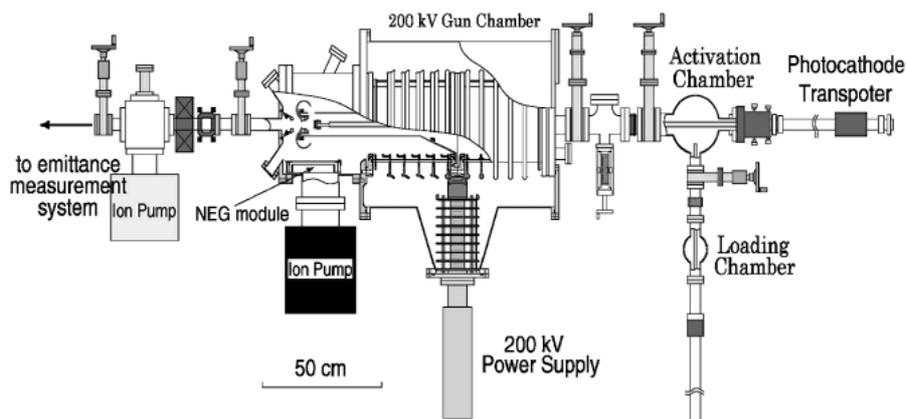


図5 200 keV 偏極電子源装置

において、その立場を逆転しようとの意気込みで開始したのが 200 keV 電子銃の試作である。まず図 5 に示すように電子銃の構造自体に独自性を持たせた⁶⁾。すなわち超高真空を破らずに GaAs 結晶の交換を可能にする Load-Lock 機構を採用するのは SLAC と同じだが、高電圧セラミックを 2 対用いて中央部に 200 kV を印加する構造が新しく Load-Lock 機構を常時アースレベルで操作できる利点をもたらした。電極設計においても、カソード表面電界は SLAC 電子銃の 1.8 MV/m を大幅に上回る 3.0 MV/m を実現するとともに、電極表面の最大電界は SLAC の 7.0 MV/m とほぼ同じ値 7.8 MV/m に抑えた。

この電極は高品質ステンレス鋼で作製したものであるが、実験結果として目標通り 200 kV 印加時でも暗電流を 1 nA 以下に抑えられた。すなわちこの点ではすでに SLAC を越えることができたのだが、さらに余裕を産むために上述の Mo-Ti 電極に置き換える準備をしている。一方で見通しの甘さを反省したのが極高真空系の設計であった。全圧としては 3×10^{-9} Pa を実現したにもかかわらず、 H_2O と CO_2 の分圧が全圧の 10% ずつを占めるほどに残存し、結果として NEA 寿命も 30 時間と短かった。そこでカソード電極を NEG-module の柵で取り囲むように追加する応急措置をとり、排気容量を旧来の 7 倍の 8,000 l/s に増強して NEA 寿命を 150 時間まで伸ばせることは確認した。しかし極高真空系にはまだまだ改善すべき余地があり満足できるレベルには到達していない。それでもシステム全体としてはすでに Pepper-Pot を用いたエミッタンス測定装置の整備やエミッタンス計算用コードを自前で作成する作業を終了した。現在はリニアコライダーの要求を満たす低エミッタンス偏極電子ビームの実現を試験できる段階に突入しており、こ

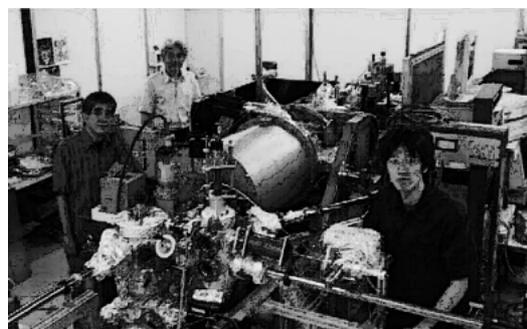


図6 200 keV 電子銃システム

で所期のビーム性能が実現できたときに電子銃においても SLAC を完全に追い越したことになる。参考までに電子銃装置の写真を図 6 に示しておく。

リニアコライダー計画自体は巨大計画の宿命から逃れられず計画承認までなお時間がかかるようである。それでも 2004 年に加速方式を超伝導に絞って以降の欧米重 3 極による 2006 年末の統一デザイン作成へ向けた熱気の高まりは近い将来にそれぞれが得意な装置の製作を分担した建設が始まることを予感させるものである。偏極電子ビーム源は SLAC と日本が分担して設計・製作にあたる見通しであるが、その主要開発項目は、①フォトカソード、②電子銃、③レーザーとなるはずである。①は開発済みであり、②の見本となるべき 200 keV 電子銃を早急に完成することが求められている。③のレーザー装置には超伝導加速方式の要求する 337 ns 間隔の 2,820 個のマルチバンチを生成する技術が求められるが、現時点でこれに対応できるものがない。そこで、我々も SLAC とは独立に、SPRING-8、住友重機、DESY 等で高周波電子銃用レーザー装置の開発専門家に相談しながら最も合理的なシステム構成案の検討から作業をスタートしているところ

ろである。

5. 共同研究と波及効果

ここでは我々にとって共同研究者がいかに重要であったかを説明しておきたい。まず同業者である加速器研究者を挙げると、暗電流の研究には KEK の協力が不可欠であったし、現在も栗木雅夫氏等に低エミッタンスビーム生成で協力してもらっている。さらにリニアコライダー計画にからんで KEK が国際会議等で我々の成果を宣伝し続けてくれたことは大きな励みになった。また SLAC, J-Lab, Mainz, Bonn, Novosibirsk など海外の研究機関の偏極電子源グループと交流できたことが我々に刺激を与えてくれた、特に隔年毎に開催される偏極電子源・国際ワークショップの役割は大きく、そこで得た情報をもとに“時にはライバル時には共同研究者”として彼らと切磋琢磨することができた。このワークショップを 1992 年、2000 年、2006 年（予定）に名古屋で主催できたことはこの分野における我々の存在感と活発な国際交流の証しであると自負している。

異分野の研究者との共同研究は特に重要であった。半導体フォトカソードの作成には大阪府大、大同特殊鋼、NEC、名大工の研究者が全面的に協力してくれたが、さまざまな縁をたどって出会うことができた彼らの協力なしには、高偏極度と高量子効率を目指す競争で世界をリードするようなことは不可能であった。加速器のエネルギーフロンティアはすでに TeV スケールに達しているが、電子源は 200 keV であり、さらに高偏極度を得るための価電子帯の縮退の破れは 0.1 eV 足らずである。このような広いエネルギー領域に散らばる個々の研究を総合的に活用するところに加速器物理の面白さがあるのだが、分野の垣根を越えた共同研究が日本全体でさらに盛んになることを祈りたい。

最近物性分野にも恩返しができるかも知れないテーマに遭遇している。一例が、初期エミッタンスを最小にできる NEA 型フォトカソードの利点を生かした高電界・直流電子源を第 4 世代の ERL (Energy Recovery Linac) 加速器の入射電子源として使う可能性である。これには 500 keV 以上の電子銃を開発する必要があり、我々の技術が生かせる可能性は充分ある。別の例が、大阪電通大の越川孝範氏と相談している投影型表面電子顕微鏡 (LEEM) へのスピン偏極電子源の応用であり、予算が獲得できれば、我々の技術を生かして 10 nm の分解能で磁区構造が観測できる可能性が充分にある。

6. おわりに

思い返せばここに紹介したささやかな成果をあげるにもすでに 20 年を費やしてしまった⁷⁾。リニアコライダー計画承認の遅れは様々な困難をもたらし私個人も実現の前に定年を迎えてしまうことになった。しかしここで開発した技術の他分野への移転はいつでも可能である。例えば、C/X-バンド技術はリニアコライダー以外の X 線放射光用加速器や小型医療加速器へすでに応用されつつある。我々の開発したフォトカソードも世界各地の電子線加速器でハドロン偏極実験のためにすでに使われている。幸か不幸か、計画の遅れがもたらした時間的余裕が、半導体フォトカソード開発、NEA 表面電荷現象、暗電流削減等の研究を手作りの装置で解明してゆくスタイルを可能にしてくれた面があり、このスタイルが“大学での研究は専門職員の不足を大学院生で補うので速攻では成果を挙げにくい”弱点を緩和してくれたとも言える。実際に名大で実験に没頭してくれたのは、奥見正治氏と 14 名の博士院生（うち 1 名は現在助手、7 名が学位取得済み）および 16 名の修士院生（全員学位取得済み）の諸氏である。卒業生のうち 8 名は加速器分野で現在も働いているが、修士卒業者の大半は加速器にもスピンにも無縁の分野に散ってしまうのが私個人としては残念なことである。

最後に、私の偏極電子源開発の助走期間がまさにそうであったように、助手クラスの若手が既存のプロジェクトから外れてゼロから始めた研究課題に対しても、それが発芽し、幼木に成長する兆しが見えれば、最低限の水をかけてやるような寛容さが今後とも大学に温存されることを願って結びとしたい。

参考文献

- 1) T. Nakanishi et al., Phys. Lett. A 158 (1991) 345.
- 2) Y. Kurihara et al., Jpn. J. Appl. Phys. 34 (1995) 355.
- 3) T. Nishitani et al., J. Appl. Phys. 97 (2005) 094907.
- 4) K. Togawa et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 414 (1998) 431.
- 5) F. Furuta et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 538 (2005) 33.
- 6) T. Nakanishi et al., GLC Project Report (KEK-Report 2003-7).
- 7) より詳しい論文と解説は以下の科研費報告集にまとめられている。基盤（試験 B）「100% に近い偏極度を有する電子源の開発」1992~94 年度、基盤（展開 A1）「新世代のスピン偏極電子源の実用化」1995~97 年度、基盤（展開 A1）「マルチバンチ・スピン偏極電子ビーム源の実用化」1998~2000 年度、基盤（A1）「超低エミッタンス電子源の開発」2003~2005 年度（作成予定）